

СВЕТО 5·2018 ТЕХНИКА



Наши преимущества:

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

Качество
Надежность
Оперативность



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



opora-e.com



(495) 785-37-40

Blu2Light

«BLU2LIGHT» НА ОСНОВЕ
BLUETOOTH® - БУДУЩЕЕ В
УПРАВЛЕНИИ ВНУТРЕННИМ
ОСВЕЩЕНИЕМ



Несмотря на многочисленные преимущества, общепризнанный протокол управления освещением DALI имеет свои ограничения.

Компания **Vossloh-Schwabe** представляет современную систему управления освещением **«Blu2Light»**. Система, которая была специально разработана для рынка профессионального освещения, использует инновационную технологию ячеистой сети на основе Bluetooth®.

Кроме того, **«Blu2Light»** обладает открытым интерфейсом, что позволяет системным партнерам разрабатывать и предлагать свои собственные устройства, программное обеспечение или облачные сервисы. **«Blu2Light»** позволяет подключать уже известные и привычные системы управления, такие как DALI, DMX или 1-10V. Возможна непосредственная интеграция **«Blu2Light»** в светодиодные блоки питания или светодиодные модули.

Система **«Blu2Light»** учитывает и будущие пожелания производителей осветительного оборудования относительно реализации концепции вычислительной сети физических предметов IoT. При этом обеспечивается многоуровневая система защиты.

Принцип работы **«Blu2Light»** состоит в переносе базовых функций управления с уже известного светового контроллера DALI от Vossloh-Schwabe на многофункциональный датчик, объединяющий в одном корпусе датчики освещенности и движения.

Чтобы обеспечить удобство настройки и работы с помощью смартфона или планшета, было создано приложение, **«LiNA»**, которое помогает пользователям при конфигурации системы.

Подробнее о комплектующих системы **«Blu2Light»** можно узнать на сайте **Vossloh-Schwabe**.

Преимущества системы «Blu2Light»

- НАСТРОЙКА С ПОМОЩЬЮ ПРИЛОЖЕНИЯ «LiNA»
- УПРАВЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПРИЛОЖЕНИЯ «TOUCH4LIGHT»
- ПОДКЛЮЧЕНИЕ ДО 64 БЛОКОВ ПИТАНИЯ DALI
- ВСТРОЕННАЯ ПОДДЕРЖКА «BEACON»

50 Юбилей!



**50 лет у руля журнала
«Светотехника» и 25 лет
со дня основания и
руководства журналом
«Light & Engineering»**

50 лет у руля журнала «Светотехника» и 25 лет во главе журнала «Light & Engineering» – такой удивительный юбилей отмечает в этом году профессор Юлиан Борисович Айзенберг. Это редчайший случай в истории научно-технической литературы, вполне достойный внесения в «Книгу рекордов» Гиннеса.

Многолетняя деятельность по сохранению журналов в тяжёлые годы перестройки и преобразований и непрерывное развитие и совершенствование обоих изданий привели к признанию «Светотехники» одним из лучших научно-технических журналов нашей страны, а «Light & Engineering» – одним из трёх лучших светотехнических журналов мира.

Мы поздравляем Юлиана Борисовича с профессиональным юбилеем, желаем ему здоровья, сохранения неугасающей энергии и сил для дальнейшей творческой работы!

Редакция и Редколлегия журналов
«Светотехника» / «Light & Engineering»

Уважаемые читатели!



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

В текущем номере хочется прежде всего обратить ваше внимание на обзор Л.А. Апресяна «Эффективные электродинамические параметры нанокompозитных сред и теория гомогенизации», посвящённый новому перспективному направлению – нанотехнологии, под которой понимают создание новых материалов с наперёд заданными произвольными оптическими свойствами. Это направление было предсказано Р. Фейнманом в 1959 г. в его Нобелевской лекции о возможности созданием новых материалов на основе определённым образом структурированных на атомном и молекулярном уровне частиц. Это открывает безграничные перспективы создания приборов и систем в оптике и светотехнике не с учётом свойств существующих материалов, а создавая новые материалы специально к разрабатываемым устройствам.

В номере продолжается дискуссия на тему светового дизайна. Нам представляется очень удачным, что по этой актуальнейшей для светотехники теме высказываются специалисты различных направлений: проектировщики, дизайнеры, художники и архитекторы. Это позволяет надеяться, что будет выработан общий взгляд на проблему, что позволит повысить качество проектирования осветительных установок. Дискуссия будет продолже-

на и в следующем номере, поэтому приглашаем всех заинтересованных лиц высказаться по теме светового дизайна.

Недавно мне довелось принять участие в конференции «Графикон-2018» в Томске, где совместно с А.А. Захаровой мы провели секцию «Компьютерная графика, светотехника и дизайн». На конференции было представлено более 100 докладов по различным направлениям компьютерной графики и её приложениям, но существенным для меня было то, что все доклады в той или иной степени основывались на базовых положениях светотехники. Синтетические изображения объектов на экране мониторов компьютеров представляют собой визуализацию пространственно-углового распределения яркости в исследуемых сценах, т.е. теория светового поля с учётом многократных переотражений от поверхностей сцены.

Важное направление развития в светотехнике представлено в статье Л.Б. Прикупца, Г.В. Бооса, В.Г. Терехова и И.Г. Тараканова «Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зеленных культур» – технологическое применение света в теплицах по выращиванию сельскохозяйственных структур. В работе В.П. Афанасьева и других проводится очень глубокая аналогия между фотометрией и распространением пучков частиц. Отметим, что эти две области в XX веке развивались параллельно, взаимно обогащая друг друга.

Такое разнообразие направлений научных публикаций журнала за последнее время позволяет

сделать вывод фундаментального характера. Светотехника зародилась в конце XIX в. как прикладная наука о технике освещения. Создание электрического освещения явилось революционным событием, изменившим наш мир и во многом определившим стремительный прогресс человечества в XX в. Наряду со светотехникой существовала оплотехника, впоследствии оптоэлектроника, посвящённая системам построения изображения объектов. С 1960-х гг. с изобретением лазера началось мощное развитие устройств технологического применения света: в сварке и резке материалов, медицине, зондировании Земли из космоса, в подводных системах... Развитие различных светотехнических систем, где выделим прежде всего светодиоды, показало, что устройства, основанные на учёте волновых свойств света, составляют важную, но не основную долю технологических систем.

С сегодняшних позиций подавляющее большинство всех этих приборов и систем описывается в рамках фотометрической теории светового поля, заложенной в работах Бугера-Ламберта-Бера. Важно заметить, что развитие каждой из областей влияет на все остальные, что требует от современного светотехника знаний по каждой из областей. Конечно, охватить такое самому крайне сложно, но это мы будем стараться делать в рамках нашего журнала, стараясь охватить весь спектр теории светового поля и её возможных приложений. Тем самым наш журнал станет энциклопедией современной светотехники, открывая возможность использования новых идей из одной области в другой.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Г.В. Боос, председатель редакционной

коллегии, к.т.н., НИУ «МЭИ», Москва

С.Г. Ашурков, к.т.н., Москва

Л. Бедокс (*Lou Bedocs*), *Thorn Lighting Limited*, Великобритания

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

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

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

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

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

Н.В. Быстриянцева, 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

П. Дехофф (*Peter Dehoff*), *Zumtobel Lighting*, Австрия

У. Джулиан (*Warren G. Julian*), *University of Sydney*, Австралия

О.Е. Железникова, к.т.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск

П.П. Зак, д.б.н., проф., ИБХФ РАН, Москва

А.А. Коробко к.т.н., БЛ Групп, 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

В.М. Пятигорский, 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.К. Соловьёв, д.т.н., проф., НИУ «МГСУ», Москва

К.А. Томский, д.т.н., проф., СПбГИКИТ, С.-Петербург

Ф. Хенгстбергер (*Franz Hengstberger*), *National Metrology Institute*, ЮАР

А.Г. Шапаруняц, к.т.н., генеральный директор ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва

Н.И. Щепетков, д. арх., проф., МАРХИ (ГА), Москва

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Генеральный директор

Н.С. Шерри; sherri@bl-g.ru

Старший научный редактор

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; fedorishchev@gmail.com

Шеф-редактор

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

Главный редактор

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

Зам. главного редактора и научный редактор англоязычной версии

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

Зав. редакцией

М.И. Титаренко; zav.red@list.ru

Стилист английской версии

М.Д. Виноградова

Секретарь редакции

А.В. Лукина; journal.svetotekhnika@mail.ru

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

– Тугсе Казанасмаз (*Tugce Kazanasmaz*), Измирский технологический институт;

– Эрдал Шехирли (*Erdal Sehirlil*), 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 13.09.18. Подписано в печать 06.10.18
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 5·2018

В НОМЕРЕ

СЕНТЯБРЬ • ОКТЯБРЬ

50 лет у руля журнала «Светотехника» и 25 лет со дня основания и руководства журналом «Light & Engineering»	2
Бизнес и инновации	24, 33, 55, 71, 86, 88
Колонка главного редактора	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-зеленных культур	6
Апресян Л.А. Эффективные электродинамические параметры нанокompозитных сред и теория гомогенизации	13
Соловьёв А.К., Нгуен Ф.Т.Х. Метод расчёта параметров светового климата по световой эффективности солнечного излучения	21
Аяз Р., Озканли А.К., Накир И., Бхусал П., Унал А. Оценка жизненного цикла светильников для турецких дорог классов M1 и M2 по освещению	25
Дюман А.К., Гюлер Ё. Техничко-экономический анализ автономных установок дорожного освещения в Турции	34
Афанасьев В.П., Будаков В.П., Ефременко Д.С., Капля П.С. Применение фотометрической теории светового поля в задачах рассеяния электронов	44
Голубин С.А., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Комаров В.М. Экспериментальное исследование влияния типа фотоприёмника на характеристики оптических министиков унифицированных человеко-машинных интерфейсов	51
Новаковский Л.Г., Феофанов С.А. Реконструкция осветительных приборов Московского метрополитена	56
Тексой М., Дурсан О. Новый метод оценки работы адаптивных кинетических солнцезащитных устройств	60
Гиясов А.И. Значение инсоляционного планшета для оценки инсоляционного режима городских территорий и зданий	68
СТУДЕНЧЕСКИЕ РАБОТЫ	
Нечаева К.И. Проект реконструкции осветительных приборов станции метро «Красносельская» Московского метрополитена	72
ДИСКУССИЯ ПО ПРОБЛЕМЕ СВЕТОВОГО ДИЗАЙНА	
Продолжение дискуссии по проблеме светового дизайна, начатой в № 3 и продолженной в № 4	79
ХРОНИКА	
Яроцкий В.Ю. Международный военно-технический форум-выставка «АРМИЯ-2018»	87
РАБОТА ОТРАСЛЕВОГО НТС	
Федорищев П.А. Первое заседание секции «Освещение музеев»	88
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Пашковский Р.И. О Своде правил СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтаж»	89
ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
«Blu2Light» – будущее в управлении внутренним освещением	1
Тепличное освещение. Готовые комплексные решения	42
Новые возможности в освещении от компании <i>Osram</i>	78
Международная конференция «LED FORUM»	95
Международная выставка <i>Interlight Moscow powered by light+building 2018</i>	96
Крупнейшая вертикальная ферма в мире в префектуре Мияги, Япония. Более 2000 м ² полезной площади освещается 17,5 тыс. СД	1 с. обл.
Современное предприятие полного цикла по выпуску опор наружного освещения	2 с. обл.
Инновационные решения в освещении для столицы и регионов	3 с. обл.
«LED Industry Kit Gen. 2» — освещение производственных помещений	4 с. обл.

Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зеленных культур

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

¹ ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва

² НИУ «МЭИ», Москва

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

E-mail: prikup@vnisi.ru

Аннотация

Представлены результаты первой фазы фотобиологических исследований, конечной целью которых является оптимизация спектра фитооблучателей со светодиодами и уровня облучения при выращивании салатно-зеленных растений в теплицах и фабриках растений в условиях светокультуры. Они приведены в виде серии световых кривых продуктивности для салата и базилика при облучении квазимонохроматическим излучением в трёх диапазонах области ФАР: синем, зелёном и красном. В эксперименте в широких пределах варьировались уровни фотосинтетической фотонной облучённости (70–230 мкмоль/(с·м²), что эквивалентно облучённости 13–60 Вт/м²). Приведены «грубые» спектры действия оптического излучения, оценённые по продуктивности растений при разных уровнях облучённости, рассмотрены вопросы аддитивности действия разноспектральных излучений в обеспечении формирования растительной биомассы. Выполнены оценки эффективности разных диапазонов области ФАР для синтеза биохимических соединений, определяющих пищевую ценность исследуемых культур.

Ключевые слова: фотобиологические исследования, световая кривая продуктивности, фотосинтез, светокультура, фитооблучатель со светодиодами, ФАР, спектр действия, фотосинтетический поток фотонов (ФПФ), плотность фотосинтетического потока фотонов (ПФПФ), облучённость, фотонная облучённость.

1. Введение

Возможность создания на основе светодиодов (СД) квазимонохро-

матических излучателей в основных диапазонах области фотосинтетически активной радиации (ФАР), определяющих формирование биомассы, морфогенез и метаболизм растений, стимулируют соответствующие фотобиологические исследования (ФБИ) во всём мире. Известная кривая *K.J. McCree* [1], описывающая спектр действия фотосинтеза, полученная *in vitro* с использованием достаточно сложной оптики на отдельных листьях растений при низких уровнях облучённости и являвшаяся почти полвека своеобразным «Евангелием для фотобиологов», подвергается сомнениям [2]. Благодаря СД у фотобиологов появляется новый эффективный исследовательский инструмент, позволяющий проводить ФБИ влияния излучения различных диапазонов области ФАР на продуктивность и качество биомассы растений в широком диапазоне облучённостей, представляющих интерес для практической светокультуры. Именно такую задачу ставили перед собой авторы настоящей работы, выбрав в качестве объекта исследований группу зеленных овощных культур (на примере салата сорта Ландау и базилика сорта Русский гигант, которые относятся к растениям, представляющим перспективный интерес для хозяйственного выращивания в промышленных теплицах).

2. Краткая характеристика указанных культур

Салат имеет множество разновидностей. Самый распространённый – листовая салат. Он обладает богатым витаминно-минеральным составом, в котором присутствуют витамины групп В и С, а также кальций, бор, медь, йод, фосфор. Употребление салата в пищу обладает множеством по-

лезных эффектов влияния на организм человека.

Базилик – ценная пряно-вкусовая культура. Его польза для организма настолько велика, что её трудно переоценить. Большинство своих полезных свойств базилик обязан образованием в биомассе эфирных масел.

3. Методика ФБИ и экспериментальная установка

Исследовалась реакция растений – под которой понимается общий вес хозяйственно-полезной биомассы (продуктивность) – на действие квазимонохроматического излучения в отдельных диапазонах области ФАР при вариации в широких пределах уровня облучённости. В указанных условиях оценивалось содержание важнейших компонентов биохимического состава продукции, определяющих её пищевую ценность.

В результате ФБИ для каждого спектрального варианта предполагалось получить серию т.н. «световых кривых», на основе которых могут оцениваться реальная эффективность отдельных диапазонов области ФАР и определяться направление поиска оптимальных требований к спектру излучения фитооблучателей (ФО) и уровню облучённости от ОУ при выращивании растений по технологии светокультуры.

Специально для ФБИ в МСК «БЛ Групп» и ВНИСИ им. С.И. Вавилова была разработана и изготовлена (в КЭТЗ¹) серия квазимонохроматических ФО (рис. 1), характеристики которых представлены в таблице и на рис. 2.

Как видно из рис. 3, «синий», «зелёный» и «красный» ФО излучают в зонах чувствительности большинства пигментов-фотоприёмников растений.

В составе ФО использовались регулируемые управляющие устройства («драйверы») типа *OT180W/UNV1250C*. При этом регулировка тока в пределах 350–1300 мА позволяла менять мощность облучателей и облучённость от них на технологической площади.

Для оценки возможного диапазона регулирования облучённости предварительно для каждого типа ФО снималась относительная зависимость потока излучения от тока (рис. 4).

¹ КЭТЗ входит в МСК «БЛ Групп».

ФБИ проводились в условиях фитотрона Лаборатории искусственного климата РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева на созданном исследовательском комплексе в составе шести унифицированных модульных установок с отражающими экранами из зеркальной плёнки (рис. 5)². Диапазон возможного изменения уровня ПФПФ в СД-модулях составлял 60–300 мкмоль/(с·м²), для получения данных для построения световой кривой с фиксированными значениями облучённости для конкретного спектрального варианта проводилось не менее 4-х вегетаций. Выбор площади рабочей зоны (зона размещения растений на посадочной площади) определялся требованием обеспечения облучения с отклонением от среднего уровня облучённости ≤ 10 %; в зависимости от условий конкретного опыта она составляла 0,25–0,35 м². Установка уровня облучённости производилась по блок-схеме на рис 6 с помощью программатора и компьютера с установленным ПО. Для измерений спектра излучения ФО, облучённости и фотосинтетической фотонной облучённости в области ФАР использовался прибор для интегральных измерений ПФПФ модели *Li-250A* с квантовым датчиком модели *Li-190R* (фирма *Li-COR*, США) и спектрометр *MK 350S* (фирма *UPRtek*, Тайвань). По просьбе авторов компанией «ИНТЕХ Лайтинг» (Санкт-Петербург), по согласованию с фирмой *UPRtek*, прибор *MK 350S* был снабжён дополнительной опцией, позволяющей проводить измерения облучённости в области ФАР в энергетических единицах (Вт/м²). (Процесс выбора приборов явился неординарной задачей и был связан с внедрением разработанных во ВНИСИ им. С.И. Вавилова национальных стандартов ГОСТ Р 57671–2017 и ПНСТ 211–2017 [3–5].)

Остальные условия эксперимента соответствовали требованиям фитотронной технологии выращивания салатно-зеленных культур и кратко описаны ниже.

Эксперименты проводились при постоянном фотопериоде в 18 ч. Температура воздуха днём – 22 °С, ночью – 18 °С. Растения выращивались в вегетационных сосудах с питатель-

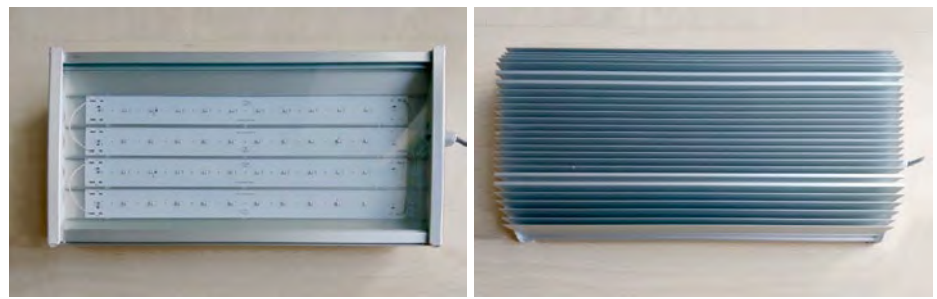


Рис. 1. Внешний вид квазимонохроматических фитооблучателей

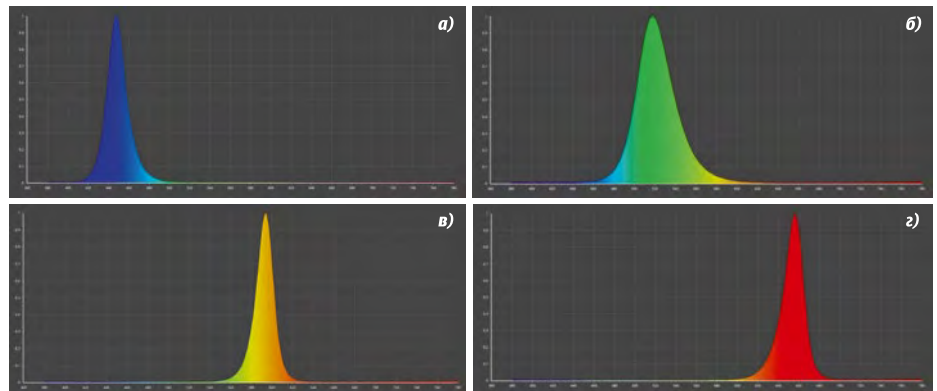
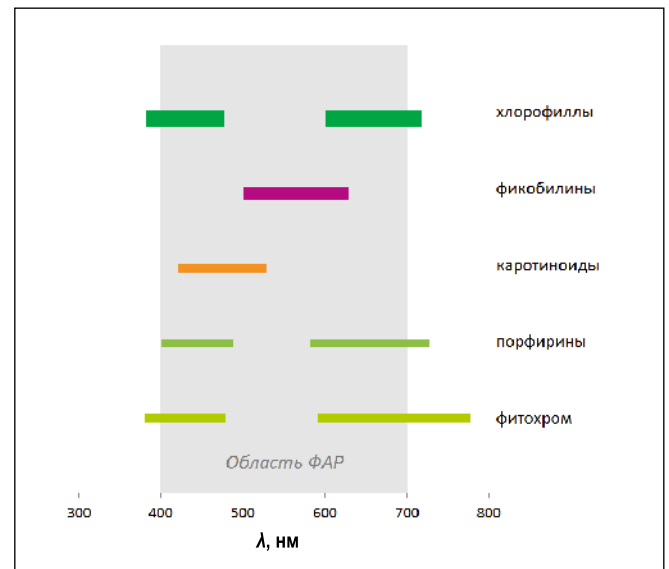


Рис. 2. Спектры излучения квазимонохроматических фитооблучателей: а – «синий», б – «зелёный», в – «янтарный», г – «красный»

Рис. 3. Спектральные диапазоны эффективного поглощения основных фотопигментов растений



ной смесью «Агробалт С» по 3 (салат) или 5 (базилик) штук. Субстрат – верховой нейтрализованный сфагновый торф низкой степени разложения, с влажностью не более 65 %, содержащий известняковую (доломитовую) муку и комплексное удобрение ($N_{\text{общ}} - 150$ мг/л, $P_2O_5 - 150$ мг/л, $K_2O - 250$ мг/л, $Mg - 30$ мг/л, $Ca - 120$ мг/л, микроэлементы), pH 5,5–6,6. Полив

проводился по весу, поддерживалась влажность 70 % ПВ, повторность – четырёхкратная.

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

Содержание витамина С (аскорбиновая кислота) в тканях растений определялось по методу, основанному на реакции Тильманса с обесцвечиванием 2,6-дихлорфенолиндофенола. Нитраты определялись после экстрагирования с алюмокалиевыми квас-

² Параллельно с исследованием воздействия квазимонохроматических излучений проводились эксперименты с источниками излучения с непрерывным спектром в области ФАР. Результаты будут приведены в отдельной статье.

Рис. 4. Зависимость фотосинтетического потока фотонов (ФПФ) фитооблучателей от тока

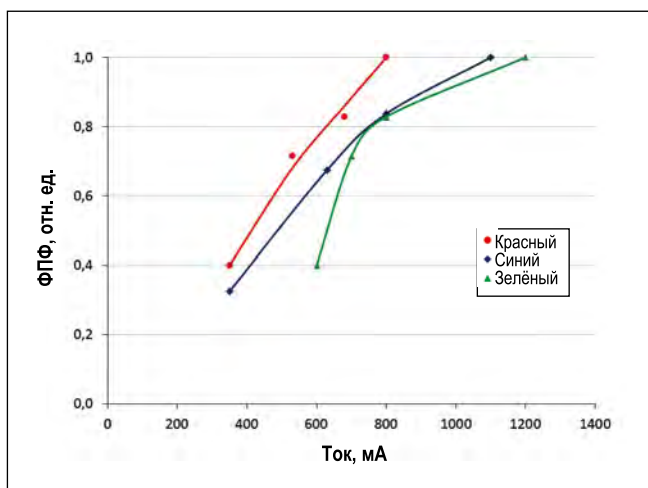


Рис. 5. Общий вид установок для фотобиологических исследований

Рис. 6. Блок-схема регулирования мощности и ФПФ квази-монохроматических фитооблучателей



цами с помощью ион-селективного электрода. Для определения количественного и качественного составов накопления биологически активных ароматических компонентов, входящих в состав эфирного масла базилика, использовалась газовая хроматография с масс-селективным пламенно-ионизационным детектированием, а идентификация компонентов эфир-

ных масел проводилась по библиотекам масс-спектров.

4. Анализ результатов исследований

На сегодня несомненен тот факт, что фотосинтез – процесс квантовый, квантовый выход (или интенсивность фотосинтеза) в котором определяется

числом поглощённых фотонов в области ФАР. На этой основе базируется система фотосинтетических фотонных величин, в настоящее время активно внедряемая в практику измерений излучения в сооружениях защищённого грунта, в первую очередь в теплицах со светокультурой растений.

Однако не стоит забывать, что фотосинтез в реальном растении как фотобиологической системе имеет вероятностный характер. В теоретической фотобиологии показано, что на одну молекулу производимого органического вещества или O_2 приходится от 8 до 12 фотонов ФАР [6]. Поэтому даже для фотосинтеза, не говоря уже о синтезе растительной биомассы, новая эффективная система величин – не более чем удобная модель, позволяющая вести расчёты, носящие условный характер.

В связи с указанным и учётом новых метрологических возможностей представляется целесообразным не отказываться от весьма популярной в прошлом веке в ФБИ и даже в практической светокультуре растений энергетической системы величин для области ФАР³. Достаточно заметна единая энергетическая «нить», связывающая в светокультуре растений потребляемую лампой мощность, долю её излучения в области ФАР, КПД ФО и коэффициент использования ФАР в ОУ с облучённостью на технологической площади, удельной потребляемой мощностью ОУ и даже энергетическим эквивалентом произведённой биомассы.

С этих позиций нам представилось особенно интересным в данных ФБИ рассмотреть результаты по синтезу биомассы как функции фотонной облучённости $E_{\text{ф}}$, так и («энергетической») облучённости E , связь между которыми определяется как

$$E_{\text{ф}} = K_{\text{эф}} \cdot E,$$

где

$$K_{\text{эф}} = (hcN_A)^{-1} \int_{400}^{700} e(\lambda)\lambda d\lambda / \int_{400}^{700} e(\lambda)d\lambda$$

³ Отметим, что предпочтение энергетическим величинам отдаёт ряд ведущих светофизиологов растений, в частности проф. А.А. Тихомиров [7].

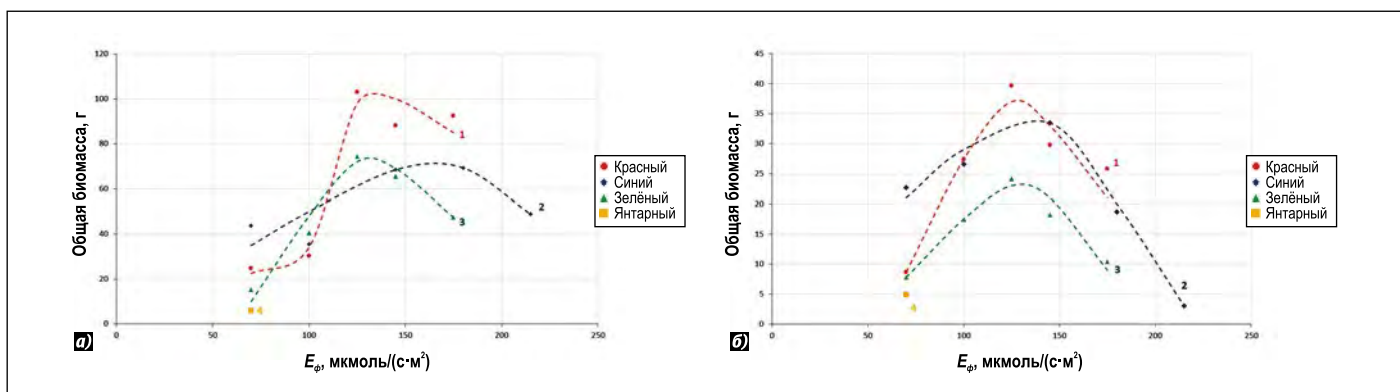


Рис. 7. Серия световых кривых продуктивности для салата (а) и базилика (б) в фотосинтетической фотонной системе величин

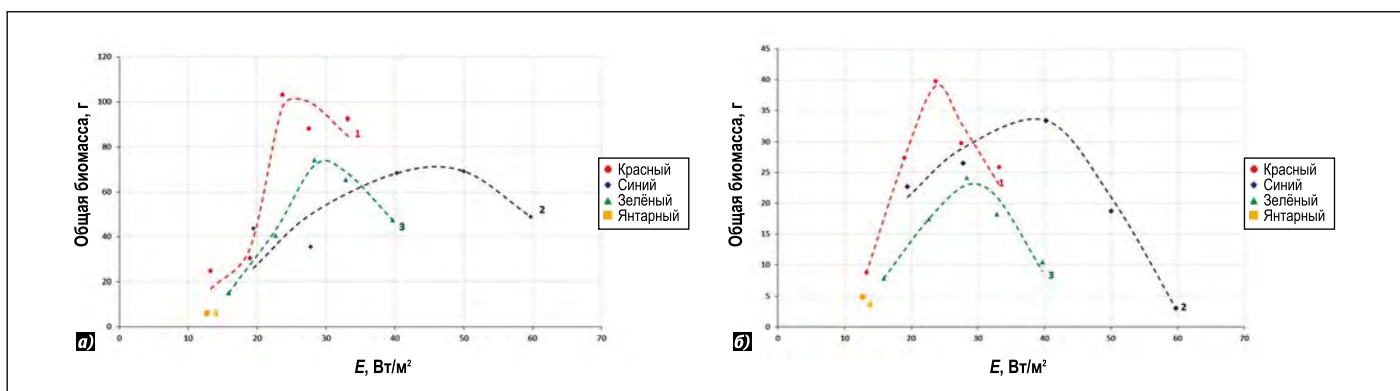


Рис. 8. Серия световых кривых продуктивности для салата (а) и базилика (б) в энергетической системе величин

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

Переход от E к E_ϕ или наоборот возможен расчётным путём или с использованием соответствующих приборов, что, собственно, и было сделано в настоящей работе.

Основные результаты ФБИ, представленные в виде световых кривых продуктивности для салата и базилика, приведены на рис. 7 и 8. Для показанных значений продуктивности средние среднеквадратичные отклонения составили $\pm 10,3\%$ (салат) и $\pm 18,5\%$ (базилик).

Отметим, что выращивание растений под квазимонохроматическим излучением, т.е. в световом режиме, в котором на протяжении всей вегетации «задействована» лишь часть спектра действия фотосинтеза, позволяет не только получать прямые данные об эффективности того или иного диапазона области ФАР, но и оценивать возможности растения как саморегулирующейся системы.

Анализ зависимости продуктивности салата сорта Ландау от уровня

ПФПФ указывает на достаточно резкую реакцию растений на низкоэнергетические кванты красного излучения, которое при небольших ПФПФ (E_ϕ) уступает по эффективности синему излучению, при средних (100 мкмоль/(с·м²)) незначительно уступает синему и даже зелёному, но в области более высоких ПФПФ, порядка 130–140 мкмоль/(с·м²), показало максимум продуктивности для всей серии опытов.

Протяжённость «восходящего участка» световой кривой наиболее велика для синего излучения, максимальные значения продуктивности достигаются в этом случае при ПФПФ 170–180 мкмоль/(с·м²), что подтверждает ранее полученные данные [8] и, на наш взгляд, указывает на бесперспективность обеспечения высокой доли излучения в синем диапазоне спектра излучения ФО с СД для хозяйственного выращивания салатных культур.

Результаты настоящих ФБИ наглядно показывают, что зелёный диапазон спектра при выращивании салата – отнюдь не «изгой», обеспечивает при ПФПФ порядка 100 мкмоль/(с·м²) большую продуктивность, чем красное и синее излучение.

Прямым подтверждением предположения о низкой эффективности жёлто-оранжевого диапазона области ФАР, излучение в котором поглощается практически только каротиноидами и фикобилинами, является опыт с использованием специально изготовленного «жёлто-оранжевого (янтарного)» ФО с СД при $E_\phi = 70$ мкмоль/(с·м²). В дальнейших экспериментах данный облучатель не использовался.

Как уже указывалось, в данных ФБИ благодаря новым «аппаратурным» возможностям нам впервые удалось дополнительно рассмотреть влияние излучения в разных диапазонах области ФАР на продуктивность для салата, перейдя от шкалы ПФПФ (или E_ϕ) к шкале E (рис. 8, а). Инверсия шкал, естественно, несколько изменила взаимное расположение световых кривых, существенно расширив диапазон эксперимента и представив данные в более привычном для светотехников и фотобиологов виде.

Отметим, что световая кривая для синего диапазона области ФАР в энергетической системе величин имеет наиболее пологий характер и достигает при достаточно высоких уровнях E (40–50 Вт/м²) максимума продуктивности, значительно уступающего оп-

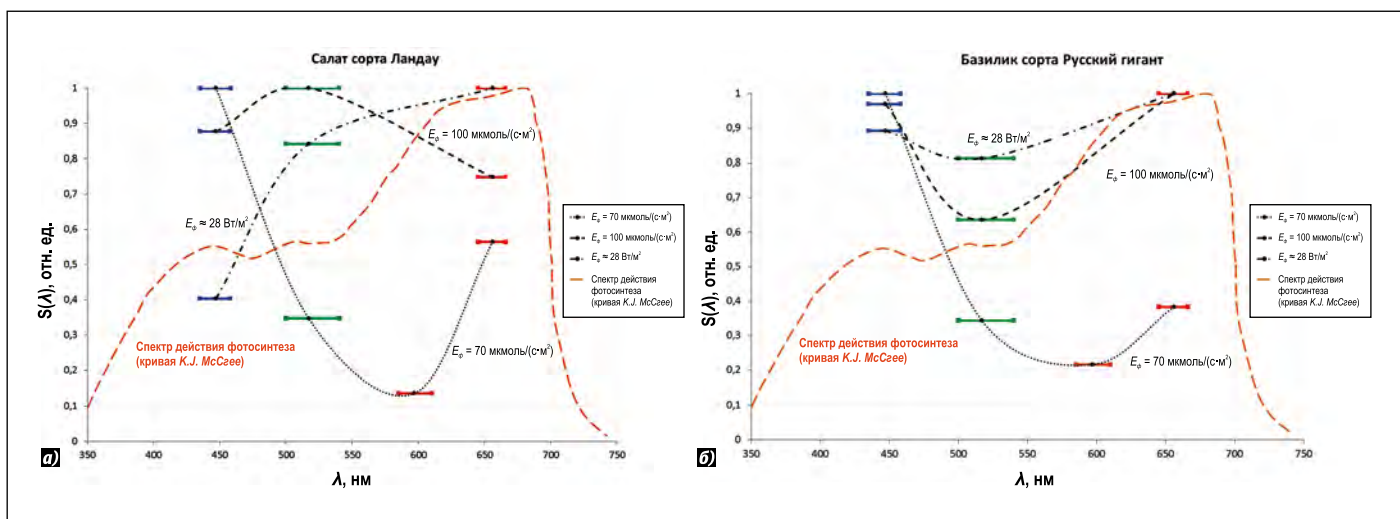


Рис. 9. «Грубые» спектры действия для синтеза биомассы салата (а) и базилика (б)

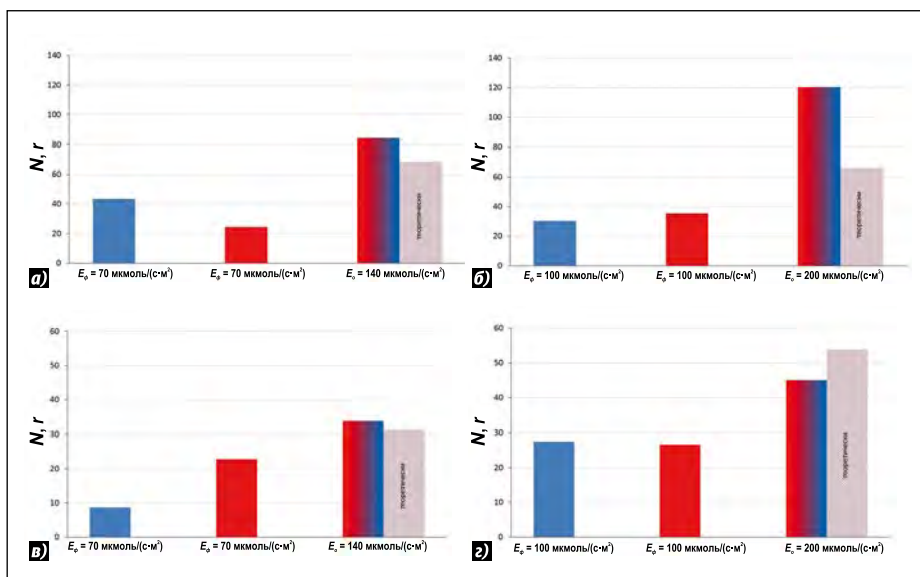


Рис. 10. Аддитивность действия разноспектральных излучений в области ФАР по синтезу полезной биомассы N

тимуму для красного излучения (при $E = 23\text{--}25 \text{ Вт/м}^2$).

Световые кривые для базилика сорта Русский гигант имеют определённые детали сходства и различия с таковыми для салата. Наиболее эффективным по продуктивности здесь также оказался красный диапазон области ФАР. Опыт с красным излучением при $E_\phi > 140 \text{ мкмоль/(с·м}^2\text{)}$ выявил трудно объяснимый эффект быстрого угнетения развития растений. В семействе этих кривых, $N(\text{ПФПФ})$, положения максимумов для всех диапазонов области ФАР весьма близки и соответствуют $E_\phi = 125\text{--}150 \text{ мкмоль/(с·м}^2\text{)}$.

По-видимому, для хозяйственного выращивания базилика оптимальным по спектру будет сочетание из-

лучений в красном и синем диапазонах области ФАР, поскольку зелёное излучение по эффективности им существенно уступает.

Инверсия шкал облучённостей привела для базилика к заметному изменению положения световых кривых, вероятно, связанному с разным энергетическим весом «красных», «зелёных» и «синих» фотонов (рис. 8, б).

Максимумы зависимостей в шкале E для красного и синего диапазонов области ФАР оказались сдвинутыми

примерно на 15 Вт/м^2 , что, бесспорно, обеспечивает красному излучению существенные преимущества по энергоэффективности.

Рассматриваемые данные дополнительно иллюстрируются с помощью так называемых «грубых» спектров действия⁴ синтеза для биомассы двух исследуемых культур (рис. 9)

Как видно из рис. 9, вид спектра действия сильно зависит от облучённости (E_ϕ или E), в зависимости от уровня которой эффективность того или иного диапазона для ФАР может резко меняться. Отсюда вполне понятна неоднозначность результатов многих ФБИ, проведённых при одном-реже, двух уровнях облучённости с противоречивыми данными, на что указывается, в частности, в [10].

Вкладывая в следующую часть наших ФБИ чисто методологическое содержание и рассматривая её как пролог к следующей фазе эксперимента, нами проведены опыты по оценке аддитивности действия излучения в синем и красном диапазонах области ФАР на синтез биомассы.

В общем случае под аддитивностью понимают свойство величин, состоящее в том, что значение величины, соответствующее целому объёму, равно сумме значений величин, соответствующих его частям. Так что любая произвольная функция f аддитивна, если

⁴ Под спектром действия здесь понимается реакция растений (продуктивность) на излучение в отдельных спектральных диапазонах при постоянном уровне облучённости (E_ϕ или E). Его знание позволяет определять влияние соответствующего типа фотопигмента на синтез биомассы.

Понятие «грубого» спектра действия введено А. Тохвером [9] и используется тогда, когда ширина выделенного спектрального диапазона составляет несколько десятков нм.

Основные параметры серии квазимонохроматических фитооблучателей для ФБИ

№ п/п	Тип ФО	U_c , В	Тип СД, фирма-производитель	Пиковая длина волны, нм	Спектральный диапазон излучения, нм (по уровню 0,5)	Диапазон регулирования по току, мА	Мощность (при токе 600 мА), Вт
1	GALAD Fito LED red	220	XPE HE Photo Red Light Emitting Diode, CREE	656	645–666	350–800	68
2	GALAD Fito LED blue		XLamp XT-E Light Emitting Diode Royal Blue, CREE	447	435–458	350–1100	84
3	GALAD Fito LED green		XLamp XP-E Light Emitting Diode Green, CREE	517	500–540	600–1200	84
4	GALAD Fito LED amber		XLamp XP-E Light Emitting Diode Amber, CREE	597	585–605	600	35

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2). \quad (1)$$

Если указанное равенство не выполняется и отношение левой части уравнения (1) к правой больше 1, то рассматриваемая функция f может быть названа супераддитивной, а если – меньше 1, то – субаддитивной.

Отметим, что *K.J. McCree* в своих экспериментах по фотосинтезу для изолированного листа выражал сомнения в аддитивности действия разнеспектральных излучений [1]. В соответствии с (1) критерий аддитивности формально может быть выражен как

$$A = N(E_o) / \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2)$$

где $E_o = \sum_{i=1}^n E_{\Delta\lambda_i}$, $N(E_o)$ – продуктивность при совместном действии излучения в n спектральных диапазонах при общей облучённости E_o , N_i – продуктивность i -го квазимонохроматического облучателя, излучающего в диапазоне длин волн $\Delta\lambda_i$ и обеспечивающего фотонную облучённость $E_{\Delta\lambda_i}$.

Как указывалось выше, в наших ФБИ $n = 2$ и для каждого опыта $E_{\Delta\lambda_i} = const$. Отметим, что, проводя исследования аддитивности, целесообразно выбрать уровни на восходящих линейных участках соответствующих световых кривых. По этим соображениям, нами были выбраны $E_{\Delta\lambda_1}$ и $E_{\Delta\lambda_2}$, равными 70 и 100 мкмоль/(с·м²) соответственно.

Таким образом, для E_o в соответствии с (2) устанавливались два значения: 140 и 200 мкмоль/(с·м²).

Результаты для салата и базилика, представленные на рис. 10, логичны и объяснимы. Для первичного уровня $E_{\Delta\lambda_i}$, 70 мкмоль/(с·м²), для обе-

их культур полученный эффект может быть оценён как супераддитивный ($A > 1$) и указывает на перспективность дальнейших ФБИ по оптимизации спектра бинарных красно-синих ФО. Качественно аналогичный результат получен для растений салата и при более высоком первичном уровне $E_{\Delta\lambda_i}$, 100 мкмоль/(с·м²), с учётом

положности световых кривых при высоких уровнях ПФПФ. Эффект субаддитивности красно-синего излучения при $E_{\Delta\lambda_i} = 100$ мкмоль/(с·м²) у бази-

лика связан с более резким характером спада световых кривых уже при уровнях ПФПФ выше 150 мкмоль/(с·м²).

Хорошо известно о влиянии излучения в области ФАР на синтез у растений тех или иных биохимических соединений, определяющих пищевую ценность растительной продукции [11]. Сегодня этому вопросу уделяется большое внимание при выращивании продукции повышенного экологического качества в условиях светокультуры.

На данном этапе ФБИ мы стремились получить оценочные данные, предполагая уточнить и довести их до уровня технологических показателей на завершающей стадии исследований.

В качестве основных компонентов биохимического состава для салата Ландау была принята концентра-

ция витамина С (мг/100 г биомассы); а для базилика – содержание основного вида эфирного масла (эвгенол). Оценивалось также содержание в биомассе нитратов.

На рис. 11 приведена серия зависимостей от облучённости содержания витамина С в сырой биомассе у салата Ландау. В качестве общей особенности для всех трёх диапазонов ФАР отметим рост концентрации витамина с ростом облучённости, причём положение максимума для синего диапазона соответствовало более низким уровням облучённости, чем для световой кривой продуктивности. В диапазоне ПФПФ, представляющем интерес для практической светокультуры, содержание витамина С может быть на 20–40 % выше среднего уровня для салатных культур (10 мг/100 г).

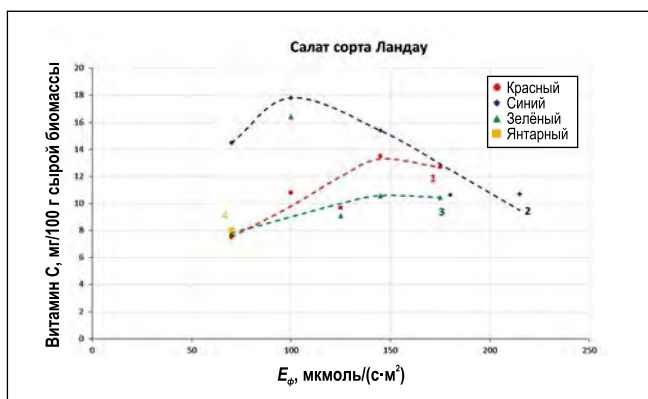
В ходе ФБИ устойчивого влияния спектра и уровня облучённости в области ФАР на биосинтез эвгенола в базилике выявить не удалось. Отметим, что высокие долевые показатели по содержанию эвгенола (50–55 %) были устойчиво выявлены при облучении красным светом с ПФПФ 125–150 мкмоль/(с·м²).

По содержанию нитратов разброс показателей оказался на уровне первого порядка величин, при этом оставаясь минимум в 2–3 раза ниже предельно допустимой концентрации (2500 мг/кг).

Заключение

Представленные ФБИ, выполненные с использованием последних достижений светотехники актуальны и показывают большие возможности СД-излучателей в решении задачи вы-

Рис. 11. Зависимость содержания витамина С для салата Ландау от ПФПФ (или E_{ϕ})



работки обоснованных требований к системам фитооблучения для светокультуры растений разных видов.

В работе для двух видов вегетативных растений в широком диапазоне облучённости (E_{ϕ} или E) получены данные о значении для продуктивности основных спектральных диапазонов области ФАР и подтверждено наибольшее значение красного диапазона.

Результаты ФБИ, приведённые в статье, убедительно показывают, что реакция растений (продуктивность) неаддитивно зависит от спектрального состава и облучённости, а поиски универсальных спектров действия продуктивности растений сомнительны. Спектр действия для продуктивности даже для вегетативных растений зависит от облучённости и, в принципе, должен оцениваться по двумерным шкалам (λ , E). Резюмируя сказанное, заметим, что альтернативы экспериментальному методу оптимизации основных светотехнических параметров для светокультуры растений пока не существует.

Наряду с научной и практической значимостью, исследования физиологической эффективности отдельных диапазонов области ФАР носят методический характер и могут применяться в учебных курсах для студентов специальностей «Светотехника» и «Физиология растений».

Данная статья написана в рамках проекта финансовой поддержки прикладных научных исследований Минобрнауки РФ, тема «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. Уникальный идентификатор: RFMEFI57617X0099).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McCree K.J. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants // *Agric. Meteorology*. – 1972. – P. 192–216.
2. URL: <http://www.hortibiz.com/item/news/research-redefining-the-mccree-curve/> (дата обращения: 31.08.2018).
3. 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. – № 4. – P. 7–17
4. 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; Boos G.V., Prikupets L.B., Rozovsky E.I., Stolyarevskaya R.I. Standardization of Lighting Fixtures and Installations for Greenhouses // *Light & Engineering*. – 2018. – Vol. 26, No. 4. – P. 18–24.
5. Bartsev A., Prikupets L., Shakhparunyan A. Measurements of photosynthetic photon flux (PPF) and flux density (PPFD) for greenhouse LED irradiators / Proc. CIE2018 «Topical Conference on Smart Lighting», 2018. – P. 564–569.
6. Конев С.В., Волотовский И.Д. Фотобиология. – Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1979. – 384 с.
7. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 202 с.
8. Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. – Новосибирск: Наука СО, 1991. – 168 с.
9. Тохвер А.К. Фитохром, его основные формы и их свойства / Фоторегуляция метаболизма и морфогенеза растений. – М.: Наука, 1975. – С. 56–65.
10. Bugbee B. Towards an optimal spectral quality for plant growth and development: The importance of radiation capture / *Plants, Soils, and Climate Faculty Publications* (2016). URL: https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1765&context=psc_fac-pub (дата обращения: 31.08.2018).

11. Berkovich Yu.A., Konovalova I.O., Smolyanina S.O., Erokhin A.N., Avercheva O.V., Bassarskaya E.M., Kochetova G.V., Zhigalova T.V., Yakovleva O.S., Tarakanov I.G. LED crop illumination inside space greenhouses // *REACH – Reviews in Human Space Exploration*. – 2017. – Vol. 6. – P. 11–24.



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



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

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



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

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



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

Эффективные электродинамические параметры нанокompозитных сред и теория гомогенизации

Л.А. АПРЕСЯН

Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: leon_apresyan@mail.ru

Аннотация

При создании новых светотехнических и оптоэлектронных устройств в последние годы большое внимание уделяется использованию нанокompозитных сред, т.е. сред, содержащих вкрапления нанометровых масштабов, таких как наночастицы благородных металлов, квантовые точки, углеродные трубки, графены и т.д., что позволяет получить среды с новыми, ранее недостижимыми характеристиками. Исходным пунктом при описании свойств таких сред обычно является оценка их эффективных параметров (диэлектрической проницаемости, проводимости, теплопроводности и других аналогичных коэффициентов переноса) в модели макроскопически-гетерогенной среды, т.е. среды, содержащей макроскопические вкрапления с известными или определяемыми из экспериментов характеристиками. Основными приближениями, используемыми при этом, являются известные приближения Максвелла – Гарнетта и Бруггемана. В данном обзоре обсуждаются методические вопросы, связанные с различными подходами к получению этих приближений и их обобщений. Приводятся также некоторые новые результаты, связанные с оценками порогов протекания в рамках обобщённых приближений Бруггемана в случае многокомпонентных сред.

Ключевые слова: Нанокompозитные среды, эффективные параметры, квазистатическое приближение, приближение Максвелла – Гарнетта, приближение Бруггемана, порог протекания, многокомпонентные композиты.

1. Введение

Постоянное совершенствование светотехнических устройств, связанных с развитием современных технических приложений, таких как фото-

вольтаика [1, 2] и оптоэлектроника [3–6], выдвигает на первый план задачу создание новых оптических материалов с недостижимыми ранее свойствами. Эта задача решается, в частности, получением новых композитных материалов. Если говорить о чисто оптической стороне задачи, отвлекаясь от многочисленных применений композитов как силовых механических, теплопроводных и др. структур, то речь идёт прежде всего о нанокompозитах, т.е. композитах с размерами неоднородностей порядка десятков нанометров. В качестве таких включений могут служить различные углеродные структуры (нанотрубки, графены, фуллерены), квантовые точки, а также исторически давно используемые металлические наночастицы. Исследование таких объектов привело к созданию нового направления науки, объединённого под названием нанопhotоники, или иначе, наноптики [5, 6], как подраздела общей фотоники – науки о преобразовании и распространении фотонов в диапазоне от ИК до УФ.

Нанопhotоника изучает поведение света, «сжатого» до нанометровых масштабов, а также его взаимодействие с нанометровыми объектами. Оба этих направления взаимосвязаны. Первая часть ориентирована на преодоление рэлеевского предела (т.е. невозможности в обычных условиях локализации фотонов на масштабах, меньших длины волны) за счёт плазмонных эффектов в металлических наночастицах, наноразмерных апертур или острей, используемых в ближне-полевой сканирующей микроскопии. Вторая охватывает исследование как чисто квантовых особенностей взаимодействия света с одиночными нано-объектами, так и свойств ансамблей с большим числом $N \gg 1$ частиц, что характерно для случая композитных сред. Область перспективных применений нанопhotоники чрезвычайно

широка и включает как уже цитированные приложения в солнечной фотовольтаике и оптоэлектронике, так и множество других областей (светотехнику, электротехнику, биофизику и биохимию, медицину и т.д., обширные списки литературы имеются в монографиях [2–6]).

Наноразмерные частицы часто с хорошим приближением можно рассматривать как чисто классические макро-объекты, обладающие своими макро-характеристиками (диэлектрической и магнитной проницаемостью, проводимостью, теплопроводностью и т.д.), которые при необходимости «подправляются» для учёта микро-эффектов (как, например, учёт ограничения длины свободного пробега электрона размером частицы [7]). Если такие включения распределены в композите пространственно однородно, то в качестве первого шага композит можно характеризовать некоторыми усреднёнными «эффективными параметрами», которые близко связаны с конкретными измерениями и часто бывают достаточными для описания композитов, отвечающих практическим приложениям. При этом считается, что рассматриваемый объём композита при вычислении можно заменить таким же объёмом однородной среды, описываемой эффективными параметрами. Построение моделей и вычисление таких параметров называют гомогенизацией (в материаловедении вместо этого термина широко используют название «формулы смешения», «*mixing rules*» [8, 9]).

Данный обзор посвящён изложению методических вопросов построения основных моделей, используемых при гомогенизации, а также некоторых новых результатов, связанных с оценкой порогов протекания. Изложение ориентировано прежде всего на студентов и аспирантов, интересующихся получением эффективных параметров и практическим использованием методов гомогенизации. Список литературы весьма ограничен и содержит ссылки главным образом на последние монографии и обзоры, а также на некоторые поучительные классические работы, ставшие доступными в Интернете (отметим ещё полезное обсуждение аналогичных вопросов в обзорах [10, 11]). Задачи, связанные с описанием одиночных рассеивателей, с плазмоникой, квантовыми эффектами, а также с оптикой метама-

териалов [12, 13] и метаповерхностей [14], получаемых искусственным упорядочением наночастиц, ниже не рассматриваются (сошлёмся в этой связи на недавно вышедшие монографии [14–19], описывающие электродинамику наночастиц и достаточные для более глубокого изучения указанных проблем).

В разделе 2 обсуждаются методические вопросы, связанные с возможностью введения эффективных параметров (где, когда, зачем). В разделе 3 описаны подходы, используемые для получения наиболее распространённых приближений гомогенизации, а именно, приближения Максвелла – Гарнетта (*MG*) и эффективной среды Бруггемана (*Effective Medium Approximation, EMA*) в простейшей модели сферических «эффективных ячеек». Обобщения этих приближений на случай эллиптических ячеек описаны в разделах 4 и 5. В разделе 6 рассмотрены выражения для порогов протекания в обобщённых приближениях Бруггемана. В разделе 7 кратко формулируются основные выводы.

2. Общие соображения

На первый взгляд понятие «оптика композитов» обычно сразу вызывает ассоциацию с необходимостью привлечения теории многократного рассеяния, поскольку композиты по определению содержат большое число случайно распределённых рассеивающих неоднородностей. Это действительно так, если говорить о полном волновом описании задачи.

К счастью, оказывается, что во многих случаях для композитов с мелкомасштабными относительно длины волны неоднородностями достаточно хорошо работают простые эвристические модели, пригодные как для описания экспериментов, так и для создания композитов с требуемыми свойствами. Хорошие результаты могут получаться при использовании даже весьма грубых характеристик реальных композитов, таких как объёмные соотношения компонент. Однако, поскольку внутренняя структура у разных композитов при заданном объёме компонент может отличаться существенным образом, нельзя рассчитывать на получение «универсальных» зависимостей эффективных параметров от ограниченного числа характеристик композита,

одинаково пригодных для широкого круга задач. При изменении (обычно трудно контролируемых) внутренних параметров композита или же способа измерений (например, длины волны используемого излучения) могут оказаться востребованы разные модели эффективных параметров. Это объясняет широкое использование в приложениях самых разнообразных моделей гомогенизации, так что выбор модели во многом зависит от интуиции экспериментатора и качества результатов, получаемых при подгонке свободных параметров.

Возможность введения эффективных параметров не очевидна, может осуществляться далеко не во всех случаях, и зависит не только от структуры композита, но и от способа измерений (см., напр., давний обзор [20], где обсуждаются ранние и зачастую неудачные попытки заменить островные плёнки эквивалентным однородным слоем). Широкий класс, задач, для которых эффективные параметры особенно полезны, охватывается квазистатическим приближением, когда длина волны используемого излучения велика по сравнению с размерами неоднородностей композита, а измеряются не точные характеристики поля, а лишь усреднённые по пространственным масштабам, много большим размеров неоднородностей. Можно сказать, что при этом ни волна, ни наблюдатель «не замечают» мелкомасштабных флуктуаций, всегда присутствующих на масштабах порядка размеров неоднородностей среды. Строгое описание таких флуктуаций лежит за пределами теории эффективных параметров.

Для мелкомасштабных композитов имеется близкая аналогия гомогенизации с классической фундаментальной задачей статистического обоснования макроскопической электродинамики, т.е. о переходе от микро- к макро-описанию наблюдаемых величин. Действительно, этот переход подразумевает возможность использования макроскопических, т.е. усреднённых по физически бесконечно малому объёму характеристик среды для построения электродинамики макроскопических тел любой формы. Отличие состоит в том, что если в статистической физике в качестве первичных микрообъектов фигурируют атомы и молекулы, которые (за исключением случая макромолкул) не слишком сильно отли-

чаются друг от друга, то в случае композитов их заменяют макроскопические неоднородности, форма которых может случайным образом меняться в достаточно широких пределах. Другими словами, для композитов разнообразие внутренних структур гораздо шире, чем для макроскопически однородных тел, рассматриваемых обычно в статистической физике. Поэтому в определённом смысле (если отвлечься от квантовых эффектов и от различия в числе степеней свободы) строгое вычисление эффективных параметров даёт гораздо более многогранную задачу, чем вычисление макро-характеристик молекулярных объектов.

Простейший вариант композита представляет собой двухкомпонентную смесь с объёмными долями компонент f_0 и f_1 (так что $f_0 + f_1 = 1$). Для определённости будем говорить сначала о смеси двух диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями ϵ_0 и ϵ_1 , хотя аналогичные рассуждения применимы и для многих других кинетических коэффициентов – электропроводности, теплопроводности, коэффициента диффузии и т.д. [8]. По определению в каждой точке композита индукция $\mathbf{D}(\mathbf{r})$ выражается через диэлектрическую проницаемость $\epsilon(\mathbf{r})$ и напряжённость электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ как $\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \epsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})$, причём эффективная проницаемость ϵ^* определяется соотношением

$$\langle \mathbf{D}(\mathbf{r}) \rangle_V = \epsilon^* \langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle_V, \quad (1)$$

где угловые скобки означают усреднение по объёму V ,

$$\langle \cdot \rangle_V = \frac{1}{V} \int \dots dr, \quad (2)$$

а вместо точек может стоять произвольная функция \mathbf{r} . В качестве V выбирается «физически бесконечно малый объём», содержащий большое число $N \gg 1$ неоднородностей, но малый по сравнению с размерами композита. При этом предполагается, что статистическая однородность композита, а также выбор источника электромагнитного поля позволяют считать усреднённые значения $\langle \mathbf{D}(\mathbf{r}) \rangle_V$ и $\langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle_V$ постоянными, т.е. не зависящими от выбора точки \mathbf{r} .

Эффективная диэлектрическая проницаемость композита как функция

объёмных долей (для наглядности запишем её в виде $\varepsilon^*(f_0, f_1)$) должна удовлетворять очевидным «граничным условиям»

$$\varepsilon^*(1, 0) = \varepsilon_0, \quad \varepsilon^*(0, 1) = \varepsilon_1, \quad (3)$$

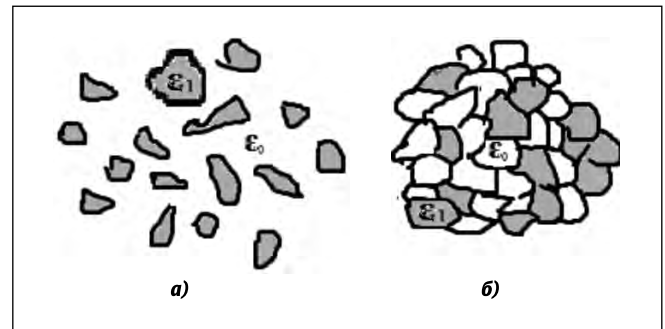
отвечающим полному заполнению среды одной из компонент. В действительности, условия (3) не являются, строго говоря, необходимыми для практической применимости различных моделей ε^* , поскольку пригодность большинства из них даже для узких классов композитов обычно ограничивается лишь некоторой областью значений f_0 и f_1 . Тем не менее, (3) выполняются во многих эмпирических и модельных приближениях для ε^* , известных в литературе (что, конечно, не должно вводить в заблуждение об их применимости при любых соотношениях f_0 и f_1). В общем случае выполнение условий (3) можно рассматривать лишь как смелую экстраполяцию рассматриваемой модели на весь диапазон концентраций f_0 и f_1 . Например, теория возмущений по концентрации одной из компонент, скажем f_1 , требует малости этой концентрации по сравнению с единицей, и естественно, непригодна при $f_1 \sim 1$, хотя вычисленная по этой теории эффективное значение ε^* иногда может применяться и при не слишком малых концентрациях f_1 .

Чтобы получить выражение, для эффективной проницаемости ε^* автоматически удовлетворяющее условиям (3), часто используют формальный трюк, идущий ещё от классических работ Максвелла [21]: подбирают из тех или иных теоретических соображений, либо чисто эмпирически функцию $F(\varepsilon(\mathbf{r}))$ таким образом, чтобы ε^* определялось из уравнения

$$F(\varepsilon^*) = \langle F(\varepsilon(\mathbf{r})) \rangle_v \equiv f_0 F(\varepsilon_0) + f_1 F(\varepsilon_1)$$

(в [22] это свойство называется аддитивностью $F(\varepsilon(\mathbf{r}))$). В этом случае при однородном заполнении композита диэлектриком с ε_0 или ε_1 флуктуации исчезают, и можно опустить символ усреднения, что сразу даёт $\varepsilon^* = \varepsilon$, если только F – однозначно обратимая функция. В литературе для разных задач рассматривались и до сих пор широко используются самые разные выборы функции $F(x)$, а именно:

Рис.1 Топология композитов: а – керметы: дискретные вкрапления в выделенную матрицу; б – агрегаты: симметричное заполнение композита без выделенной матрицы [23]



$F = x, 1/x, x^{1/3}, \log x, 1/2(x+1/x)$ и т.д. (см., напр., сводку различных приближений в [23]), отметим, что рассматриваемое ниже приближение MG также можно отнести к этому классу, если считать F зависящей от диэлектрической проницаемости матрицы).

По характеру (или точнее, топологии) пространственного строения композиты обычно разделяют на агрегаты (статистически-симметричные, типа смесей порошков), и керметы (несимметричные), в которых статистика пространственного распределения матрицы отлична от статистики наполнителей, как в случае сред со случайными вкраплениями (Рис. 1, [24]). В первом случае рассматривая лишь топологические аспекты, т.е. связность компонент композита, нельзя формально выделить матрицу и включения. Ниже мы будем описывать в основном случай керметов, или иначе, сред со случайными вкраплениями, когда статистические свойства компонент различны и из них можно выделить матрицу (для определённости первую компоненту, f_0) и вкрапления (вторую компоненту, f_1).

Наиболее распространёнными приближениями, отвечающими этим двум топологиям, являются приближения Максвелла – Гарнетта [25]¹, которое в простейшей форме часто записывается в виде уравнения

$$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon_0}{\varepsilon^* + 2\varepsilon_0} = f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0}, \quad (4)$$

и симметричное приближение эффективной среды Бруггемана [27]

$$f_0 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon^*}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon^*} + f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon^*} = 0, \quad (5)$$

(известно также другое, несимметричное приближение Бруггемана, которое мы здесь не рассматриваем).

Приближения (4) и (5) основаны на использовании модели сферической частицы. При обобщении этих соотношений на случай несферических частиц исходной обычно является модель эллипсоидов, которая также широко используется в литературе. В простейшем случае одинаковых и одинаково ориентированных (монопольных) эллипсоидов среда становится анизотропной, а соотношение (5) переходит в

$$f_0 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon^*}{\varepsilon^* + L_i(\varepsilon_0 - \varepsilon^*)} + f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{\varepsilon^* + L_i(\varepsilon_1 - \varepsilon^*)} = 0, \quad (6)$$

где L_i – фактор деполяризации вдоль рассматриваемой оси (см. ниже). Соотношение (6) справедливо для трёх ортогональных осей $i = x, y, z$, совпадающих с главными осями эллипсоида. Если в качестве L_i использовать обычные факторы деполяризации, определённые для изотропной среды, то (6) даёт три независимых уравнения для каждой из осей. Это приближение известно под названием «традиционного» [28, 29] и широко использовалось в приложениях. При более последовательном подходе [30] в качестве L_i факторы деполяризации

¹ Соотношение (4) часто называют «формулой Максвелла Гарнетта», связывая её тем самым с Дж. К.М. Гарнеттом [25], одним из имён которого было «Максвелл». Более правильным является написание «формула Максвелла — Гарнетта», учитывая тем самым основополагающий вклад Дж.К. Максвелла, получившего эквивалентный результат для проводимости задолго до Гарнетта [21] (добавление сюда имени Рэлея, также до Гарнетта получившего эту формулу вместе с поправочными членами [26], сделало бы её написание несколько громоздким, хотя и более информативным).

Рис.2. Сфера Лорентца

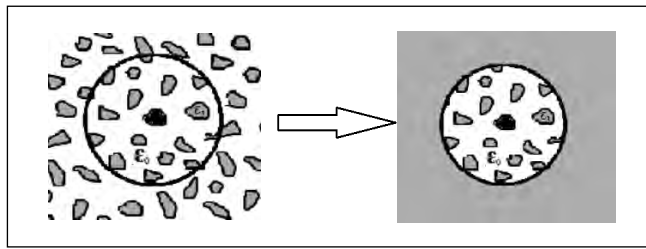
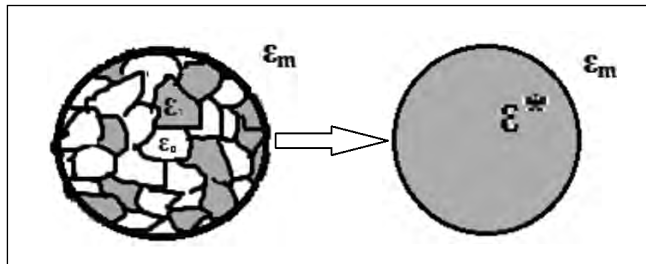


Рис.3. Метод эквивалентного рассеивателя



в анизотропной среде, которые отличаются от обычных факторов деполяризации [31], и тогда (6) оказывается более сложной системой из трёх связанных уравнений (сравнение этих подходов имеется в [29]). Успешное использование в некоторых приложениях уравнения (6) с «неправильными» факторами деполяризации не должно вызывать удивления, если учесть, что все рассматриваемые модели являются следствием сильного огрубления с использованием L_i в качестве подгоночных параметров. Заметим, что в модели хаотически ориентированных эллипсоидов среда снова становится статистически изотропной, так что даже формальная необходимость в использовании факторов деполяризации в анизотропной среде в этом случае пропадает.

Макроскопический композит является частным случаем неоднородного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon(\mathbf{r})$, представляющей собой сложную функцию пространственной координаты \mathbf{r} . Поскольку в практических ситуациях распределение $\epsilon(\mathbf{r})$ в каждой точке не измеряется, а фиксируются лишь некоторые внешние параметры (типа соотношения компонент) $\epsilon(\mathbf{r})$ и, как следствие, $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ можно рассматривать как некоторые случайные поля [32]. При этом если их пространственные корреляции достаточно быстро спадают (имеется пространственная эргодичность), то усреднение по объёму можно заменить на статистическое усреднение [32]. Замена объёмного усреднения средними по статистическому ансамблю будет использована ниже.

Уравнения (4)–(6) можно легко решить, получив явные зависимости $\epsilon^*(f_0, f_1, \epsilon_1, \epsilon_2)$, однако общепринятые формы записи (4)–(6) удобны, во-первых, для сравнения с другими вариантами этих теорий, и, во-вторых, поскольку из них с очевидностью следует выполнение в обоих приближениях граничных условий (3). Хотя формально приближение (4) выводится для случая топологии керметов, а (5) и (6) – агрегатов, оба эти приближения часто используют независимо от ожидаемой топологии композита. Рассмотрим основные подходы к получению этих приближений.

3. Способы гомогенизации

В литературе описано множество различных подходов к получению приближений (4)–(6) и их обобщений. Приведём кратко наиболее распространённые из них. Поскольку эти подходы многократно повторяются в литературе, мы не станем давать многочисленных ссылок на литературные источники (см., напр., [8–11]).

Метод сферы Лоренца наиболее распространён при получении рассматриваемых приближений. Каждый рассеиватель мысленно окружается большой сферой (рис. 2), и считается, что эффективное поле E_L вблизи него складывается из усреднённого $\langle E \rangle$ плюс поле Лоренца $\langle P \rangle / 3\epsilon_0$ (в системе СГС,

$4\pi \langle P \rangle / 3$) от лежащих вне сферы рассеивателей, которые рассматриваются как точечные диполи с поляризуемостью α_1 , «размазанные» в сплошную

среду $E_L = \langle E \rangle + \langle P \rangle / 3\epsilon_0$, где $\langle P \rangle$ – средняя поляризация. При этом поле от частиц, находящихся внутри сферы, считается в центре сферы в среднем равным нулю, что верно, конечно, далеко не во всех случаях (см., напр., обсуждение в классическом учебнике

[33]). Полагая $\langle P \rangle = n\alpha_1 E_L$, где $n = N/V$ – среднее число частиц в единице объёма, отсюда легко получить известную формулу Клаузиуса – Моссотти (называемую также формулой Лоренц – Лорентца, если её записать для коэффициента преломления $\sqrt{\epsilon^*}$ для частиц в вакууме)

$$\frac{\epsilon^* - \epsilon_0}{\epsilon^* + 2\epsilon_0} = \frac{n\alpha_1}{3\epsilon_0}. \quad (7)$$

Замена поляризуемости точечных диполей α_1 на хорошо известную поляризуемость шара объёма v_1 с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 (см., напр., [9])²,

$$\alpha_1 = 3v_1 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_0}{\epsilon_1 + 2\epsilon_0} \epsilon_0 \quad (8)$$

переводит (7) в формулу MG (4). Это же соотношение (7) часто используется для обобщения приближения MG на более сложные комплексы частиц, для чего достаточно подставить в (7) вместо $n\alpha_1$ сумму соответствующих поляризуемостей. Так, например, для набора из n_i сферических частиц с разными диэлектрическими проницаемостями ϵ_i , $i = 1, 2, \dots$, из (7) имеем

$$\frac{\epsilon^* - \epsilon_0}{\epsilon^* + 2\epsilon_0} = \sum_{i \geq 1} \frac{n_i \alpha_i}{3\epsilon_0}. \quad (9)$$

Метод эквивалентного рассеивателя берёт начало от классических исследований Максвелла [21]. Выбирается шаровой объём V композита с неоднородностями, которые трактуются как шаровые вкрапления с диэлектрической проницаемостью ϵ_i в ма-

² Заметим, что разные авторы определяют поляризуемость частицы в диэлектрической среде с ϵ_0 -разному, либо как в (6): $\alpha = P/E$ [9], либо как $P/(\epsilon_0 E)$ [7], где P – дипольный момент частицы, что не должно привести к недоразумениям.

трице ε_m , где ε_m – эвристически подобранный свободный параметр (Рис. 3). Эффективная проницаемость ε^* выбирается из требования, чтобы рассеянное поле вдали от V совпадало с рассеянным полем при однородном заполнении объема V средой с диэлектрической проницаемостью ε^* , при условии, что частицы достаточно разрежены и рассеивают независимо друг от друга. Для этого достаточно приравнять поляризуемость однородного шара сумме поляризуемостей входящих в композитный шар частиц, что даёт

$$V \frac{\varepsilon^* - \varepsilon_m}{\varepsilon^* + 2\varepsilon_m} = v_0 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_m}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon_m} + v_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m},$$

или, поскольку $f_i = v_i/V$,

$$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon_m}{\varepsilon^* + 2\varepsilon_m} = f_0 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_m}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon_m} + f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m}. \quad (10)$$

Полагая здесь $\varepsilon_m = \varepsilon_0$, получаем приближение *MG* (4), а при $\varepsilon_m = \varepsilon^*$ – приближение Бруггемана (5). Отметим, что в работе [34] рассматриваемое условие было распространено на общий случай как требование отсутствия в эффективной среде рассеяния в направлении «вперёд». Заменяя всюду сферические объекты на эллипсоиды, нетрудно получить этим же методом обобщения этих приближений на случай анизотропных частиц, а также (если такие частицы частично или полностью упорядочены) на случай анизотропных композитов.

Метод макроскопического усреднения. В этом методе производится прямое усреднение $\mathbf{D}(\mathbf{r})$ и $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ по объёму с использованием определения ε^* (1). Преимуществом этого подхода является более явное описание принимаемых приближений, что позволяет оценить, по крайней мере качественно, условия применимости окончательных результатов. Остановимся на нём подробнее, основываясь на нашей работе [35].

Рассмотрим общий случай среды со случайными (вообще говоря, неоднородными) вкраплениями (кермет), ра-

зобьём весь рассматриваемый объём V на две части, $V = V_0 + V_1$, так, что V_0

отвечает точкам \mathbf{r} матрицы, а $V_1 = \sum_{i=1}^N v_i$

точкам частиц, с объёмами v_i .

Разбивая при усреднении по объёму V полный интеграл на сумму интегралов по парциальным объёмам v_i , в соответствии с (1) нетрудно получить

$$\varepsilon^* = \frac{\langle \mathbf{D}(\mathbf{r}) \rangle_v}{\langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle_v} = \frac{f_0 \langle \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle_{v_0} + f_1 \langle \varepsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle_p}{f_0 \langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle_{v_0} + f_1 \langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle_p}. \quad (11)$$

Здесь $f_i = V_i/V$ – объёмная доля материала матрицы ($i = 0$) или частиц ($i = 1$), $f_0 + f_1 = 1$, (обоснование входящей в (9) формальной операции деления на вектор можно найти в [35]). Скобки с индексом p означают усреднение по ансамблю частиц вида

$$\langle \dots \rangle_p \equiv \sum_{i=1}^N P_i \langle \dots \rangle_{v_i}, \quad (12)$$

причём $P_i = v_i/V_1$ – доля i -ой частицы в объёме всех частиц, которую можно трактовать как условную вероятность «встретить» эту частицу среди всех

частиц, так что $\sum_{i=1}^N P_i = 1$.

Соотношение (11) формально является точным, если считать известным распределение $\varepsilon(\mathbf{r})$ и поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ в композите. Хотя в настоящее время вычислительные возможности позволяют проводить компьютерное моделирование, оценивая тем самым $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ и применимость той или иной модели [36], в большинстве практических ситуаций эти распределения можно рассматривать как случайные функции, точные значения которых не фиксируются в экспериментах. При этом для получения приближений (4)-(6), а также их обобщений достаточно использовать простые статистические гипотезы о характерной форме частиц и «характерных значениях» поля внутри и вне них. Тем самым усреднение по объёмам среды и частиц эвристически заменяется статистическим усреднением по объёмам некоторых «эффективных ячеек». Выбирая такие ячейки разной структуры и задавая распределение поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ вне и внутри

них, можно получить разные приближения для ε^* .

4. Приближение Максвелла-Гарнетта

Основное допущение, необходимое для получения из (11) приближения *MG*, состоит в том, что частицы в среднем можно рассматривать, как находящиеся в однородном внешнем поле. Для получения приближения *MG* (4) из (11) достаточно считать, что все частицы однородны, имеют одинаковую диэлектрическую проницаемость ε_1 и одинаковую сферическую форму, причём поле вне частиц принимается равным однородному полю \mathbf{E}_0 в отсутствие частиц. Вместо этого рассмотрим сразу обобщение (4) на случай хаотически ориентированных эллиптических частиц со случайным распределением факторов деполяризации L_i . Поле внутри такой частицы в однородном внешнем поле \mathbf{E}_0 оказывается также однородным и даётся известным соотношением

$$\mathbf{E}_{in} = \Lambda \mathbf{E}_0, \quad (13)$$

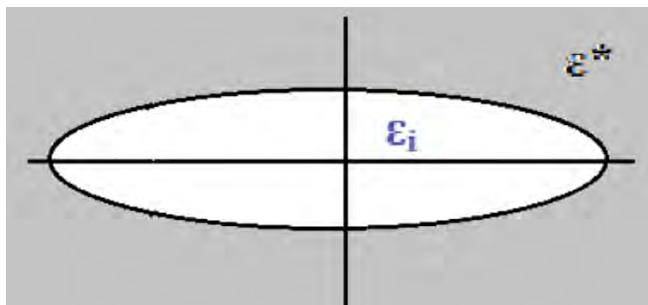
где тензор Λ выражается через диагональный в главных осях эллипсоида тензор деполяризации $L = \text{diag}(L_1, L_2, L_3)$ как

$$\Lambda = \frac{1}{1 + L \begin{pmatrix} \varepsilon_1 - 1 \\ \varepsilon_0 \end{pmatrix}}, \quad (14)$$

(здесь и ниже мы не вводим специальных обозначений для тензорных величин, считая, что их характер ясен из контекста). В (14) деление понимается в смысле обращения матрицы, а явные выражения для факторов деполяризации L_i хорошо известны³ и не выписываются (см. напр., [22], § 4; при этом в (14) 1- символы единичных матриц). С учётом (13), (11) приводится к виду

³ Тем не менее, в литературе имеются разночтения: так например, в известной монографии [7] при определении факторов деполяризации эллипсоида рассматривается поляризуемость относительно вакуума, а не относительно среды, что вынуждает помимо обычных факторов деполяризации (названных в [7] «геометрическими факторами») вводить новые факторы деполяризации, зависящие от диэлектрических проницаемостей среды и эллипсоида.

Рис. 4. «Эффективная ячейка в приближении самосогласованного поля Бруггемана: эллипсоид в эффективной среде с ε^*



$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} = 1 + \frac{f_1 \langle \alpha \rangle}{1 - f_1 \langle L \alpha \rangle}, \quad (15)$$

где

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{\varepsilon_0 v_1} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \Lambda \quad (16)$$

тензор удельной поляризуемости эллипсоида, а символ полного статистического усреднения $\langle \dots \rangle$ включает как

усреднение по ориентациям, которое сводится к вычислению 1/3 от следа тензора, так и усреднение по случайному распределению факторов деполаризации, связанных с формой частиц. Таким образом

$$\langle \dots \rangle = \frac{1}{3} \text{Sp} \Lambda \langle \dots \rangle_L \quad (17)$$

где

$$\text{Sp} \Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3, \quad \Lambda_i = (1 + L_i \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} - 1 \right))^{-1}.$$

Для выполнения усреднения по L нужно задать модель случайного распределения для факторов деполаризации L_i . Для частиц одинаковой формы с заданными L_i усреднение по L в (17) можно опустить. Мы не станем здесь останавливаться на этом подробней (см., напр., [7], разд. 12.2.5). Аналогичное (15) выражение можно получить и в случае частично упорядоченных ориентаций эллипсоидов, когда композит становится анизотропным, а ε^* тензорном.

Если частицы имеют разную природу, обладая к тому же случайными диэлектрическими проницаемостями ε_i , то усреднение по L в (17) нужно дополнить статистическим усреднением

по ε_i , что расширяет класс допустимых композитов с многокомпонентными наполнителями.

Рассматриваемый способ получения MG позволяет – по крайней мере, качественно – оценить условия применимости этого приближения. Действительно, каждая частица рассматривается (в среднем) как достаточно удалённая от соседних, что требует малости эффектов, связанных с рассеянными частицами полями, а также со «слипанием» частиц. Это ограничивает сверху относительный объём частиц f_1 (так, в [37] в качестве такого ограничения рассматривается условие $f_1 < 0.4$).

Применения приближения MG чрезвычайно широки. Отметим лишь в качестве примеров интересные оценки возможности получения композитов как с высоким [38], так и с близким к нулю [39] показателем преломления, а также антибликовых оптических композитных покрытий [40].

Поскольку в случае диэлектрической матрицы в приближении MG каждая частица считается окружённой непроводящим диэлектриком, для металлических (хорошо проводящих) частиц это приближение позволяет описать так называемый резонанс проводимости, связанный с ограниченностью движения электронов объёмом частицы [41]. Более подробное обсуждение этого вопроса можно найти, например в [37]. С другой стороны, по той же причине приближение MG не описывает возникновения порога протекания (или иначе, явления перколяции [42]), т.к. оно исключает возможность соприкосновения частиц. Это явление состоит в возникновении в указанном композите перехода диэлектрик-металл с ростом концентрации проводящей фазы f_1 не начиная от $f_1 = 0$, а лишь при достижении некоторого порогового значения f_{1c} [42]. Этот недостаток удаётся устранить в самосогласованном приближении Бругге-

мана, которое даже в простейшей форме (5) позволяет качественно описать возникновение порога протекания.

5. Приближение Бруггемана в моделях эллиптических ячеек

Для получения этого приближения из (11) достаточно принять следующую модель «эффективных ячеек»: будем считать, что как для точек среды и с ε_0 для точек среды и с ε_1 для частиц). Условие самосогласованности состоит в том, что каждая такая ячейка рассматривается помещённой в «эффективную среду» с диэлектрической проницаемостью ε^* , поле в которой считается однородным и равным среднему

полно $\langle \mathbf{E} \rangle$ (Рис.4). В простейшей моде-

ли, приводящей к (5), вместо эллипсоидов берётся сфера, для которой $L_1 = L_2 = L_3 = 1/3$.

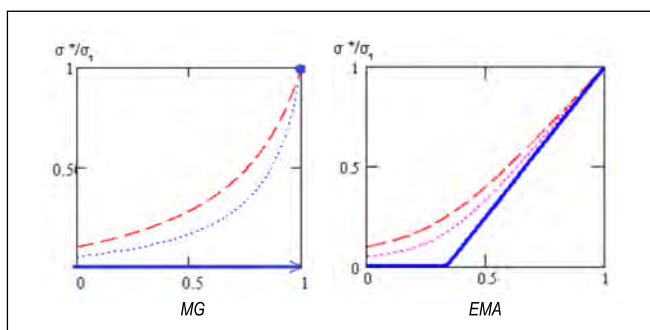
Рассмотрим более общую модель хаотически ориентированных эллипсоидов, для которой среда является статистически изотропной со скалярной эффективной диэлектрической проницаемостью ε^* . В этом приближении поле как внутри точек среды, так и внутри частиц, выражается соотношением (13), где в качестве внешнего поля \mathbf{E}_0 фигурирует сред-

нее поле $\langle \mathbf{E} \rangle$, а отвечающий эллип-

соидам тензор Λ даётся выражением (14) с разными тензорами деполаризации $L^{(0)}$ для точек среды и $L^{(1)}$ для частиц (обозначим эти тензоры как $L^{(i)}$). В этой модели «эффективных ячеек» форма эллипсоидов для точек частиц и среды могут быть различны ($L^{(0)} \neq L^{(1)}$) для точек среды и, вообще говоря, случайны.

Учёт этого различия, во-первых, позволяет ввести в модель дополнительные свободные параметры, и, во-вторых, отвечает физической интуиции. Действительно, структура «ячеек частиц» определяется выбором их характерной формы, тогда как форма «ячейки среды» связана с взаимным расположением частиц. Учитывая сказанное и используя (11), после простых преобразований получаем

Рис.5. Зависимость эффективной проводимости от фактора заполнения f_1 в приближении *MG* (4) и *EMA* (5); — $\sigma_2/\sigma_1 = 0,1$; - - $\sigma_2/\sigma_1 = 0,05$; — $\sigma_2/\sigma_1 \rightarrow 0$



$$f_0 < \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon^*} - 1 \right) \frac{1 - L^{(0)}}{1 + L^{(0)} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon^*} - 1 \right)} > +$$

$$+ f_1 < \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon^*} - 1 \right) \frac{1 - L^{(1)}}{1 + L^{(1)} \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon^*} - 1 \right)} > = 0. \quad (18)$$

Здесь статистическое усреднение по-прежнему понимается в виде (17), и при необходимости может быть дополнено усреднением по случайным диэлектрическим проницаемостям, обеспечивая описание многокомпонентных наполнителей.

Если в качестве исходного приближения взять (6), задав разные факторы деполяризации для среды и для частиц, то после усреднения имеем

$$f_0 < \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon^*} - 1 \right) \frac{1}{1 + L^{(0)} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon^*} - 1 \right)} > +$$

$$+ f_1 < \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon^*} - 1 \right) \frac{1}{1 + L^{(1)} \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon^*} - 1 \right)} > = 0. \quad (19)$$

Такая форма ЕМА широко использовалась в литературе (см., напр., [43,44])

Уравнение (18) отличается от (19) наличием в числителе у каждого слагаемого множителей $1 - L^{(i)}$. Для одинаковых и мононаправленных эллипсоидов эти общие множители можно опустить, так что (18) и (19) переходят в (6), однако в общем случае такого упрощения не происходит, так что (18) и (19) отвечают разным моделям эффективной среды.

6. Обобщённое приближение Бруггемана и порог протекания

Уравнения (18) и (19) в общем случае достаточно сложны и могут решаться численно (отметим в этой свя-

зи известную проблему выбора «правильной» ветви решения уравнения ЕМА, которое в общем случае оказывается многозначным [45]). Однако из них, не решая этих уравнений, можно сразу найти выражения для соответствующих порогов протекания. С этой целью перейдём от рассмотрения диэлектрической проницаемости ϵ к проводимости σ , для которой, как указано выше, в квазистатическом приближении все соотношения сохраняются. Для нахождения порога протекания рассмотрим случай диэлектрической матрицы $\sigma_0 = 0$ с проводящими частицами $\sigma_1 \neq 0$. Заменяя всюду ϵ на σ и полагая в (18) и (19) сначала $\sigma_0 = 0$, и затем $\sigma^* = 0$ (порядок этих подстановок важен!) нетрудно получить следующие выражения для порогового значения объёмной доли частиц: в случае (18)

$$f_{lc} = 1 / \left\langle \frac{1}{L^{(1)}} \right\rangle, \quad (18)$$

а в случае (19)

$$f_{lc}^* = \frac{1}{1 + \frac{\langle 1/L^{(1)} \rangle}{\langle 1/(1 - L^{(0)}) \rangle}}. \quad (19)$$

Мы не станем далее обсуждать эти выражения, которые для модели сферических ячеек оба сводятся к хорошо известной оценке для приближений Бруггемана (5) $f_{lc} = 1/3$. Для иллюстрации ограничимся сравнением приближений *MG* и *EMA* в простейших моделях (4) и (5). На Рис. 5 показаны зависимости эффективной проводимости σ^* в этих моделях от объёмной доли проводящей компоненты при разных отношениях σ_0/σ_1 . Из этих рисунков видно, что приближение *MG* (4) даёт зависимость σ^* , сходящуюся в пределе $\sigma_0/\sigma_1 \rightarrow 0$ к разрывной функ-

ции $\sigma^* = 0$ при $0 \leq f_1 < 1$ и $\sigma^* = 1$ при $f_1 = 1$, что отвечает отсутствию порога протекания, тогда как для ЕМА в этом пределе получаются два отрезка прямых с пороговым значением $f_{lc} = 1/3$ (Рис. 5).

7. Выводы

В данном обзоре мы кратко рассмотрели различные методические подходы к получению *MGA* и *EMA* как наиболее распространённых приближений гомогенизации, т.е. замены сильно неоднородного композита на однородную среду таким образом, чтобы сохранить неизменными измеряемые усреднённые электродинамические характеристики композита. Такая процедура даже в случае композитов с малыми в масштабе длины волны неоднородностями выполняема далеко не всегда и фактически ведёт к пренебрежению возможными сильными мелкомасштабными флуктуациями поля в композите. В силу большого разнообразия внутренних структур композитов нельзя ожидать построения формул для эффективных параметров среды, пригодных во всех случаях, что объясняет наличие в литературе большого числа разнообразных моделей. Тем не менее, *MGA* и *EMA* и их обобщения остаются базовыми приближениями при описании многих нанокompозитных сред. Мы не затрагивали в этом обзоре многих вопросов, связанных с учётом в *MGA* и *EMA* разнообразных осложняющих факторов, описание которых можно найти в цитированной литературе.

В настоящее время нанофотоника продолжает своё бурное развитие, и теория гомогенизации занимает в этом развитии полезную нишу, позволяя зачастую простыми средствами получать нетривиальные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милчико В.А., Шалин А.С., Мухин И.С., Ковров А.Э., Красилин А.А., Виноградов А.В., Белов П.А., Симовский К.Р. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития // Успехи физических наук. – 2016. – Т.186. – С. 801–852. DOI:10.3367/UFN.2016.02.037703
2. Valenta J., Mirabella S. (Eds.) Nanotechnology and Photovoltaic Devices: Light Energy Harvesting with Group IV Nanostructures. – Taylor & Francis Group, 2015. – 441p.
3. Lourtioz J.-M. et al., eds. Nanosciences and Nanotechnology: Evolution or Revolution? –

Springer, 2016.– 438p. DOI:10.1007/978-3-319-19360-1

4. *Di Bartolo B., Collins J., Silvestri L.* (eds.) Nano-Structures for Optics and Photonics: Optical Strategies for Enhancing Sensing, Imaging, Communication and Energy Conversion. – Springer, 2015.– 586p.

5. *Новотный Л., Хехт Б.* Основы нанооптики – М.: Физматлит, 2009.– 484 с.

6. *Quinten M.* Optical properties of nanoparticle systems: Mie and beyond. – Weinheim: Wiley-VCH, 2011. – 488p. DOI:10.1016/j.jqsrt.2011.10.001

7. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. 660с.

8. *Milton G.W.* The Theory of Composites. Cambridge Univ. Press, 2004. – 749p.

9. *Sihvola A.* Electromagnetic Mixing Formulas and Applications, Electromagnetic Wave Series 47, London: IEE Publishing, 1999.– 284p.

10. *Markel V.A.* Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial // J. Opt.Soc. Amer.– 2016. – A 33. – No.7. – P. 1244–1256. DOI:1084-7529/16/071244-13

11. *Markel V.A.* Maxwell Garnett approximation (advanced topics): tutorial // J. Opt.Soc. Amer.– 2016. – A 33.– № 11. – P. 2237–2255. DOI:1084-7529/16/112237-19

12. *Сарычев А.К., Шалаев В.М.* Электродинамика метаматериалов. – М.: Научный мир, 2011. – 224с.

13. *Cai W., Shalaev V.* Optical Metamaterials. Springer, 2009.– 200p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1151-3

14. *Ремнев М.А., Климов В.В.* Металлоповерхности: новый взгляд на уравнения Максвелла и новые методы управления светом // Успехи физических наук. 2018. – Т. 188. – С. 169–205.

15. *Андрианов Е.С. и др.* Квантовая нанооптика. Долгопрудный: Изд.дом «Интеллект», 2015.– 368 с.

16. *Pal R.* Electromagnetic, Mechanical, and Transport Properties of Composite Materials, 2015 – CRC Press.– 400p.

17. *Aliofkhae M., ed.,* Handbook of Nanoparticles. Springer, 2015.– 1439 p. DOI 10.1007/978-3-319-15338-4

18. *Kong E. S.W. K., ed.* Nanomaterials, polymers, and devices. Wiley, 2015.– 584p.

19. *Stenzel O.* The physics of thin films. Optical spectra. An Introduction. 2-nd Edition. Springer, 2016.– 352 p. DOI: 10.1007/978-3-319-21602-7

20. *Розенберг Г.В.* Современное состояние теории оптических свойств полупрозрачных металлических покрытий // Успехи физических наук.– 1956. –Т.58. – С. 487–518. DOI:10.3367/UFN.0058.195603d.0487

21. *Максвелл Дж.К.* Трактат об электричестве и магнетизме. Т. 1. –М.: Наука, 1989.– 415 с.

22. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. – Издание 4-е, стереотипное. – М.: Физматлит, 2003.– 656с.

23. *Taherian R.* Experimental and analytical model for the electrical conductivity of polymer-based nanocomposites // Composites Science and Technology.– 2015. DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.11.029

24. *Lamb W., Wood D.M., Ashcroft N.W.* Long-wavelength electromagnetic propagation in heterogeneous media // Phys. Rev.– 1980. – B21.– № 6. – P. 2248–2266. DOI: 10.1103/PhysRevB.21.2248

25. *Maxwell Garnet J.C.* Colours in metal glasses and in metallic films // Phil. Trans.R.Soc. London. –1904. – A203. – P. 385–420; Colours in metal glasses, in metallic films, and in metallic solutions, II., *ibid.*– 1906. – A 205. – P. 237–288.

26. *Strutt J.* (Lord Rayleigh). On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium // Phil. Mag.– 1892. – V. 34. – P. 481. DOI:10.1080/14786449208620364

27. *Bruggeman D.A.G.* Calculation of various physics constants in heterogeneous substances. I. Dielectric constants and conductivity of mixed bodies from isotropic substances // Ann. Phys.–1935.–V.23.–P.636–664. DOI:10.1002/andp.19354160705

28. *Smith G.B.* Effective medium theory and angular dispersion of optical constants in films with oblique columnar structure // Opt. Commun.– 1989. – V.71.– № 5. – P. 279–284. DOI:10.1016/0030-4018(89)90008-4

29. *Schmidt D., Schubert M.* Anisotropic Bruggeman effective medium approaches for slanted columnar thin films // J. of Applied Physics.– 2013. – V.114.– № 8.– 083510. DOI: 10.1063/1.4819240

30. *Mackay T.G., and A. Lakhtakia A.* Bruggeman formalism versus «Bruggeman formalism»: particulate composite materials comprising oriented ellipsoidal particles // J. of Nanophotonics.– 2012. – V.6.– № 1.– 0695012. DOI:10.1117/1.JNP.6.069501

31. *Апресян Л.А., Власов Д.В.* О факторах деполяризации анизотропных эллипсоидов // Журнал технической физики.– 2014. – Т. 84.– № 12. – С. 23–28.

32. *Рытов С.М., Крайцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Т. 1,2. –М.: Наука, 1978.

33. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов.– 11-е изд., испр. и доп. – М.: Физматлит, 2003.– 616 с. –ISBN5-9221-0313-X.

34. *Stroud D., Pan F.P.* Self-consistent approach to electromagnetic wave propagation in composite media: Application to model granular metals // Phys.Rev.– 1988. – B37.– № 15. – P. 8719–8724.

35. *Л.А. Апресян, Д.В. Власов, Д.А. Задорин, В.И. Красовский.* О модели эффективной среды для частиц со сложной структурой // Журнал технической физики.– 2017.–Т.87.–№ 1.–С.10–17. DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44011.1841

36. *Brosseau C.* Modelling and simulation of dielectric heterostructures: a physical survey from an historical perspective // J. Phys. D: Appl. Phys.– 2006. – V. 39. – P. 1277–1294. DOI:10.1088/0022-3727/39/7/S02

37. *Петров Ю.И.* Физика малых частиц. – М.: Наука, 1982.– 359 с.

38. *Ораевский А.Н., Проценко И.Е.* Высокий показатель преломления и другие особенности оптических свойств гетерогенных сред // Письма в ЖЭТФ.– 2000.–Т.72. – С. 641–646.

39. *Лизнев Е.О., Дорофеев А.В., Виноградов А.П.* Создание сред, имеющих близкую к нулю диэлектрическую проницаемость в широком диапазоне частот // Оптический журнал. 2010. – Т. 77. – С. 11–12.

40. *Moiseev S.G.* Composite medium with silver nanoparticles as an anti-reflection optical coating // Applied Physics A. 2011. – V.103. – P. 619–622.

41. *Marton J.P., Lemon J.R.* Optical properties of aggregated metal systems. 1. Theory // Phys.Rev.– 1971. – V.B4.– № 2. – P. 271–280.

42. *Bergman D.J., Stroud D.* Physical properties of macroscopically inhomogeneous media // Solid State Physics Phys.– 1992. – V. 46. – P. 148–269. (см. также обширный список литературы в статье «Percolation» в Wikipedia)

43. *Wang Y. and Weng G.J.* Electrical conductivity of carbon nanotube and graphen -based nanocomposites, Ch. 4 in: S.A. Meguid, G.J. Weng (eds.), Micromechanics and Nanomechanics of Composite Solids, Springer International Publishing AG 2018. DOI 10.1007/978-3-319-52794-9_4123

44. *Liang D., Schmid D., Wang H. et al.* Generalized ellipsometry effective medium approximation analysis approach for porous slanted columnar thin films infiltrated with polymer // Applied Physics Letters.– 2013. – V. 103.– № 11.– 111906 (1). DOI: 10.1063/1.4821159

45. *Виноградов А.П., Дорофеев А.В., Зухди С.* К вопросу об эффективных параметрах метаматериалов // Успехи физических наук.– 2008. – Т. 178.– № 5. – С. 511–518.



Апресян Леон Арсенович, кандидат физ.-мат. наук. Старший научный сотрудник Института Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН. Окончил МФТИ в 1972 г., защитил кандидат-

скую диссертацию в 1978. Круг интересов: статистическая радиофизика, электродинамика случайно-неоднородных сред

Метод расчёта параметров светового климата по световой эффективности солнечного излучения

А.К. СОЛОВЬЁВ, Ф.Т.Х. НГУЕН

НИУ «МГСУ», Москва

E-mail: kafedraarxitektury@yandex.ru; phuongntk@nuce.edu.vn

Аннотация

Главный источник естественного света – Солнце. Земная атмосфера рассеивает его свет благодаря воздуху, водяному пару, частичкам льда (на большой высоте), пыли, различным газам и другим загрязнителям, поступающим в воздух в результате деятельности человека. Из-за этого образуется диффузная (рассеянная) составляющая естественного освещения – основа данных для расчёта естественного освещения в зданиях, которая имеет свои характерные особенности для данной местности.

В статье приведён расчёт световой эффективности солнечного излучения во Вьетнаме. В результате получен ход горизонтальной естественной освещённости в Ханое ($21,03^\circ$ с.ш.). Его сравнение с ходом горизонтальной естественной освещённости в Москве ($55,70^\circ$ с.ш.) показывает высокий уровень и равномерность распределения наружной освещённости во Вьетнаме. Максимальные уровни диффузной и суммарной освещённости в Ханое – 45,2 и 58,52 клк, а в Москве – 28,3 и 53,1 клк соответственно. При этом уровни освещения в зимние месяцы в Ханое значительно выше, чем в Москве, что объясняется широтной разницей расположения этих городов и соответствующим движением Солнца.

Ключевые слова: световой климат местности, тропический климат, диффузная горизонтальная освещённость, суммарная горизонтальная освещённость, световая эффективность солнечного излучения, статистика облачности.

Введение:

Горизонтальная освещённость – важный показатель ресурсов светового климата каждого региона. Во Вьетнаме стандарты расчётных методов проектирования естественного освещения в зданиях ещё не доработаны, и данная работа призвана способствовать созданию таких стандартов и разработке энергоэффективных систем естественного освещения. Кроме того, она позволяет расширить данные о дневном изменении уровней освещённости для всех месяцев года в тех городах России, которые не включены в Своды Правил по естественному освещению и в другую справочную литературу.

Для производства нормирования естественного и совмещённого освещения в помещениях и проектирования зданий и сооружений используется коэффициент естественной освещённости (КЕО) – отношение естественной освещённости, создаваемой в некоторой точке заданной плоскости внутри помещения светом неба (непосредственным или после отражений), к одновременному значению наружной горизонтальной освещённости, создаваемой светом полностью открытого небосвода. Следует отметить, что понятие КЕО имеет смысл только при пас-

мурном небе с распределением яркости по небосводу, нормируемым МКО. В этом случае КЕО не зависит от ориентации окна по отношению к солнцу и для данной точки помещения – величина постоянная.

Пасмурное небо не типично для тропиков. Суммарное и прямое солнечное освещение сильно влияют на выбор системы естественного освещения в помещениях. В зависимости от архитектурного решения ограждающих конструкций с использованием солнцезащитных устройств прямые солнечные лучи дают больше или меньше отражённого света в помещении. Для оценки энергоэффективности систем естественного освещения зданий в условиях тропиков необходимо вести изучение светового климата с учётом данных о суммарной и диффузной горизонтальных освещённостях.

На сегодня долгосрочные данные натуральных измерений естественной освещённости во Вьетнаме отсутствуют. Данные о световом климате получены расчётно по световой эффективности (СЭ) солнечного излучения (СИ) по спутниковым данным об этом излучении. СЭ СИ в значительной степени зависит от текущей высоты Солнца. Прямая солнечная освещённость и СЭ прямого СИ зависят, в частности, от высоты Солнца. Суммарная (глобальная) и диффузная освещённости не имеют прямой зависимости от высоты Солнца. При этом СЭ СИ при диффузном освещении больше, чем при суммарном [1, 2].

В статьях [3, 4] представлены три метода расчёта СЭ СИ (в том числе прямой, суммарной и диффузной СЭ СИ), построенные на соответствующих математических моделях.

В рамках же данного исследования авторы выбрали модель для определения СЭ СИ, ранее разработанную во Вьетнаме [5]. При этом она использовалась ими для расчёта суточного хода диффузной и суммарной освещённостей.

Методика исследований и расчётов

Для расчёта СЭ диффузного СИ K_D и СЭ суммарного СИ K_Q (лм/Вт) были выбраны данные по погоде «ASHRAE IWEC2»¹. При преобразовании необработанной интегрированной почасовой базы данных по поверхности² в местное время программное обеспечение заполняет или уменьшает данные до почасовых временных шагов и вычисляет

¹ Временные файлы «ASHRAE IWEC2» разработаны для Американского общества инженеров по нагреванию, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE) компанией *White Box Technologies, Inc.* и основаны на интегрированной почасовой базе данных по поверхности за 3012 местоположений за пределами США и Канады, которые имеют ≥ 12 лет (но ≤ 25 лет) записи. URL: <http://weather.whiteboxtechnologies.com/IWEC2>.

² *Integrated Surface Hourly Database*

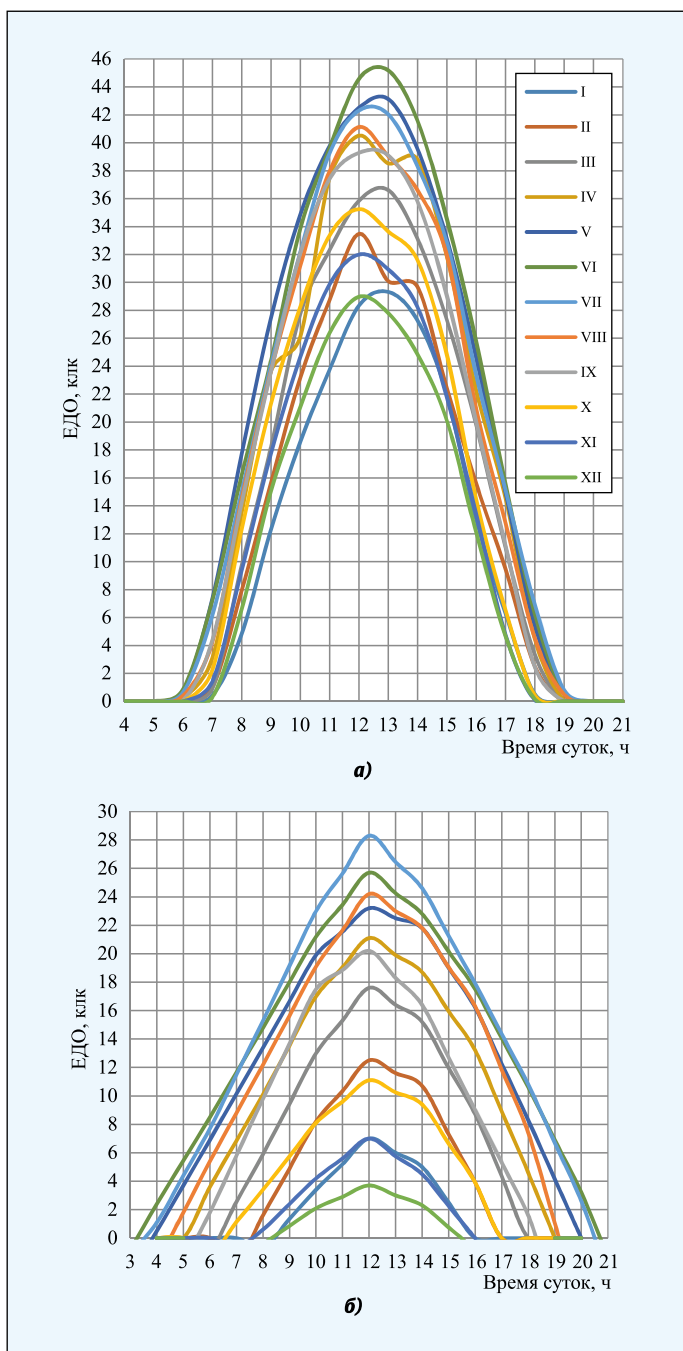


Рис. 1. Диаграммы хода естественной диффузной освещённости (ЕДО) в Ханое, 21,3° с.ш., (а), и Москве, 55,7° с.ш., (б)

уровень СИ. Данные о световом климате Ханоя накоплены за 12 лет, с 2005 до конца 2017 гг., и являются типичными. При этом выбор типичных месяцев основан не только на средних, но и на статистических распределениях по месяцам различных климатических параметров по записям долгосрочных многолетних наблюдений. Наиболее широко используемый метод выбора типичных месяцев разработан NREL³ для создания первых файлов типичного метеорологического года (ТМУ)⁴ в начале 1980-х (NCDC⁵,

³ National Renewable Energy Laboratory

⁴ Typical Meteorological Year

⁵ National Climatic Data Center

1981). Для выбора ТМУ используется статистический метод Финкельштейна-Шафера (Finkelstein-Schafer), главным показателем в котором служит величина (статистика) FS , определяемая мерой общей разницы между распределением месяца-кандидата и долгосрочным распределением в одни и те же календарные месяцы за период записи. Статистика FS оценивается по разным климатическим параметрам, которым затем присваиваются весовые коэффициенты, после чего они суммируются. Месяц с наименьшим FS считается самым представительным, «типичным месяцем».

При этом:

- положение Солнца на небосводе рассчитывается по формулам

$$h_o = \arcsin \left\{ \begin{array}{l} \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \\ \cdot \cos \varphi \cdot \cos[15^\circ \cdot (12 - T)] \end{array} \right\}, \text{град.},$$

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (d - 81) \right] \text{ или}$$

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (284 + d) \right], \text{град.},$$

где: d – порядковый номер дня года, считая от 1 января; h_o – высота солнца, град.; δ – склонение солнца в любой день года, град.; T – время, ч (например, 16 ч 15 мин = 16,25 ч); φ – географическая широта (южная – со знаком минус), град.;

- K_D и K_Q рассчитываются как

$$K_D = 0,1 \cdot h_o + 67, \text{ клк}/(\text{кал} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}^{-1}),$$

$$K_Q = 0,1 \cdot h_o + 62, \text{ клк}/(\text{кал} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}^{-1});$$

- диффузная и суммарная освещённости получаются умножением данных о диффузной солнечной радиации ($\text{кал} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}^{-1}$) на K_D и данных о суммарной солнечной радиации ($\text{кал} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}^{-1}$) на K_Q .

- по этой модели, K_D и K_Q в Ханое составляют 70 и 65 клк/(кал·см²·мин⁻¹) или 101 и 93 лм/Вт соответственно.

Обоснование полученных результатов

Из результатов расчёта хода суточных диффузной и суммарной освещённости в Ханое и Москве (сравнение по световому климату [7]) видно, что (рис. 1 и 2):

- наружная диффузная освещённость в Ханое лишь немного колеблется между летними и зимними месяцами. Максимальный уровень диффузной освещённости зимнего периода равен 29 клк (в декабре), а летнего периода – 45 клк (в июне). Высокий уровень естественной горизонтальной освещённости в Ханое равномерно распределён в пределах почти каждого месяца. Время восхода – 5 ч 15 мин (в июне) и 6 ч 35 мин (в январе), а время захода – 18 ч 39 мин (в июне) и 17 ч 08 (в декабре);

- графики хода суточной диффузной освещённости в Москве показывают большую разницу её уровней в зимний и летний периоды и малую продолжительность есте-

ственного освещения в зимний период (с 8 ч 23 мин до 15 ч 27 мин в декабре) при максимальном уровне диффузной освещённости 3,7 клк; причём самая большая продолжительность естественного освещения в летний период составляет 17 ч 30 мин (с 3 ч 15 мин до 2 ч 45 мин, в июне) при максимальном уровне диффузной освещённости 28,3 клк.

Определение ресурсов естественного освещения очень важно для определения стратегии проектирования зданий с точки зрения повышения энергоэффективности систем естественного освещения. Высокий уровень естественного освещения в Ханое с равномерным распределением его по месяцам позволяет использовать естественное освещение в этом городе круглый год. Тропический климат с большой солнечной радиацией даёт большую тепловую нагрузку на ограждающие конструкции. Поэтому использование систем естественного освещения с солнцезащитными устройствами (СЗУ) должно широко применяться для снижения нагрева помещений в летний период. При этом СЗУ ослабляют естественную освещённость в помещениях за счёт снижения прямого освещения от небосводом.

В то же время СЗУ в той или иной мере играют роль отражающих панелей, повышают уровень отражённого света в помещениях (при попадании прямого солнечного света на эти отражающие панели). В работе, выполненной в МГСУ, получены результаты натурного определения КЕО в конкретном помещении здания после установки козырьковых СЗУ которые показывают: при ясном небосводе с частичной облачностью до 2 баллов среднее значение КЕО в помещении с боковыми светопроемами равно 3,87 %, что выше среднего значения КЕО при пасмурном небосводе – 2,89 %. Это говорит о том, что при прямом солнечном освещении в тропических широтах системы естественного освещения с СЗУ более эффективны. Для оценки энергоэффективности таких систем следует проводить исследование прямого солнечного освещения фасадов при их разной ориентации и анализ влияния разных типов СЗУ в системах естественного освещения зданий.

Из рис. 1 и 2 видно, что не только в Ханое, но и в Москве учёт суммарного естественного освещения помещений при наличии СЗУ и других устройств, исключающих попадание прямого излучения Солнца в помещения, мог бы значительно повысить энергоэффективность систем естественного освещения зданий без нарушения комфортности их внутренней среды.

Заключение

Изучение и анализ данных о погоде последних лет позволяют оценивать световой климат местности и получать материалы для дальнейших исследований естественному освещению в строительстве. При анализе результатов обзора по естественной горизонтальной освещённости в Ханое и Москве получены данные по ресурсам светового климата. Они показывают равномерность распределения освещённости в Ханое по месяцам и его неравномерность в Москве. При этом даже в световом климате Москвы учёт суммарной естественной освещённости при наличии СЗУ позволяет правильно оценивать энергоэффективность систем естественного освещения, которая фактически заметно выше рассчитываемой с до-

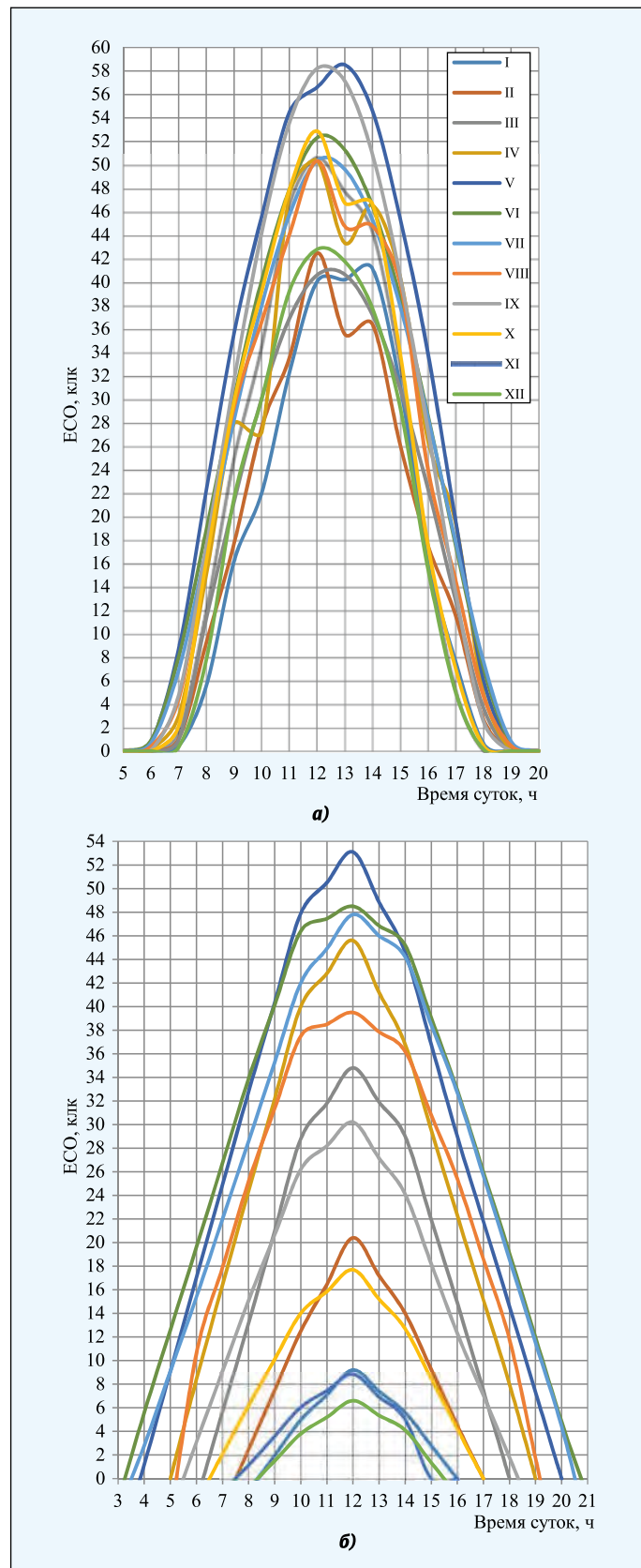


Рис. 2. Диаграммы хода естественной суммарной освещённости (ECO) в Ханое, 21,3° с.ш., (а), и Москве, 55,7° с.ш., (б)

пущением о пасмурном небосводе МКО. Это позволяет считать естественное освещение зданий перспективным направлением повышения энергоэффективности зданий, особенно в тропических условиях Вьетнама, где следует

широко использовать разные типы СЗУ. Это позволит не только снизить расход электроэнергии на освещение, но и значительно, снизив тепловую нагрузку в помещениях, на кондиционирование воздуха.

Представленная методика позволяет: рассчитывать изменения диффузной и суммарной освещённости во всех городах Вьетнама и России; уточнять светоклиматические коэффициенты и переходить к территориальным нормам естественного освещения на современном уровне. Для определения погрешности результатов расчётов будут проведены специальные натурные измерения естественной горизонтальной освещённости на местах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kittler R., Kocifaj M., Darula S. Daylight Science and Daylight Technology. – New York: Springer, 2012.
2. Navvab M., Karayel M., Ne'eman E., Selkowitz S. Analysis of luminous efficacy for daylight calculations / Proc. Int. daylighting conf., 4–7.11.1986, Long Beach, California, USA. – ASHRAE Publications Sales.
3. Fabian M., Uetani Y., Darula S. Monthly luminous efficacy models and illuminance prediction using ground measured and satellite data // Solar Energy. – 2018. – Vol. 162. – P. 95–108.
4. Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance // Solar Energy. – 1990. – Vol. 44, No. 5. – P. 271–289.
5. Зан Н.Ш., Муон Н.В., Данг Ф.Н., Нгуен Ф.Д. Световой климатический справочник местности во Вьетнаме. – Ханой: Научно-техническое издательство, 1991 (на вьетн. яз.).
6. Huang J. ASHRAE Research Project RP-1477 «Development of 3,012 typical year weather files for international locations». – Morgan, California (USA): White Box Technologies, October 19, 2011.
7. Соловьёв А.К. Физика среды. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008.
8. Данг Ф.Н. Строительная физика. 1 – Тепло и климатические факторы. – Ханой: Наука и техника, 1981 (на вьетн. яз.).
9. Сало Мохамед Али Повышение эффективности систем естественного освещения в производственных зданиях Сирии: На примере предприятий пищевой промышленности / Автореф. дис. ... к-та техн. наук. – М.: МГСУ, 2005.



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



Нгуен Тхи Хань Фыонг, архитектор. В 2008 г. окончила Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ) и в 2017 г. – аспирантуру кафедры «Проектирование зданий и сооружений» НИУ «МГСУ»

Компания Signify расширяет экосистему «Hue» с новыми партнёрами-производителями светильников и систем управления

Когда-то пространство «Hue» состояло из одного устройства с СД-лампой со встроенным беспроводным средством ZigBee-связи и небольшим набором программных средств для управления лампами. Сегодня компания Signify (в прошлом Philips Lighting) имеет обширную экосистему, поддерживающую связанную с ней СД-платформу. Недавно Signify объявила о шести новых партнёрах «Hue», которые охватывают рынок от переключателей и устройств управления до светильников.

Конечно, Signify расширяет и свой собственный портфель совместимой с «Hue» продукции. Всего несколько дней назад эта компания добавила в него серию впечатляющих светильников с СД с меняющейся цветностью излучения, предназначенных для использования в разных точках дома. Эти изделия предназначены для оживления обстановки интерактивным освещением или оптимизации среды в нескольких комнатах типичного дома.



И всё же именно экосистема может оказаться наиболее важной для Signify и других компаний, помогающих ей сформировать портфель «Hue». Компания Philips Lighting ещё в 2013 г. запустила так называемую программу «Друзья «Hue»» (Friends of «Hue»). Первоначально это название объединяло изделия, которые работали с исходной лампой «Hue» с использованием ZigBee, причём первые подобные изделия были разработаны самой компанией Philips. В 2015 г. производить совместимые с «Hue» светильники с СД начали и другие светотехнические компании.

Последние пополнения «Друзей «Hue»» – два производителя управляющих устройств и четыре производителя светильников. Компании Busch-Jaeger (Германия) и Illumra (США) будут поставлять беспроводные настенные выключатели, позволяющие пользователям включать/выключать свет, регулировать уровень освещения и выбирать предустановленные варианты. Выключатели будут иметь разные цвета и стили и использовать технологию аккумуляции энергии «EnOcean», позволяющую отказаться от использования батареек.

Что касается светильников, то к «Друзьям «Hue»» присоединились компании Kichler (США), Makris by Imoon (Италия), Koizum (Япония) и John Lewi (Великобритания).

Конечно, остаётся неясным вопрос, насколько обширным будет соответствующий сегмент осветительной техники. Этот вопрос был изучен компанией Strategies Unlimited, директор по науке которой Филип Смоллвуд отметил, что, если говорить о светильниках, то, по его мнению, в 2022 г. доход от их продаж составит \$4 млрд. Может быть это и довольно большая цифра, но она составляет лишь малую часть от предполагаемого \$70-миллиардного рынка светильников. Гораздо подробнее это описано в отчёте компании Strategies Unlimited «Global luminaires – Market analysis and forecast».

ledsmagazine.com/
30.08.2018

Оценка жизненного цикла светильников для турецких дорог классов *M1* и *M2* по освещению¹

Р. АЯЗ^{1,3}, А.К. ОЗКАНЛИ¹, И. НАКИР¹, П. БХУСАЛ², А. УНАЛ¹

¹ Технический университет Илдиз, Стамбул, Турция

² Университет Аалто, Эспо, Финляндия

³ E-mail: ayaz@yildiz.edu.tr

Аннотация

В статье описаны исследование и сравнение фотометрических характеристик и затрат жизненного цикла светильников со светодиодами (СД) и традиционных светильников с натриевыми лампами высокого давления (НЛВД) и металлогалогенными лампами (МГЛ). Измерения фотометрических характеристик ламп и светильников выполнялись в светотехнической лаборатории Технического университета Илдиз, Турция. Эксплуатационные требования к светильникам устанавливались согласно стандартам Международной комиссии по освещению. Светильники с СД, НЛВД и МГЛ, которые по своим характеристикам подходят для дорог классов *M1* и *M2* по освещению (далее – классы), сравнивались с точки зрения соответствующих им затрат. В данном исследовании был использован метод оценки затрат жизненного цикла (ОЗЖЦ), учитывающий капитальные затраты, стоимость электроэнергии и стоимость технического обслуживания. Результаты ОЗЖЦ показали, что для дорог класса *M2* экономическая эффективность светильников с СД почти совпадает с экономической эффективностью светильников с НЛВД, и что для дорог класса *M1* в случае светильников с СД полные затраты оказались примерно на 11,5 % ниже, чем в случае светильников с НЛВД.

Ключевые слова: освещение дорог, светильник с СД, энергоэффективность, затраты жизненного цикла.

1. Введение

Начиная с кризиса 1970-х, серьёзную обеспокоенность во всём мире вызывали связанные с ростом энергопотребления проблемы воздействия на окружающую среду и энергетической безопасности. В мировом масштабе, на освещение расходуется примерно 19 % от общего количества вырабатываемой энергии [1]. И согласно оценкам, примерно 3–4 % от всей вырабатываемой электроэнергии расходуется на освещение дорог [2]. Так как освещение является крупным мировым потребителем энергии, то улучшение энергоэффективности в этой области может привести к существенному снижению потребления энергии в целом [2].

В энергоэффективное освещение вкладываются значительные средства в целях уменьшения затрат на энергию и выбросов CO_2 . Замена традиционного освещения на энергоэффективное светодиодное освещение может сократить выбросы парниковых газов на 670 Мт в год и на 50–70 % уменьшить затраты на энергию [3]. Многочисленные исследования показали, что при использовании

современного осветительного оборудования проекты по прямой замене источников света на светодиоды (СД) могут уменьшить затраты на энергию на вплоть до 50 % [4, 5].

В случае освещения дорог, СД источники света служат хорошей альтернативой традиционным источникам света, что обусловлено их цветовыми характеристиками, равномерным распределением света, более хорошей работе в условиях сумеречного зрения, управляемостью и небольшим вредным воздействием на окружающую среду [6, 7]. Кроме того, они позволяют управлять уровнем освещённости в соответствии с коэффициентом отражения дорожного покрытия, интенсивностью движения и погодными условиями, с тем, чтобы уменьшить энергопотребление без ущерба для срока службы светильника [8, 9]. По оценкам, благодаря более низкому энергопотреблению, воздействию, оказываемое светильниками с СД на окружающую среду (например, закисление среды, изменение климата, эвтрофикация, вредное воздействие на людей) в расчёте на 1 км освещаемой дороги, к 2020 г. будет на 41 % меньше, чем при использовании светильников с натриевыми лампами высокого давления (НЛВД) [10].

Метод оценки затрат жизненного цикла (ОЗЖЦ) можно использовать для выявления лучшего варианта капиталовложений. Этот метод позволяет определить выгодность вложений в освещение дорог [11, 12]. ОЗЖЦ подходит для выявления самой дешёвой из рассматриваемых осветительных установок (ОУ) и анализа выгоды планируемых капиталовложений. Были проведены многочисленные ОЗЖЦ применительно к традиционным светильникам [3, 14]. Уменьшения затрат жизненного цикла можно добиться за счёт использования более долговечных изделий с низким энергопотреблением (высокой световой отдачей) и малой закупочной ценой [15]. Проведённая в [14] ОЗЖЦ охватывала несколько сценариев, основанных на предполагаемых средней стоимости электроэнергии и световой отдаче светильников с СД и возможном снижении срока окупаемости таких светильников в ближайшие годы. Результаты исследований светильников с СД, используемых на турецких дорогах класса *M3*, показали, что светильники с СД способны обеспечить удовлетворения требований к качеству освещения таких дорог и сопоставимы с традиционными светильниками [13]. Кроме того, в некоторых исследованиях оценки жизненного цикла использовались для определения влияния дорожных светильников и ОУ на окружающую среду [10, 16].

В данной работе все образцы светильников сначала исследовались на предмет удовлетворения требований к освещению дорог. Затем предназначенные для дорог классов *M1* и *M2* по освещению (далее – классы *M1*, *M2*) традиционные светильники и светильники с СД сравнивали с точки зрения затрат жизненного цикла. В публикациях

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

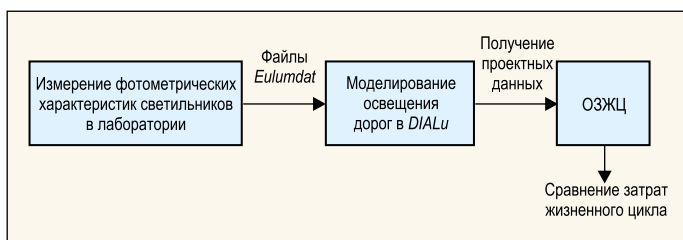


Рис. 1. Блок-схема методики

Международной комиссии по освещению (МКО) дороги подразделяются на классы в соответствии со скоростью и интенсивностью движения, погодой, составом транспорта, плотностью перекрёстков, разделением полос, наличием припаркованных автомобилей, яркостью окружающей среды и наличием визуальных указателей [17]. Метод ОЗЖЦ охватывает стоимости изготовления и технического обслуживания ОУ, стоимости замены светильников и потребляемой энергии, а также ликвидационную стоимость светильников.

2. Методика исследований и получение проектных данных

В этом разделённом на три этапа исследовании использовались разные методы, позволяющие выявить светильники, наиболее подходящие для дорог классов *M1* и *M2* с точки зрения реализуемых в турецких условиях затрат жизненного цикла. Блок-схема методики приведена на рис. 1.

Вначале у шести производителей (*L1*, *L2*, *L3*, *L4*, *L5* и *L6*) были закуплены дорожные светильники с НЛВД, металлогалогенными лампами (МГЛ) и СД, а именно, шесть традиционных светильников от трёх производителей и шесть светильников с СД. В традиционных светильниках в качестве источников света выступали НЛВД (*150 W Philips SON-T* и *250 W Philips SON-T*) и МГЛ (*150 W Sylvania CMI* и *250 W Philips HPI-T*). Мощности светильников с СД лежали в диапазоне от 80 до 170 Вт. Фотометрические характеристики этих двенадцати светильников были измерены в фотометрической лаборатории Университета Илдиз, Турция, при помощи интегрирующей сферы и гониофотометра. Измеренные характеристики включали в себя световой поток, распределение силы света, максимальную силу света, максимальный угол излучения, световую отдачу, мощность, коэффициент мощности, общий индекс цветопередачи МКО (ИЦП) и коррелированную цветовую температуру (КЦТ).

На втором этапе результаты измерений были сохранены в виде файлов *EULUMDAT* и перенесены в пакет программ для расчёта и проектирования освещения *DIALux*. Модели дорог были сформированы применительно к классам *M1* и *M2* и оптимизированы для получения наиболее подходящего проекта дороги. Для проведения ОЗЖЦ были отобраны светильники с НЛВД, МГЛ и СД, обеспечивающие выполнение требований к освещению дорог.

И наконец, результаты проектных расчётов были использованы при проведении анализа затрат жизненного цикла применительно к светильникам с НЛВД и МГЛ. Дальнейшее сравнение затрат жизненного цикла было проведено для тех светильников с НЛВД (*150 W L3* в случае *M2* и *250 W L3* в случае *M1*) и МГЛ (*150 W L3* в случае *M2*

и *250 W L1* в случае *M1*), у которых затраты жизненного цикла оказались наименьшими, и всех светильников с СД. Капитальные затраты, затраты на техническое обслуживание и стоимость электроэнергии рассчитывались с использованием действующих в Турции цен. Сроки службы светильников с НЛВД и МГЛ заканчивались к моменту завершения проекта (примерно 30 лет), так что их ликвидационная стоимость в этом исследовании не учитывалась. В то же время, ликвидационная стоимость светильников с СД учитывалась, в связи с тем, что часть их срока службы оставалась нереализованной.

2.1. Измерительное оборудование и результаты фотометрических измерений

НЛВД и МГЛ сначала измерили в интегрирующей сфере компании *Everfine Photo-E-Info Co., Ltd.* Перед началом испытаний лампы отжигали в течение 100 ч [18]. Лампы измеряли при работе с установленными в светильниках пускорегулирующими аппаратами (ПРА) и зажигающими устройствами для определения их световых потоков, КЦТ и ИЦП. КЦТ НЛВД и МГЛ лежали, соответственно, в интервалах от 2039 до 2083 К и от 4062 до 4127 К, а их ИЦП – соответственно, в интервалах от 28,7 до 29,6 и от 62,3 до 65,1. Значения КЦТ и ИЦП светильников с СД лежали, соответственно, в интервалах от 4000 до 4500 К и от 70 до 80. После измерения в сфере световых потоков ламп, при помощи гониофотометра компании *Everfine Photo-E-Info Co., Ltd.* были измерены распределения силы света, световые потоки и световые отдачи светильников.

СД источники света были встроены в светильники с СД, которые не содержали заменяемые СД модули. Поэтому измерения характеристик светильников с СД производились только в гониофотометре. Кроме того, испытания светильников с СД производились без отжига. Следует отметить, что световые потоки некоторых СД могут слегка возрастать на протяжении первых 1000 ч работы, хотя многие СД источники света подобное поведение не демонстрируют [19]. Температура и влажность в лаборатории поддерживались при помощи кондиционера равными 25 ± 1 °С и 65 % соответственно. Силу света светильников измеряли с шагом 5° в интервале 0–355°, в результате чего количество плоскостей *S* оказалось равным 72, а применительно к углу γ измерения проводились с шагом 1° в интервале 0–90° в каждой из плоскостей *S*. Результаты фотометрических и электрических измерений образцов светильников представлены в табл. 1 и 2.

Как следует из табл. 1, примерно 67 % традиционных светильников имеют коэффициенты мощности, превышающие 0,90, тогда как световые отдачи этих светильников изменяются от 55,3 до 94,1 лм/Вт.

Как следует из табл. 2, измеренные значения мощности светильников с СД почти совпадают с номинальными, а коэффициенты мощности светильников с СД лучше, чем у традиционных светильников. Световые отдачи светильников с СД изменяются от 78,8 до 122,3 лм/Вт.

2.2. Проектные расчёты с использованием программы *DIALux*

Выбранные светильники имеют разные распределения силы света, которые следует учитывать при проектирова-

Фотометрические и электрические характеристики традиционных светильников

№	Наименование светильника*	Потребляемая мощность, Вт**	Коэффициент мощности	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	Макс. угол излучения (С, λ), град	Тип кривой силы света светильника
1	150W HPS L1	166,0	0,939	13,087,4	78,8	5, 24	Ограниченная
2	150W HPS L2	174,9	0,951	13,824,1	79,0	320, 18	Неограниченная
3	150W HPS L3	148,6	0,930	12,579,0	84,7	145, 19	Полуограниченная
4	150W MH L1	163,5	0,939	9,554,9	58,4	180, 58	Ограниченная
5	150W MH L2	169,7	0,942	9,392,9	55,3	185, 67	Неограниченная
6	150W MH L3	148,8	0,931	9,398,2	63,1	10, 64	Полуограниченная
7	250W HPS L1	278,6	0,772	26,227,4	94,1	15, 31	Ограниченная
8	250W HPS L2	263,7	0,950	23,224,1	88,1	345, 48	Ограниченная
9	250W HPS L3	234,5	0,951	21,524,7	91,8	200, 14	Полуограниченная
10	250W MH L1	296,1	0,641	20,966,8	70,8	155, 25	Полуограниченная
11	250W MH L2	277,6	0,858	18,132,8	65,3	355, 64	Ограниченная
12	250W MH L3	263,2	0,844	17,784,4	67,6	350, 66	Неограниченная

* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, L1, L2, L3, L4, L5, L6 – наименования производителей дорожных светильников

** Включая потери в пускорегулирующем аппарате

нии для удовлетворения требований к освещению дорог [20]. Результаты проектных расчётов, такие как расстояние между опорами, монтажная высота, угол наклона светильника и размер консоли, зависят от используемых светильников. Проект освещения дороги следует оптимизировать применительно к максимально возможному расстоянию между опорами.

С учётом минимальных требований к освещению дорог, для дорог классов M1 и M2 при помощи программы DIALux были рассчитаны максимальные расстояния между опорами. Остальные проектные параметры, такие как монтажная высота, размер консоли и угол наклона светильника, были определены исходя из эксплуатационных требований.

2.2.1. Проект освещения для дороги класса M2

Моделирование дороги было произведено для оценки качества освещения при использовании разных светильников. В целом, светильники с НЛВД и МГЛ мощностью 150 Вт используются для дорог классов M2 и M3 [21]. В рамках этой работы для дороги класса M2 использовались изготовленные тремя разными производителями (L1,

L2 и L3) светильники с НЛВД и МГЛ мощностью 150 Вт и изготовленные тремя разными производителями (L1, L4 и L5) светильники с СД мощностью от 80 до 114 Вт. Геометрия и модель освещения рассматривавшейся дороги класса M2 приведены на рис. 2 слева.

Смоделированная дорога включает в себя четыре полосы шириной 3,5 м каждая. Дорога освещается светильниками, расположенными напротив друг друга (двухрядная прямоугольная схема). Оценку освещения этой дороги производили применительно к дорожной обстановке A1, когда типичная скорость автотранспорта превышает 60 км/ч. Дорожное покрытие относится к типу R3, а коэффициент технического обслуживания считался равным 0,89 [22].

2.2.2. Проект освещения для дороги класса M1

На дорогах классов M1 и M2 обычно используются светильники с НЛВД и МГЛ мощностью 250 Вт. В рамках этой работы была выбрана дорога класса M1 с тремя полосами шириной 3,5 м в каждом направлении. Проектирование освещения осуществлялось для дорожной обстановки A1 применительно двухрядной осевой схеме освещения. Дорожное покрытие относится к типу R3, а коэффициент технического обслуживания считался равным 0,89. Геометрия и модель освещения этой дороги класса M1 приведены на рис. 2 справа.

Моделирование осуществлялось с использованием изготовленных тремя разными производителями (L1, L2 и L3) светильников с НЛВД и МГЛ

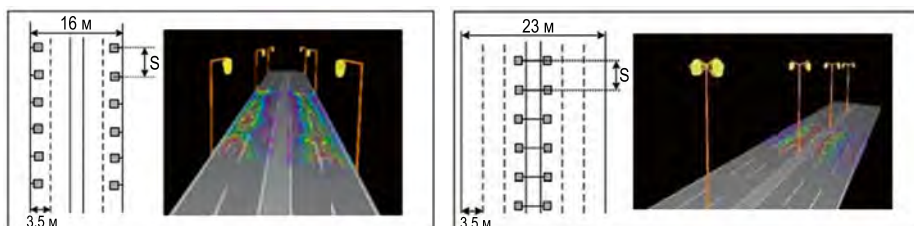


Рис. 2. Геометрии дорог классов M2 (слева) и M1 (справа)

Фотометрические и электрические характеристики светильников с СД

№	Наименование светильника*	Потребляемая мощность, Вт**	Коэффициент мощности	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	Макс. угол излучения (С, λ), град	Тип кривой силы света светильника
1	80W LED L1	79,35	0,984	7,392,5	93,1	180, 63	Ограниченная
2	80W LED L4	79,9	0,934	8,654,0	108,3	45, 49	Полуограниченная
3	105W LED L4	105,3	0,964	11,503,0	109,2	135, 50	Полуограниченная
4	114W LED L5	112,6	0,980	8,869,5	78,8	160, 60	Полуограниченная
5	170W LED L3	163,6	0,972	15,331,0	93,7	15, 61	Ограниченная
6	153W LED L6	152,5	0,987	18,656,85	122,3	155, 67	Неограниченная

* LED – светодиод, L1, L3, L4, L5 – наименования производителей дорожных светильников

** Включая потери в устройстве управления

мощностью 250 Вт и изготовленных двумя разными производителями (L3 и L6) светильников с СД.

2.2.3. Результаты проектных расчётов освещения дорог

Расчёты для дорог классов M1 и M2 производились при помощи программы *DIALux*. Из-за создаваемой светильниками блёскости, пороговое приращение яркости в случае светильника 150 W L2² не удовлетворяло требованиям для дорог класса M2 (≤ 10).

Светильнику L1 соответствовал наибольший шаг между опорами (36 м), а установленная мощность в этом случае оказалась равной 9296 Вт/км. Светильники L3 HPS потребляют 8619 Вт/км при шаге между опорами 35 м. При этом количество приходящихся на 1 км дороги светильников L1 меньше, чем количество светильников L3, так что в первом случае капитальные затраты и затраты на техническое обслуживание также будут меньше. С другой стороны, приходящаяся на 1 км дороги стоимость электроэнергии в случае светильника L3 будет меньше, чем в случае светильника L1. Поэтому для выбора наиболее экономически эффективного светильника полные затраты при использовании светильников L1 и L3 (с НЛВД и МГЛ соответственно) следует определять на основе ОЗЖЦ.

С точки зрения приходящегося на 1 км дороги потребления энергии, наиболее предпочтительными являются светильники с СД. Однако сравнение традиционных светильников и светильников с СД следует производить с учётом капитальных затрат и затрат на техническое обслуживание.

3. Оценка затрат жизненного цикла (ОЗЖЦ)

ОЗЖЦ осуществляется применительно ко всему проектному сроку службы ОУ и учитывает как затраты на изготовление, техническое обслуживание, замену и эксплуатацию изделий, так и их ликвидационную стоимость. Для определения текущей стоимости капиталовложений используется чистая приведённая стоимость (ЧПС), так что при ОЗЖЦ все затраты приводятся к текущим ценам.

² Здесь и далее светильники обозначаются в соответствии со вторыми столбцами табл. 1–6. – Прим. пер.

Уравнение (1), используемое в данной работе для определения ЧПС, записано с учётом как инфляции, так и размера процентной ставки:

$$ЧПС = \sum_{k=1}^{30} A * \frac{(1+e)^k}{(1+i)^k}, \quad (1)$$

где A – текущая стоимость, e – уровень инфляции, i – размер процентной ставки, k – годы.

В первую очередь, методом ОЗЖЦ было проведено сравнение традиционных светильников между собой, и на основе полученных результатов были отобраны светильники с НЛВД и МГЛ, которым соответствуют минимальные полные затраты жизненного цикла, а именно, светильники с НЛВД 150W HPS L3 и 250W HPS L3 и светильники с МГЛ 150W MH L3 и 250W MH L1. Что касается светильников с СД, то ОЗЖЦ производилась применительно ко всем таким светильникам. Характеристики соответствующих ОУ для дорог классов M1 и M2 приведены в табл. 3 и 4. ОЗЖЦ включает в себя затраты на ОУ на всём протяжении её проектного срока службы (для дорожного освещения это обычно 30 лет) [14]. Так что при проведении анализа проектный срок службы принимался равным 30-ти годам при равной 3650 ч годовой продолжительности работы ОУ. Экономические сроки службы традиционных светильников составляют 30 лет, в течение которых эти светильники не заменяют на новые. Так что цикл замены совпадает с циклом замены ламп в случае традиционных светильников и с циклом замены светильников в случае светильников с СД.

При этом, так как светильники с СД рассматриваются как единое целое (включая СД модуль, устройство управления, линзы и т.д.), то срок службы светильника с СД определяется исходя из сроков службы его компонентов. Срок службы устройства управления меньше, чем срок службы СД источника света [23], и 90 % отказов устройств с СД связаны с устройствами управления [23]. В настоящее время нет стандартов на заменяемые детали светильников с СД. Производители светильников постоянно отмечают, что светотехнической промышленности следует усовершенствовать стандартизированные устройства

Характеристики, использовавшиеся при ОЗЖЦ для дороги класса М2

№	Наименование светильника*	Кол-во светильников, шт./км	Кол-во опор, шт./км	Срок службы лампы, ч	Периодичность замены, лет	Стоимость светильника, ТЛ/шт.	Стоимость лампы, ТЛ/шт.
1	150W HPS L3	58	58	20000	5	140,00	33,00
2	150W MH L3	72	72	12000	3	140,00	33,00
3	80W LED L1	74	74	50000	13	420,00	-
4	80W LED L4	74	74	50000	13	470,00	-
5	105W LED L4	64	64	50000	13	530,00	-
6	114W LED L5	64	64	50000	13	630,00	-

* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, LED – светодиод, L1, L3, L4, L5 – наименования производителей дорожных светильников

управления, предназначенные для СД освещения [23]. Если в случае освещения дорог имеет место отказ отдельного светильника, то его замена и техническое обслуживание оказываются более дорогостоящими, и города стараются этого избежать [24]. Для осуществления более экономичного и практически целесообразного технического обслуживания, в установках уличного освещения производится групповая, а не точечная замена ламп. В рамках этого исследования, компоненты светильников с СД (такие как устройство управления и СД модуль (источник света)) в рассматриваемый период времени не заменяют, и схема замены СД светильников предусматривает замену всего светильника в целом после его использования в течение предполагаемого срока службы.

В соответствии с ОЗЖЦ, полные затраты получают после вычета ликвидационной стоимости (SV) из суммы капитальных затрат (IC), стоимости электроэнергии (EC) и затрат на техническое обслуживание (MC) [11]. Расчёт затрат производился применительно к 1 км дороги по приведённым ниже формулам.

$$TC = IC + MC + EC - SV, \quad (2)$$

$$IC = N * (N_p + N_{mp}) + L * (L_p + L_{mp}) + P * (P_p + P_{mp}) + C * (C_p + C_{mp}) + YC * (YC_p + YC_{mp}), \quad (3)$$

$$MC = L * (L_p + L_{mp}) + (S_n * S_p + F_p) * N / (S * t_d), \quad (4)$$

$$EC = N * P_i * 365 * E_p * 10^{-3} * t_o, \quad (5)$$

где N – количество светильников, N_p – стоимость одного светильника, N_{mp} – стоимость установки светильника, L – количество ламп, L_p – стоимость одной лампы, L_{mp} – стоимость установки лампы, P – количество опор, P_p – стоимость одной опоры, P_{mp} – стоимость установки опоры, C –

длина воздушного кабеля, C_p – стоимость единицы длины воздушного кабеля, C_{mp} – стоимость прокладки единицы длины воздушного кабеля, YC – длина подземного кабеля, YC_p – стоимость единицы длины подземного кабеля, YC_{mp} – стоимость прокладки единицы длины подземного кабеля, S – количество светильников, техническое обслуживание которых производится в течение 1 ч, S_n – количество персонала, осуществляющего техническое обслуживание, S_p – суточные затраты на обслуживающий персонал, F_p – стоимость горючего для одного автомобиля в сутки; t_d – количество рабочих часов в сутки, P_i – мощность светильника, E_p – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, t_o – суточная продолжительность работы светильника.

При этом ликвидационная стоимость рассчитывалась применительно к незадействованной части экономического срока службы светильника, так что, другими словами, ликвидационную стоимость имеют только те светильники с СД, которые заменяются по окончании проектного срока службы ОУ. В Турции утилизация светильников и их компонентов осуществляется муниципалитетами бесплатно, поэтому затраты на утилизации при ОЗЖЦ в данном исследовании не учитывались.

Расчёт затрат на техническое обслуживание, стоимости электроэнергии и ликвидационной стоимости производился методом ЧПС [13]. Стоимость технического обслуживания рассчитывалась для каждого периода между заменами в отдельности, а затем методом ЧПС определялась полная стоимость технического обслуживания. В случае традиционных светильников в уравнение (4) была включена стоимость замены электромагнитного ПРА. Текущая полная стоимость электроэнергии на протяжении проектного срока службы рассчитывалась по формуле [25, 26]:

Полная текущая стоимость электроэнергии =

$$= EC * (1 + e) * \frac{1 - \left(\frac{1 + e}{1 + i}\right)^{30}}{i - e}, \quad (6)$$

В этом исследовании все расчёты производились в турецких лирах (ТЛ). В отличие от европейских стран, в Тур-

Характеристики, использовавшиеся при ОЗЖЦ для дороги класса М1

№	Наименование светильника*	Кол-во светильников, шт./км	Кол-во опор, шт./км	Срок службы лампы, ч	Периодичность замены, лет	Стоимость светильника, ТЛ/шт.	Стоимость лампы, ТЛ/шт.
1	250W HPS L3	64	32	20000	5	212,00	45,00
2	250W MH L1	68	34	12000	3	212,00	45,00
3	170W LED L3	76	38	50000	13	400,00	-
4	153W LED L6	68	34	50000	13	550,00	-

* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, LED – светодиод, L1, L3, L6 – наименования производителей дорожных светильников

ции имеют место высокие уровни инфляции и процентные ставки, что следует учитывать при проведении долгосрочного экономического анализа капиталовложений. Так как рассматриваемые светильники предназначены для турецких дорог, то при проведении расчётов использовались уровни инфляции и процентные ставки Центрального банка Турции, принятые равными 8,5 и 10,5 % соответственно [27, 28]. Цены светильников были взяты из текущих каталогов производителей. Стоимости труда работников и монтажных работ определялись на основе действующих в Турции расценок.

Стоимость технического обслуживания традиционных светильников включает в себя замену ламп и ПРА и чистку светильников. При замене лампы осуществляется и чистка светильника. Замена ПРА на протяжении проектного срока службы ОУ производится дважды. Стоимости электромагнитных ПРА для ламп мощностью 150 и 250 Вт составляют, соответственно, 32,00 и 43,00 ТЛ за 1 шт. Считалось, что на протяжении проектного срока службы ОУ замена традиционных светильников не производится. С другой стороны, светильники с СД считают неразборными, так что в их случае замена источников света не производится. Средний срок службы светильников с СД составляет 50000 ч, так что расчётный срок замены этих светильников составляет 13,7 лет, и за 30 лет светильники с СД заменяют дважды, примерно через 13 и 27 лет после начала эксплуатации ОУ. Кроме того, техническое обслуживание светильников с СД осуществляется с интервалом 5 лет. Входящие в уравнение (4) затраты на техническое обслуживание зависят от зарплаты персонала и стоимости топлива, а также продолжительности рабочего дня и количества ламп. Два работника обслуживают с заменой ламп 10 светильников в час. Суточные затраты на оплату труда и продолжительность рабочего дня составляют 80,00 ТЛ и 8 ч соответственно. На топливо для транспорта расходуется 150,00 ТЛ в сутки. Суточная и годовая продолжительности работы светильника считаются равными 10 и 3650 ч соответственно. Стоимость предназначенной для освещения электроэнергии в Турции составляет 0,257 ТЛ/кВт·ч. Расчёт затрат на электроэнергию производится по формуле (5).

Описываемые уравнением (3) капитальные затраты включают в себя стоимости ламп, опор, кабелей, труда и светильников. Количество светильников и опор на 1 км

дороги рассчитывались при помощи программы *DIALux*. Стоимость опоры со вспомогательным оборудованием составляет в среднем 750,00 ТЛ/шт. при равной 10,00 ТЛ на 1 м высоты опоры стоимости установки опоры. Стоимости установки светильника и лампы составляют, соответственно, 75,00 и 5,00 ТЛ/шт. Стоимость кабеля рассчитывалась как для воздушных, так и для подземных кабелей. Длина подземного кабеля определялась умножением количества опор на шаг между опорами, а длина воздушного кабеля – умножением высоты установки светильника на количество опор на 1 км дороги. Стоимости подземного кабеля и его прокладки составляют, соответственно, 7,50 и 35,00 ТЛ/м, а стоимости воздушного кабеля и его прокладки составляют, соответственно, 4,50 и 2,00 ТЛ/м.

Ликвидационная стоимость рассчитывалась применительно к установленным последними светильникам с СД. Светильники с СД следует заменять на новые по истечении их срока службы, т.е. каждые 50000 ч, и если продолжительность периода, применительно к которому осуществляется экономический анализ (проектный срок службы ОУ), считать равным 30-ти годам, а продолжительность эксплуатации светильника с СД – равной 13,7 лет (при годовой продолжительности работы 3500 ч и сроке службы 50000 ч), то последний установленный светильник проработает только 2,6 лет. В этом случае необходимо определить соответствующую неиспользованному времени работы ликвидационную стоимость светильника, которую вычитают из полных затрат. Остаточная стоимость светильника после второй замены рассчитывается по формуле [11]:

$$100 \times \left(1 - \frac{30 - (2 \times 13.7)}{13.7} \right) = 81\%. \quad (7)$$

В течение проектного срока службы ОУ 81 % срока службы установленных последними светильников с СД остаются неизрасходованными. При равной 470,00 ТЛ стоимости светильника ликвидационная стоимость последнего светильника с СД оказывается равной $470,00 \times 0,81 = 370,70$ ТЛ. Эта стоимость будет зависеть от уровня инфляции и размера процентной ставки, так что для расчёта текущего значения ликвидационной стоимости использовалось уравнение (1).

Результаты расчёта полной ЧПС для дороги класса *M2*

№	Наименование светильника*	Капитальные затраты, ТЛ/км	Стоимость электроэнергии, ТЛ/км	Затраты на техобслуживание, ТЛ/км	Ликвидационная стоимость, ТЛ/км	Полные затраты, ТЛ/км
1	150W HPS L3	154976,00	173473,47	11379,34	-	339828,82
2	150W MH L3	168588,00	215636,21	22956,06	-	407180,28
3	80W LED L1	194139,00	118111,23	41683,97	12670,98	341263,22
4	80W LED L4	191734,00	119004,88	52888,19	14179,43	349447,64
5	105W LED L4	183712,00	135255,69	50740,32	13828,82	355879,19
6	114W LED L5	186944,00	145045,62	58943,61	16438,03	374495,21

* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, LED – светодиод, L1, L3, L4, L5 – наименования производителей дорожных светильников

Таблица 6

Результаты расчёта полной ЧПС для дороги класса *M2*

№	Наименование светильника*	Капитальные затраты, ТЛ/км	Стоимость электроэнергии, ТЛ/км	Затраты на техобслуживание, ТЛ/км	Ликвидационная стоимость, ТЛ/км	Полные затраты, ТЛ/км
1	250W HPS L3	96704,00	302071,04	16322,06	-	415097,10
2	250W MH L1	99297,00	405259,86	28077,40	-	532634,26
3	170W LED L3	116698,00	250255,23	47483,18	12393,76	402042,65
4	153W LED L6	115515,00	208720,46	55619,08	15247,58	364606,96

* HPS – натриевая лампа высокого давления, MH – металлогалогенная лампа, LED – светодиод, L1, L3, L6 – наименования производителей дорожных светильников

4. Результаты анализа затрат

ОЗЖЦ светильников осуществлялась применительно к равной 30-ти годам продолжительности работы ОУ. Применительно к полным затратам, ЧПС включает в себя капитальные затраты, стоимость электроэнергии, затраты на техническое обслуживание и ликвидационную стоимость. Результаты ОЗЖЦ, проведённой для разных светильников в расчёте на 1 км дорог классов *M2* и *M1*, приведены в табл. 5 и 6 соответственно.

Согласно табл. 5, светильникам HPS L3 и LED L1 соответствуют почти одинаковые затраты жизненного цикла, и они являются наиболее эффективными для дороги класса *M2*. При этом, хотя в случае светильника с НЛВД HPS L3 стоимость электроэнергии примерно на 32 % превышает стоимость электроэнергии случае светильника с СД LED L1, капитальные затраты в первом случае оказались примерно на 20 % меньше, чем во втором. Затраты на техническое обслуживание включают в себя замену светильников с СД в целом, тогда как у традиционных светильников заменяют только лампы. Поэтому затраты на техническое обслуживание светильников с СД оказываются более высокими, чем в случае традиционных светильни-

ков. Светильникам с МГЛ соответствуют наиболее высокие полные затраты, что связано с их низкой световой отдачей и малым сроком службы ламп.

Результаты, приведённые в табл. 6, говорят о том, что для дороги класса *M1* самым лучшим по сравнению с остальными светильниками капиталовложением является светильник с СД LED L6. Хотя на 1 км дороги светильников LED L6 приходится больше, чем традиционных светильников (68 и 64 шт./км соответственно), благодаря более высокой, чем у традиционных светильников, световой отдаче этого светильника с СД, стоимость электроэнергии в случае светильников LED L6 оказалась наименьшей. Кроме того, потери в электромагнитных ПРА традиционных светильников приводят к значительному увеличению энергопотребления. В случае светильников с МГЛ стоимость электроэнергии и полные затраты оказались больше, чем у светильников LED L6, на примерно 48, 5 и 31 % соответственно.

5. Заключение

В рамках этого исследования были проведены лабораторные измерения традиционных светильников и све-

тильников с СД, предназначенных для дорог классов *M1* и *M2*. При помощи программы *DIALux* были проведены расчёты в целях оптимизации максимального шага между опорами при удовлетворении минимальных требований к освещению дорог, относящихся к разным классам по освещению. Для наиболее экономически эффективных традиционных светильников и современных светильников с СД были сопоставлены затраты жизненного цикла с учётом капитальных затрат, стоимости электроэнергии, затрат на техническое обслуживание и ликвидационной стоимости светильников.

Проведённые ОЗЖЦ показали, что в случае новых ОУ для дорог класса *M2* при равном 30-ти годах сроке эксплуатации экономическая эффективность светильников *80 W LED L3* и *150 W HPS L1* почти совпадает. Однако светильники с СД могут оказаться более предпочтительными благодаря меньшему потреблению электроэнергии и, соответственно, меньшему выбросу CO_2 электростанциями, и более высокому качеству освещения. Применительно к дорогам классов *M1* и *M2*, наибольшие полные затраты были получены в случае светильников с МГЛ. В то же время, в случае дорог класса *M1* полные затраты при использовании светильников с СД *153 W LED L6* оказались ниже, чем при использовании светильников с НЛВД *250 W HPS* и светильников с МГЛ *250 W MH*. Для всех категорий капитальные затраты оказались выше в случае светильников с СД, что связано с большей стоимостью таких светильников, тогда как стоимость электроэнергии в случае светильников с СД оказалась ниже, чем у традиционных светильников.

Это исследование также продемонстрировало важность сравнения различных типов светильников (с НЛВД, МГЛ и СД) с точки зрения энергосбережения, качества освещения и экономической эффективности. Согласно полученным результатам, экономическая эффективность ОУ с СД зависит, в первую очередь, от следующих основных параметров: стоимости электроэнергии и стоимости светильников. А так как стоимость светильников с СД непрерывно уменьшается, то в будущем они найдут более широкое применение. Если же стоимость электроэнергии будут возрастать из-за уменьшения запасов нефти, то светильники с СД окажутся экономически более привлекательными для освещения дорог.

Авторы благодарят Турецкий совет по проведению исследований в области науки и техники (*TUBITAK*) и Совет Технического университета Илдиз по координации исследовательских работ (проект *YTU-BAPK-Grand № 2015-04-02-KAP01*) за финансовую поддержку при проведении этих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Light's Labour's Lost: Policies for energy-efficient lighting. Paris: IEA (International Energy Agency), 2006.
2. Avrenli, K.A., Benekahal, R.R., Medina, J. LED roadway lighting, Volume 1: Background information. FHWA-ICT-12-012, Illinois, 2012.
3. Lighting the Clean Revolution: The rise of LEDs and what it means for cities. London: The Climate Group, 2012.
4. Dubois, M. C., Blomsterberg, A. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review // *Energy Build.*– 2011. – Vol. 43, No. 10. – P. 2572–2582.
5. Juntunen, E., Tetri, E., Tapaninen, O., Yrjänä, S., Kondratyev, V., Sitomaniemi, A., Siirtola, H., Sarjanoja, E., Aikio, J., Heikkinen, V. A smart LED luminaire for energy savings in pedestrian road lighting // *Light. Res. Technol.*– 2015. – Vol. 47, No. 1. – P. 103–115.
6. Bullough, J.D., Radetsky, L.C., Besenecker, U.C., Rea, M.S. Influence of spectral power distribution on scene brightness at different light levels // *LEUKOS.*– 2014. – Vol. 10, No. 1. – P. 3–9.
7. DOE (U.S. Department of Energy). Solid-state lighting program 'R&D plan, 2016.
8. Domenichini, L., La Torre, F., Vangi, D., Virga, A., Branzi, V. Influence of the lighting system on the driver's behavior in road tunnels: A driving simulator study // *J. Transp. Saf. Secur.*– 2017. – Vol. 9, No. 2. – P. 216–238.
9. Guo, S., Gu, H., Wu, L., Jiang, S. Energy-saving tunnel illumination system based on LED's intelligent control // *J. Phys. Conf. Ser.*– 2011. – Vol. 276, No. 1. – P. 12164.
10. Tähkämö, L., Halonen, L. Life cycle assessment of road lighting luminaires – Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies // *J. Clean. Prod.*– 2015. – Vol. 93, No. 1. – P. 234–242.
11. Avrenli, K.A., Benekahal, R.R., Medina, J. LED roadway lighting, Volume 2: Field evaluations and software comparisons. FHWA-ICT-12-013, Illinois, 2012.
12. FHWA U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Asset Management. Life-cycle cost analysis primer. Washington, 2002.
13. Onaygil, S., Guler, O., Erkin, E. Cost analyses of LED luminaires in road lighting // *Light & Engineering.*– 2012. – Vol. 20, No. 2. – P. 39–45.
14. Tähkämö, L., Ylinen, A., Puolakka, M., Halonen, L. Life cycle cost analysis of three renewed street lighting installations in Finland // *Int. J. Life Cycle Assess.*– 2012. – Vol. 17, No. 2. – P. 154–164.
15. Jiang, Y., Li, S., Guan, B., Zhao, G. Cost effectiveness of new roadway lighting systems // *J. Traffic Transp. Eng.*– 2015. – Vol. 2, No. 3. – P. 158–166.
16. Welz, T., Hischer, R., Hilty, L.M. Environmental impacts of lighting technologies – Life cycle assessment and sensitivity analysis // *Environ. Impact Assess. Rev.*– 2011. – Vol. 31, No. 3. – P. 334–343.
17. CIE115:2010 Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Vienna, Austria, 2010.
18. IES LM-54-99 Guide to Lamp Seasoning. 1999.
19. IES LM-79-08 The electrical and photometric measurements of solid-state lighting products. 2008.
20. EN13201-3:2013 Road Lighting – Part 3: Calculation of performance.
21. EN13201-1:2004 Road lighting – Part 1: Selection of lighting classes.
22. CIE180:2007 Road transport lighting for developing countries. Vienna, Austria, 2007.
23. LED Luminaire Lifetime: Recommendations for testing and reporting // DOE (U.S. Department of Energy), 2011.
24. Tähkämö, L., Räsänen, R.-S., Halonen, L. Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting // *Int. J. Life Cycle Assess.*– 2016. – Vol. 21, No. 2. – P. 137–145.
25. Teodorescu, R., Katsanevakis, M. An optimization method for designing large PV plants // *J. Photovoltaics.*– 2013. – Vol. 3, No. 2. – P. 814–822.

26. Life cycle cost analysis manual. Illinois: State of Illinois Capital Development Board, 1991.

27. CBRT, «The Central Bank of The Republic of Turkey,» 2016. [Online]. Available: <http://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tcmb+en/tcmb+en>. [Accessed: 12-Sep-2016].

28. TSI, «Turkish Statistical Institute.» [Online]. Available: <http://www.turkstat.gov.tr/Start.do>. [Accessed: 12-Sep-2016].



Рамазан Аяз (Ramazan Ayaz), Ph.D. (2018 г.). Ассистент электротехнического факультета Технического университета Илдиш. Область научных интересов: освещение дорог, энергоэффективные и фотоэлектрические системы



Азийе Каймаз Озканли (Asiye Kaymaz Ozcanli), M. Sc. (2016 г.). Аспирант Технического университета Илдиш



Измаил Накир (Ismail Nakir), Ph.D. (2012 г.). Доцент электротехнического факультета Технического университета Илдиш. Область научных интересов: освещение и возобновляемые источники энергии



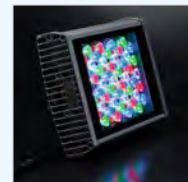
Прамод Бхусал (Pramod Bhusal), Ph.D. (2009 г.). Научный сотрудник светотехнического отделения Университета Аалто, Финляндия. Область научных интересов: энергоэффективное освещение, колориметрия, ориентированное на людей освещение и организация освещения. Автор более чем 20-ти печатных работ



Адем Унал (Adem Unal), Ph.D. (1995 г.). Доцент электротехнического факультета Технического университета Илдиш. Область научных интересов: освещение и теория цепей.

IntiLED вступила в проект национального бренда «Made in Russia // Сделано в России»

В августе 2018 г. компания IntiLED вступила в проект национального бренда «Made in Russia // Сделано в России». Цель проекта «Made in Russia» – повышение узнаваемости российских брендов и продукции за рубежом. «Сделано в России» – это в первую очередь инструмент для продвижения национальной системы качества. Проект призван подтвердить добросовестность отечественного производителя как надёжного поставщика и сформировать современный имидж российского экспорта. Вступая в программу, IntiLED подтвердила высокое качество и страну происхождения выпускаемых изделий.



Участие в «Made in Russia» упростило для компании выход на международные рынки, позволяя продвигать продукцию IntiLED под единым брендом «Made in Russia». IntiLED станет частью коллективного продвижения экспорта, бизнеса и культуры России. Проект был запущен в 2015 г. Логотип национального бренда «Сделано в России» – это соединение штрих-кода и текстуры бересты. В логотипе заключены ассоциации с бизнесом, производством товаров, их продажей, а также с богатой культурой и историей предпринимательства в России.

intiled.ru/
08.2018

Облучение светодиодами широко используется в вертикальных фермах для повышения объёма местных поставок продуктов питания

Благодаря светодиодам, сельхозпроизводство можно вести в местах со сложными окружающими условиями, обеспечивая тем самым местные поставки продуктов питания и уменьшение дальности перевозок. Вертикальные фермы организуют во всём мире в целях более эффективного и менее ресурсоёмкого производства продуктов питания.



В Шотландии агротехническая компания Intelligent Growth Solutions (IGS) представила первую в этой местности вертикальную ферму, заявив, что благодаря запатентованным ею решениям эта ферма самая совершенная из ферм в мире, расположенных в помещениях. Согласно IGS, этой вертикальной фермой можно управлять с помощью платформы, состоящей из запатентованных электрических, электронных и механических устройств, которые, в свою очередь, управляются платформой программного обеспечения услуг и базы данных («SaaS & data platform») с использованием искусственного интеллекта. Это решение поможет снизить потребление энергии на 50 % по сравнению с другими решениями установок для выращивания растений в помещениях.

Вертикальные фермы появились в целях снижения нецелевого расхода воды, исключения использования пестицидов и уменьшения дальности перевозок продуктов питания за счёт обеспечения возможности выращивания овощей на месте и по заявкам, что приводит к 90 %-ному снижению потерь продуктов питания. Вертикальная ферма компании IGS расположена в Институте Джеймса Хаттона (James Hutton Institute), занимающемся исследованиями по выращиванию растений. Сотрудники этого института будут вместе с компанией IGS исследовать влияние разных фитооблучателей на урожайность и качество выращиваемых растений.

В то же время, в Лас-Вегасе недавно созданная компания Oasis Biotech превратила заброшенное промышленное предприятие в одну из крупнейших в США вертикальных ферм. Эта ферма уже поставляет продукцию в рестораны Лас-Вегаса с момента своего открытия в июле этого года. Благодаря использованию облучения светодиодами и контролируемыми условиям в помещении она может давать свежие овощи круглогодично.

ledinside.com
28.08.2018

Технико-экономический анализ автономных установок дорожного освещения в Турции¹

А.К. ДЮМАН¹, Ё. ГЮЛЕР²

Стамбульский технический университет, Стамбул, Турция

¹ E-mail: dumanan@itu.edu.tr

² E-mail: onder.guler@itu.edu.tr

Аннотация

В работе проведён технико-экономический анализ автономных установок дорожного освещения применительно к условиям провинции Анталия, Турция. Для расчёта параметров дорожного освещения использовалась программа *DIALux*, а для моделирования, определения характеристик и оптимизации энергетических установок использовалась программа *HOMER*. Расчёты производились с целью выяснения того, какой – минимальный или максимальный – шаг между опорами является оптимальным для расположенных в Анталии осветительных установок дорог класса *M3* по освещению, работающих от фотоэлектрических источников питания при двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемах расположения светильников. Проведён технико-экономический анализ энергетических установок в случае уменьшения мощности светильников с СД после полуночи. Так как периоды окупаемости установок оказались большими, чем их сроки службы (20 лет), как при наличии, так и при отсутствии светорегулирования, то наряду с современным вариантом были рассмотрены варианты с увеличением стоимости единицы электроэнергии и уменьшением стоимости компонентов фотоэлектрических устройств и аккумуляторов.

Ключевые слова: СД, дорожное освещение, фотоэлектрические установки, технико-экономический анализ.

1. Введение

Возобновляемые источники энергии, которые, в отличие от обычных источников энергии, не вносят вклад в выбросы парниковых газов, в последние годы получили широкую

поддержку со стороны правительств, бизнеса и потребителей. Фотоэлектрические (ФЭ) и ветроэнергетические установки относятся к наиболее конкурентоспособным возобновляемым «чистым» источникам энергии, которые могут заменить традиционные ископаемые источники энергии, обеспечив при этом уменьшение выброса CO_2 . Одним из энергопотребляющих секторов является дорожное освещение, где в последние годы большое внимание стали уделять обеспечению потребности осветительных установок (ОУ) в энергии за счёт использования автономных возобновляемых источников энергии. Этому вопросу были посвящены многочисленные исследования, затрагивающие, помимо прочего, и технико-экономическую целесообразность применения ОУ, питаемых от ФЭ источников энергии [1–5]. В современных экономических условиях, автономные ОУ целесообразны только в неэлектрифицированной сельской местности, куда линии электропередачи только предстоит провести. Однако благодаря непрерывному уменьшению стоимости светильников с СД и компонентов ФЭ установок (ФЭУ), автономные ОУ могут оказаться привлекательными и в других местах [6].

Благодаря успехам в области материалов, за последние 7 лет стоимость вырабатываемой ФЭУ энергии уменьшилась более чем на 70 %, от 1,34 \$/Вт до 0,5 \$/Вт [7, 8]. Наряду с уменьшением стоимости ФЭУ, последние достижения в области СД техники позволили перейти от традиционного освещения к энергоэффективному освещению светодиодами. Помимо своих стоимостных преимуществ, потребляющие меньше энергии светильники с СД позволили использовать имеющие меньшие размеры и поэтому более дешёвые ФЭ панели и аккумуляторы, что позволили сократить расходы на автономные ФЭ ОУ.

В данной работе проведён технико-экономический анализ автономных ФЭ ОУ с СД в условиях провинции Анталия, являющейся пятой по количеству населения провинцией Турции и туристическим центром. Анталия расположена на юге страны и характеризуется высокими уровнем и продолжительностью солнечного света. Для расчёта параметров дорожного освещения использовалась программа *DIALux*, а для моделирования, определения характеристик и оптимизации ФЭУ использовалась программа *HOMER*. В первой части работы были выполнены расчёты для выяснения того, какой – минимальный или максимальный – шаг между опорами является оптимальным для расположенных в Анталии ОУ дорог класса *M3* по освещению, работающих от ФЭ источников питания при двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемах расположения светильников. В случае удовлетворяющих требованиям к освещению ОУ с максимальным шагом между опорами, требуются более долговечные, более высокие и, тем самым, более дорогостоящие осветительные опоры и более мощные и дорогие ФЭУ и светильники с СД. Однако при этом требуется меньшее количество опор. С другой стороны, в случае минимального шага между опорами, приходится на 1 км количество опор будет большим, тогда как размеры, мощность и стоимость ФЭУ, равно как и высота осветительных опор, уменьшатся. Во второй части работы применительно к полученному в первой части оптимальному решению проведён технико-экономический анализ энергосистемы в случае уменьшения мощности светильников с СД после полуночи. Светотехнические расчёты и оптимизация энергетической установки были, опять же, проведены применительно к оптимальному решению. Кроме того, наряду с современным сценарием были рассмотрены сценарии с увеличением стоимости единицы электроэнергии на 25 %, уменьшением стоимости компонентов ФЭ устройств и аккумуляторов на 25 и 50 % и с одновременным увеличением стоимости единицы электроэнергии на 25 % и уменьшением стоимости компонентов ФЭ устройств и аккумуляторов на 50 %.

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

2. Расчёты характеристик дорожного освещения

В настоящее время требования к дорожному освещению содержатся в стандартах Международной комиссии по освещению (МКО) и Европейского комитета по стандартизации (CEN) [9, 10]. В зону ответственности Турецкой энергораспределительной компании (*Turkish Electricity Distribution Co. – TEDAŞ*) входят сооружение и техническое обслуживание примерно 5 млн осветительных опор, установленных в городах и в сельской местности Турции [11]. По данным Турецкого института статистики, в 2016 г. затраты электроэнергии на общее освещение составили 4161 ГВт·ч, то есть 1,8 % от равногo 2331204 ГВт·ч полного количества потребляемой в Турции электроэнергии [12].

Для данного исследования была выбрана дорога класса *M3* по освещению, где сравнительно мощные светильники могут использоваться без превышения предельной ёмкости аккумуляторов ФЭУ, которые могут быть смонтированы на опорах. Светотехнические расчёты характеристик дорожного освещения производились применительно к 4-полосной дороге шириной 14 м с двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемами расположения светильников. Ширина разделительной полосы принималась равной 2 м.

Светотехнические расчёты характеристик дорожного освещения производились в соответствии с разработанными компанией *TEDAŞ* Техническими условиями на дорожные светильники с СД и Методами и основами использования светильников с СД для общего освещения, стандартом *TS EN13201-3* и Техническими условиями на дорожные светильники *TEDAŞ MYD-95-009.B* [13–16]. Требования к освещению дорог класса *M3* по освещению приведены в табл. 1. В соответствии с *CIE154:2003* [17], для класса защиты *IP66* коэффициент технического обслуживания был принят равным 0,89. Сама дорога считалась относящейся к классу *R3*.

Кривые силы света рассматривавшихся в работе светильников приведены на рис. 1.

Согласно [13], в случае дорог класса *M3* по освещению минимально допустимый шаг между опорами при

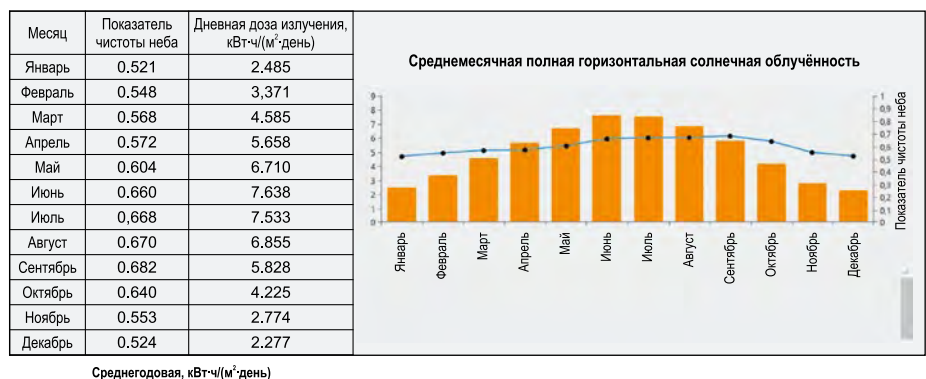
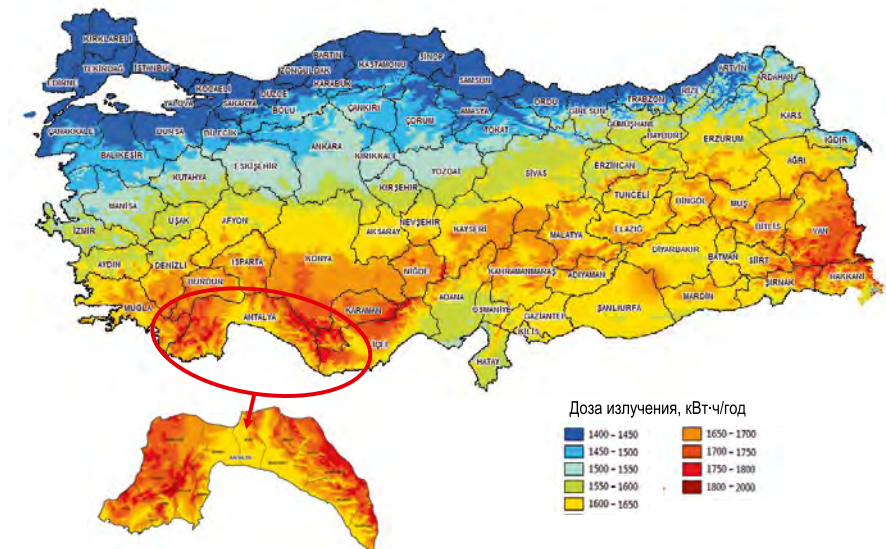


Рис. 2. Карта наличия солнечного света в Турции и данные о дозе солнечного излучения и показателе чистоты неба для Анталии

двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемах расположения светильников составляет, соответственно, 30 и 28 м. Поэтому при расчётах в программе *DIALux* шаг между опорами изменялся, соответственно, в пределах от 30 до 55 м и от 28 до 55 м с шагом изменения 1 м, тогда как высота опор изменялась от 7 до 10 м с шагом изменения 0,5 м, а длина консоли – от 0 до 1,5 м с шагом изменения 0,5 м. Угол наклона консоли был равен 0°.

В данной работе для выявления наиболее экономически эффективной автономной ОУ для дороги класса *M3* по освещению было проведено сравнение двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схем расположения светильников. Кроме того, для определения того, какое из двух решений – с большим количеством осветительных опор и менее мощными светильниками, ФЭ панелями и аккумуляторами или с меньшим количеством осветительных опор и более мощными светильниками, ФЭ панелями

и аккумуляторами – предпочтительнее, было проведено сравнение вариантов с максимальным и минимальным шагом между опорами. Результаты расчёта освещения для дороги класса *M3* по освещению, проведённого применительно к максимальному и минимальному шагу между опорами и двухрядной центральной и двухрядной прямоугольной схемам расположения светильников приведены в табл. 2.

3. Расчёты

3.1. Моделирование энергетических установок

Оптимизация энергетической установки осуществлялась при помощи разработанной в Национальной лаборатории по исследованиям в области возобновляемых источников энергии (США) программы оптимизации маломощных устройств *HOMER*. Срок службы рассматриваемых энергетических установок был принят равным

Требования к характеристикам дорожного освещения для выбранного класса дороги по освещению

Класс по освещению	L_{avg} , кд/м ²	U_o	U_l	$TI, \%$	SR
<i>M3</i>	$\geq 1,0$	$\geq 0,4$	$\geq 0,5$	≤ 15	$\geq 0,5$

L_{avg} – средняя яркость; U_o – общая равномерность; U_l – продольная равномерность; TI – пороговое приращение яркости; SR – коэффициент периферийного освещения.

Таблица 2

Расчёт освещения для дороги класса *M3* по освещению

Параметр	Схема расположения светильников			
	Двухрядная центральная		Двухрядная прямоугольная	
Шаг, м	30	49	28	51
Световой поток светильника, лм	5642	9270	4641	9270
Мощность светильника, Вт	46	73	39	73
Световая отдача светильника, лм/Вт	123	127	119	127
Высота подвеса, м	8	9,5	7	10
Длина кронштейна, м	1,5	0,5	1	1
L_{avg} , кд/м ²	1,09	1,02	1,01	1,00
U_o	0,53	0,40	0,47	0,42
U_l	0,78	0,51	0,76	0,53
$TI, \%$	10	14	10	13
SR	0,76	0,89	0,61	0,85

20 лет при равной 3 % реальной процентной ставке. Т.к. потребности ОУ должны удовлетворяться на протяжении всего года, то неприемлемы никакие уменьшения мощности.

При проведении расчётов мощность ФЭ панели изменялась в диапазоне 100–855 Вт в случае двухрядной центральной и в диапазоне 100–570 Вт в случае двухрядной прямоугольной схем расположения светильников с шагом изменения 10 Вт. Срок службы панели принимался равным 20-ти годам, капитальные затраты и стоимость замены панели – равными 0,52 \$/Вт, а затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание – равными 7 \$/год. Панели были наклонены под углом 36,90°, что соответствует широте расположения рассматриваемой местности. Коэффициент снижения мощности ФЭ панели считался равным 90 %, а коэффициент отражения поверхности земли – равным 20 %. Данные о солнечном свете извлекались при помощи программы HOMER из Базы данных по метеорологии и солнечному свету НАСА. Использовались аккумуляторы с но-

минальным напряжением 12 В и номинальной ёмкостью, изменяющейся в пределах от 33,3 и 500 А·ч. Разрешался 30-процентный минимальный уровень заряженности при равной 86 % эффективности преобразования энергии. Стоимость аккумулятора изменялась в пределах от \$ 117 до \$ 997. Т.к. аккумуляторы и ФЭ панели устанавливались на одних и тех же столбах, то стоимость технического обслуживания аккумуляторов была включена в стоимость технического обслуживания ФЭ панелей.

При проведении расчётов считалось, что установки дорожного освещения работают от заката до рассвета и не работают в дневное время и во время гражданских сумерек, которые представляют собой период времени, когда угол между Солнцем и уровнем горизонта не превышает 6°, объекты различимы и люди могут заниматься повседневной деятельностью, не нуждаясь в искусственном освещении. В табл. 3 приведены помесечные данные о средней продолжительности дневного света в Анталии, причём при определении продолжительности

дневного света учитывался переход на летнее время.

В данной работе учитывался вклад автономных ФЭ СД установок дорожного освещения в экологическую безопасность, так как одна из задач ФЭ заключается в уменьшении выброса CO_2 . При расчёте уменьшения выброса CO_2 использовались данные Международного энергетического агентства, согласно которым в Турции выработка 1 кВт·ч энергии сопровождается выбросом 490 г CO_2 [18].

3.2. Результаты оптимизации, период окупаемости и полные капитальные затраты на 1 км

Турция расположена между 36 и 42° с.ш. и 26 и 45° в.д. и обладает самыми большими в Европе после Испании потенциальными возможностями в части солнечного излучения. Согласно результатам исследования, проведённого Организацией по обследованию электроснабжения, в Турции средняя годовая продолжительность солнечного света составляет 2737 ч (7,5 ч в день), а средняя доза солнеч-

Средние интервал и продолжительности наличия дневного света в Анталии

Месяц	Средний период наличия дневного света, ч:мин	Средняя суточная продолжительность наличия дневного света, ч:мин	Средняя месячная продолжительность наличия дневного света, ч
Январь	06:41 / 17:33	13:08	407,13
Февраль	06:20 / 18:03	12:17	343,93
Март	05:41 / 18:31	11:10	346,17
Апрель	05:55 / 20:00	09:55	297,5
Май	05:19 / 20:28	08:51	274,35
Июнь	05:07 / 20:49	08:18	249
Июль	05:21 / 20:45	08:36	266,6
Август	05:48 / 20:14	09:34	296,57
Сентябрь	06:13 / 19:30	10:43	321,5
Октябрь	06:40 / 18:45	11:55	369,42
Ноябрь	06:09 / 17:15	12:54	387
Декабрь	06:35 / 17:11	13:24	402
		Всего:	3961,17

Таблица 4

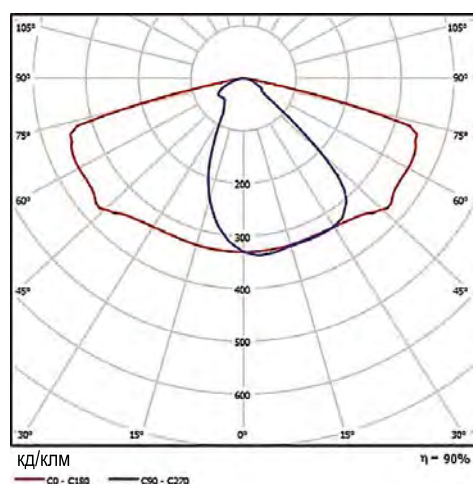
Результаты оптимизации для дороги класса МЗ в Анталии

Параметр	Схема расположения светильников			
	Двухрядная центральная		Двухрядная прямоугольная	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
Шаг, м	30	49	28	51
Мощность светильника, Вт	2×46	2×73	39	73
Напряжение и ёмкость аккумулятора, В/А·ч	12/416,6	2 x 12/333,3	12/166,6	12/250
Мощность ФЭ панели, Вт	530	800	240	540
Угол наклона ФЭ панели, град.	36,90			
Стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	0,227	0,225	0,258	0,228
Первоначальная стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1129	1829	490,05	790,80
Современная чистая стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1233	1933	594,19	977,51
Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, \$	104,14			
Электроэнергия, вырабатываемая ФЭУ в год, кВт·ч/год	823	1227	384	886
Избыточная электроэнергия, вырабатываемая ФЭУ в год, кВт·ч/год	400,3	559,7	204,5	551,7
Избыточная электроэнергия/вся вырабатываемая электроэнергия, %	48,7	45,6	53,3	62,3
Электроэнергия, потребляемая нагрузкой, кВт·ч/год	365	578	155	289
Необеспеченная нагрузка, %	0			
Автономность, ч	83,84	84,86	79,13	63,66
Уменьшение выброса CO ₂ , кг/год	178,85	283,22	75,95	141,61

Сравнение времени окупаемости и капитальных затрат в расчёте на 1 км

Параметр	Схема расположения светильников			
	Двухрядная центральная		Двухрядная прямоугольная	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
Шаг, м	30	49	28	51
Мощность светильника, Вт	92	146	39	73
Высота опоры, м	8	9,5	7	10
Современная чистая стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1233	1933	594,19	977,51
Стоимость светильника с СД, \$	591	649,5	285	295,5
Стоимость регулятора заряда, \$	100	125	75	100
Срок окупаемости энергетической установки, лет	28,53	27,82	33,73	29,13
Стоимость электроэнергии в расчёте на 1 опору, \$/кВт·ч	0,227	0,225	0,258	0,228
Стоимость гранёной осветительной опоры из оцинкованной стали, \$	123,04	170,36	102,62	184,10
Стоимость кронштейна, \$	10,09	4,60	7,35	7,35
Стоимость установки опоры, \$	65,31	90,43	54,47	97,72
Стоимость кабеля, \$	2,88	3,42	2,52	3,6
Стоимость прокладки кабеля, \$	0,96	1,14	0,84	1,2
Полная стоимость одной смонтированной опоры, \$	2126,28	2977,45	1121,99	1666,98
Количество опор на 1 км, шт./км	34	21	36 x 2	20 x 2
Полная стоимость ОУ в расчёте на 1 км, \$/км	72293,52	62526,45	80783,28	66679,2
Годовая продолжительность работы, ч	3961,17			
Годовое потребление электроэнергии в расчёте на 1 км, кВт·ч/км	12390,54	12144,95	11122,96	11566,62

Рис. 1. Кривые силы света светильников



ного света составляет 1527 кВт·ч/м² в год (4,2 кВт·ч/м² в день). Анталия расположена между 36° 07' и 37° 29' с.ш. и между 29° 20' и 32° 35' в.д. Находясь в средиземноморской ча-

сти Турции, Анталия является турецким туристическим центром и пятой по населению провинцией Турции. В Анталии средняя годовая продолжительность солнечного света составля-

ет 3014 ч, а средняя доза солнечного света составляет 1650 кВт·ч/м² в год [19]. Карта наличия солнечного света в Турции и данные о дозе солнечного излучения и показателе чистоты неба (*clearness index*) для Анталии приведены на рис. 2. Эти данные были извлечены при помощи программы HOMER из Базы данных по метеорологии и солнечному свету НАСА.

Конфигурацию энергетической установки моделировали и оптимизировали применительно к наименьшим полным чистым приведённым расходам при помощи программы HOMER. Результаты оптимизации для одной опоры приведены в табл. 4.

После проведения оптимизации были рассчитаны периоды окупаемости ФЭУ и полные стоимости ОУ в целом в расчёте на 1 км. При расчёте периода окупаемости использовалась

Часы работы ОУ и годовое потребление энергии при использовании светорегулирования, кВт·ч

Час	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
0	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
1	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
2	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
3	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
4	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102	0,102
5	0,102	0,102	0,07	0,094	0,032	0,011	0,036	0,081	0,102	0,102	0,102	0,102
6	0,07	0,034	0	0	0	0	0	0	0,022	0,067	0,015	0,015
В период между 7:00 и 17:00 освещение не требуется												
17	0,066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,11	0,11
18	0,146	0,144	0,07	0	0	0	0	0	0	0,036	0,146	0,146
19	0,146	0,146	0,146	0	0	0	0	0	0,074	0,146	0,146	0,146
20	0,146	0,146	0,146	0,146	0,078	0,026	0,036	0,112	0,146	0,146	0,146	0,146
21	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
22	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
23	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146

Таблица 7

Светотехнические расчёты при наличии и отсутствии светорегулирования

Параметр	Класс по освещению	
	M3	M4
Схема расположения светильников	Двухрядная центральная	
Световой поток светильника, лм	9270	6952.5
Мощность светильника, Вт	73	51.1
Световая отдача светильника, лм/Вт	126,99	136.06
Шаг, м	49	
Высота подвеса, м	9,5	
Длина кронштейна, м	0,5	
L_{avg} , кд/м ²	1,02	0.77
U_o	0,40	0.40
U_l	0,51	0.51
TI, %	14	13
SR	0,89	

3.3. Результаты расчётов в случае светорегулирования

Согласно Методам и принципам использования светильников с СД для общего освещения [13], которые были опубликованы Министерством энергетики и природных ресурсов Турции, для уменьшения уровня освещённости в ОУ с СД следует в обязательном порядке использовать светорегулирование. В случае дороги класса M3 по освещению светорегулирование означает уменьшение её класса до M4.

Расчёты осуществлялись для дороги класса M3 по освещению применительно к двухрядной центральной схеме расположения светильников, а использовавшееся светорегулирование приводило к изменению класса этой дороги по освещению на M4. Годовые часы работы ОУ выбранной дороги и потребляемая ею энергия приведены в табл. 6.

Считалось, что с момента включения ОУ и до полуночи освещение будет работать в режиме, соответствующем классу M3 по освещению, а от полуночи до выключения ОУ будет работать в режиме светорегулирования, соответствующем классу M4 по освещению. В этом случае ОУ будет

стоимость электроэнергии по состоянию на май 2016 г. (0,128 \$/кВт·ч). Как следует из табл. 5, при максимальном расстоянии между опорами и двухрядной центральной схеме расположения светильников наименьшие значения периода окупаемости и стоимости

ОУ в расчёте на 1 км составили, соответственно, 27,82 лет и \$ 62526,45, а при минимальном расстоянии между опорами и двухрядной прямоугольной расположения светильников они составили, соответственно, 33,73 лет и \$ 80783,28.

Сравнение результатов оптимизации для обычного режима работы и работы в режиме светорегулирования

Параметр	Обычный режим	Светорегулирование
Напряжение и ёмкость аккумулятора, В/А·ч	2 x 12 / 333,3	12 / 500
Мощность ФЭ панели, Вт	800	770
Угол наклона ФЭ панели, град	36,90	
Полная приведённая стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	0,225	0,210
Первоначальная стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1829	1398
Современная чистая стоимость аккумулятора и ФЭУ, \$	1933	1506
Стоимость регулятора заряда, \$	125	
Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, \$	104,14	
Электроэнергия, потребляемая нагрузкой, кВт·ч/год	578	483
Необеспеченная нагрузка, %	0	
Автономность, ч	84,86	76,16
Уменьшение выброса CO ₂ , кг/год	283,22	236,67

Таблица 9

Срок окупаемости капиталовложений в энергосистему и полная стоимость установки в расчёте на 1 км в современных условиях и в будущем

Сценарий	Вариант	Современная чистая стоимость энергосистемы, \$	Электроэнергия, потребляемая нагрузкой, кВт·ч/год	Срок окупаемости, лет	Полная стоимость установки, \$/км
Современные условия	Обычный режим	2058	578	27,82	62526,45
	Светорегулирование	1631	483	26,38	53559,45
Увеличение стоимости электроэнергии на 25 %	Обычный режим	2058	578	22,25	62526,45
	Светорегулирование	1631	483	21,10	53559,45
Уменьшение стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 25 %	Обычный режим	1599	578	21,61	52887,45
	Светорегулирование	1280	483	20,70	46188,45
Уменьшение стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %	Обычный режим	1144	578	15,46	43332,45
	Светорегулирование	929,87	483	15,04	38835,72
Увеличение стоимости электроэнергии на 25 % и уменьшение стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %	Обычный режим	1144	578	12,37	43332,45
	Светорегулирование	929,87	483	12,03	38835,72

работать 3961,17 ч в год, из которых 1777,26 ч она будет работать в режиме, соответствующем классу М3 по освещению, и 2183,91 ч – в режиме, соответствующем классу М4 по освещению. Результаты светотехнических расчётов, проведённых применительно к использованию светорегулирования, приведены в табл. 7.

В случае светорегулирования при переходе после полуночи от М3 к М4 световой поток светильника мощно-

стью 73 Вт уменьшится на 25 %, и, таким образом, потребляемая светильником мощность уменьшится от 73 до 51,1 Вт. Для того, чтобы определить новые характеристики ФЭУ и аккумулятора в условиях светорегулирования, моделирование в программе HOMER было выполнено снова. Сравнение результатов оптимизации, соответствующих обычному режиму и режиму светорегулирования, приведены в табл. 8.

3.4. Периоды окупаемости и полные капитальные расходы в современных условиях и в будущем

После проведения оптимизации были рассчитаны периоды окупаемости ФЭУ и полные стоимости ОУ в целом в расчёте на 1 км. Расчёты производились применительно к дороге класса М3 по освещению при максимальном расстоянии между опо-

рами, двухрядной центральной схеме расположения светильников и наличии светорегулирования. Помимо современных условий, период окупаемости капиталовложений в энергетическую установку был рассчитан и применительно к возможным в будущем сценариям: 1) увеличению тарифов на электроэнергию на 25 %; 2) уменьшению стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 25 %; 3) уменьшению стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %; и 4) увеличению тарифов на электроэнергию на 25 % при уменьшении стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %. Периоды окупаемости капиталовложений в энергетическую установку и полные стоимости ОУ в расчёте на 1 км в современных и возможных в будущем условиях приведены в табл. 9.

4. Заключение

В работе проведён технико-экономический анализ автономных установок дорожного освещения в условиях провинции Анталия, Турция. В первой части работы было получено, что оптимальным для находящейся в Анталии дороги класса МЗ по освещению вариантом автономной ФЭ ОУ с СД является ОУ с двухрядной центральной схемой расположения светильников и максимальным расстоянием между опорами. Во второй части работы применительно к полученным оптимальным проектным решениям был проведён технико-экономический анализ энергетической установки в случае светильников с СД, после полуночи работающих в режиме пониженной мощности. При этом после полуночи мощность светильника с СД уменьшается от 2×73 до $2 \times 51,1$ Вт, в результате чего мощность ФЭУ уменьшается от 800 до 770 Вт, а аккумуляторы должны обеспечивать не 2×12 В, 333,3 А·ч, а 12 В, 500 А·ч. В год светильники с СД работали 2183,91 ч в режиме пониженной мощности и 1777,26 ч в режиме полной мощности.

Как при наличии, так и при отсутствии светорегулирования, период окупаемости установок составил от 28 до 26 лет при сохранении современных условий и от 22 до 20 лет при увеличении стоимости электроэнергии на 25 % или уменьшении стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на

25 %. В упомянутых случаях периоды окупаемости превышают сроки службы установок, но эти периоды можно сократить до менее чем 20 лет, например, до 15 лет при уменьшении стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %, а при одновременном увеличении ещё и стоимости электроэнергии на 25 % – даже до 12 лет.

При использовании светорегулирования, в современных условиях чистые приведённые расходы на всю ОУ уменьшились от \$ 62526,45 до \$ 53559,45 на 1 км дороги, то есть на 14,3 %, а в случае наиболее выигрышного возможного сценария (увеличение стоимости электроэнергии на 25 % и уменьшение стоимости компонентов ФЭУ и аккумуляторов на 50 %), эти расходы уменьшатся от \$ 43332,45 до \$ 38835,72 на 1 км дороги, то есть на 10,4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu, M.S., Huang, H.H., Huang, B.J., Tang, C.W., Cheng, C.W. Economic feasibility of solar powered led roadway lighting // *Renew Energy*. – 2009. – Vol. 34. – P. 1934–1938.
2. Liu, G. Sustainable feasibility of solar photovoltaic powered street lighting systems // *Int. J. Elect. Power Energy Syst.* – 2014. – Vol. 56. – P. 168–174.
3. Velaga, R., Kumar, A. Techno-economic evaluation of the feasibility of a smart street system: A case study of rural India // *Procedia Social and Behavioral Sciences*. – 2012. – Vol. 62. – P. 1220–1224.
4. Khalil, A., Rajab, Z., Amhammed, M., Asheibi, A. The benefits of the transition from fossil fuel to solar energy in Libya: A street lighting system case study // *Appl. Sol. Energy*. – 201. – Vol. 53. – P. 38.
5. Al-Kurdia, L., Al-Masria, R., Al-Salaymeh, A. Economical Investigation of the Feasibility of Utilizing the PV Solar Lighting for Jordanian Streets // *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*. – 2015. – Vol. 10. – P. 79–85.
6. Baurzhan, S., Jenkins, G.P. Off-grid solar PV: is it an affordable or appropriate solution for rural electrification in sub-Saharan African countries? // *Renew Sustain Energy Rev.* – 2016. – Vol. 60. – P. 1405–1418.
7. Feldman, D., Barbose, G., Margolis, R., Bolinger, M., Chung, D., Fu, R., Seel, J., Davidson, C., Wiser, R. Photovoltaic System Pricing Trends Historical, Recent, and Near-Term Projections. National Renewable Energy Laboratory Publications 2015.
8. EnergyTrend PV. PV Spot Prices. Retrieved 13 May 2016, from <https://pv.energytrend.com/pricequotes.html>.

9. International Commission on Illumination. Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic. 2010, CIE Central Bureau CIE115.

10. EN13201–2:2003. Road Lighting. Part 2: Performance Requirements. CEN, Brussels.

11. Güler, Ö., Onaygil, S. Yol Aydınlatması Tesisatlarında Armatür Fotometrik Değerlerinin Önemi, IV. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu, 2017, İzmir. – P. 125–135.

12. TUIK. Distribution of net electricity consumption by sectors. Retrieved May 2016, from www.tuik.gov.tr/PreIstatistikTablo.do?istab_id=1579.

13. TEDAŞ. Technical Specification for LED Light Sourced Road Lighting Luminaires. 2015

14. Republic of Turkey The Ministry of Energy and Natural Resources. Procedures and Principles on the Usage of LED Luminaires in the General Lighting Scope. 2015

15. EN13201–3 Road lighting Part 3: Calculation of Performance. Publication 270–2003.

16. TEDAŞ, Technical Specifications for Road Lighting Luminaires TEDAŞ MYD-95–009..B. 2008.

17. CIE Pub. 154. The Maintenance of Outdoor Lighting Systems, International Commission on Illumination. 2003, Wien.

18. ABB. Turkey Energy Efficiency Report. 2011.

19. General Directorate of Electrical Power Resources Survey and Development Administration. Turkey Solar Energy Potential Atlas of Turkey. Retrieved May 2016, from www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx.



Анил Кан Дюман (Anil Can Duman),
M. Sc. Сотрудник Энергетического института Стамбульского технического университета



Ёндер Гюлер (Önder Güler),
Ph.D. (2001 г.). Профессор Энергетического института Стамбульского технического университета (с 2015 г.). Член Турецкой национальной

комиссии по освещению и Общества инженеров-электриков. Научные интересы – дорожное освещение, энергосбережение, управление потреблением энергии в промышленности и зданиях, энергия ветра, качество электроэнергии



Международная
светотехническая
корпорация



БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП

ТЕПЛИЧНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Готовые комплексные решения:

- индивидуальный подход
- инновационные разработки
- идеальный световой баланс
- независимые испытания приборов
- простота и надежность в эксплуатации

Урожай в новом свете



Мы осветили **около 300**
промышленных и фермерских
теплиц в России и за рубежом

Готовые комплексные решения

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

Применение фотометрической теории светового поля в задачах рассеяния электронов

В.П. АФАНАСЬЕВ¹, В.П. БУДАК¹, Д.С. ЕФРЕМЕНКО², П.С. КАПЛЯ³

¹ НИУ «МЭИ», Москва

² Германский центр авиации и космонавтики (DLR) и Технический университет Мюнхена (TU München), ФРГ

³ Компания «Яндекс», Москва

E-mail: budakvp@gmail.ru, dmitry.efremenko@dlr.de, pavel@kaplya.com

Аннотация

Физическая модель светового поля эквивалентна теории распространения пучков элементарных частиц в приближении классической механики. Все уравнения, описывающие распределение яркости светового поля, идентичны уравнениям для плотности пучка частиц с точностью до используемой терминологии. С конца 19 века обе теории развиваются параллельно друг другу, взаимно обогащаясь: прорыв в одной теории приводит к прогрессу в другой. На сегодня особенно важно, что точность экспериментов в физике частиц близка к предельной, что позволяет проверять многие соотношения теории светового поля в мутной среде, где пока подобная точность недостижима. На основе световых аналогий в статье рассмотрен алгоритм расчёта потока электронов, упруго рассеиваемого плоскопараллельными твердотельными слоями с резко анизотропным законом акта элементарного рассеяния. Проведено сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными по угловым распределениям электронов, упруго отражённых от двуслойных твердотельных мишеней.

Ключевые слова: теория переноса, малоугловое приближение, теория светового поля, электронная спектроскопия, инвариантное погружение.

Введение

Описание плотности потока элементарных частиц полностью эквивалентно законам распространения световых пучков в лучевом приближении. Эти законы справедливы для всех классических частиц, когда возможна их однозначная локализация в пространстве. Суть лучевого приближения для света с квантовых позиций [1] сводится к представлению о фотоне как о малой частице, движущейся по траекториям-лучам. Плотность потока фотонов определяется яркостью $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$ пучка лучей в точке \mathbf{r} по направлению $\hat{\mathbf{l}}$, которая подчиняется уравнению переноса излучения (УПИ):

$$(\hat{\mathbf{l}}, \nabla)L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = -\varepsilon L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{\sigma}{4\pi} \oint L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}') x(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') d\hat{\mathbf{l}}', \quad (1)$$

где ε и σ – показатели ослабления и рассеяния света элементарным объёмом среды, $x(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}')$ – индикатриса рассеяния. УПИ впервые сформулировано в работе [2] для среды без рассеяния, что приводит для малых толщ среды к закону Бугера (Bouguer) – экспоненциальному ослаблению яркости вдоль луча.

Уравнение переноса для потока частиц записывается в аналогичном виде:

$$(\hat{\mathbf{l}}, \nabla)\psi(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = -(\sigma_{el} + \sigma_{in})\psi(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{\sigma_{el}}{4\pi} \oint \psi(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}') x(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') d\hat{\mathbf{l}}', \quad (2)$$

где $\psi(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$ – плотность потока частиц в точке \mathbf{r} по направлению $\hat{\mathbf{l}}$, σ_{el} – сечение упругого рассеяния, σ_{in} – сечение неупругого рассеяния.

Уравнение вида (2) используется для определения плотности потока фотонов или электронов, отражаемых от слоисто-неоднородных сред с подстилающей поверхностью. С ним сталкиваются как при решении проблем дистанционного зондирования атмосферы Земли, так и при расшифровке спектров электронной спектроскопии, описании процесса электронной литографии, определении фактора обратного рассеяния в локальном рентгеноспектральном анализе, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), спектроскопии отражённых электронов (СОЭ) и т.д.

Описание как электронного, так и оптического рассеяния ведётся на основе уравнений переноса. При этом методы, созданные для решения оптических задач, активно используются для описания процессов рассеяния атомных частиц в твёрдых телах [3–5].

Методы электронной спектроскопии позволяют легко решать задачи определения качественного состава образцов. Однако количественный анализ сталкивается с проблемой последовательного аналитического описания процессов многократного упругого и неупругого рассеяния электронов в образцах. Задача количественного определения послойного компонентного состава образцов на основе анализа энергетических спектров эмитированных электронов относится к классу некорректных задач математической физики, что ставит дополнительные требования к процедуре расчёта сигнала рассеяния.

Существующие методы рутинного анализа сигналов в РФЭС и спектроскопии пиков упруго-отражённых электронов (СПУЭ) с целью получения информации о мишени базируются на подходах, полностью игнорирующих процессы упругого рассеяния электронов в рамках так называемого *SLA*-приближения (*Straight Line Approximation*) [6, 7]. Однако *SLA* приводит к ошибкам, величина которых может быть непредсказуемо высока [8]. Ошибка *SLA*-подхода возникает из того, что сечение упругого рассеяния σ_{el} в наиболее актуальных для РФЭС-, СПУЭ- и СОЭ-спек-

троскопий ситуациях больше сечения неупругого рассеяния, т.е. $\sigma_{el} > \sigma_{in}$.

При этом компенсировать указанные ошибки пытаются, вводя некие поправочные коэффициенты в формулы, полученные на основе *SLA*-подхода. Однако это не всегда даёт нужный эффект, поскольку невозможно учесть множество факторов, приводящих к методическим погрешностям, без установления вызывающих их причин. В отличие от дистанционного зондирования в области электронного рассеяния имеется целый ряд независимых методов определения послойного и компонентного составов рассеивающих мишеней, что даёт возможность экспериментальной верификации методов, используемых для описания процессов отражения от слоисто-неоднородных сред. Контролировать состав и размеры исследуемой методами электронной спектроскопии мишени можно и в процессе её приготовления; при этом расшифровку послойного состава на основе анализа электронных спектров можно выполнять методами, развитыми в теории оптического переноса. Так, наличие экспериментальных данных по угловым распределениям упругоотражённых электронов [9–11] позволяет (см. ниже) использовать в расчётах радиационные коды и модели, используемые в операционных алгоритмах обработки данных спутникового дистанционного зондирования атмосферы Земли [12–15]. Указанные обстоятельства использовались для экспериментальной верификации кода [16].

Метод инвариантного погружения был создан В.А. Амбарцумяном в 40-е годы для описания процессов переноса излучения в атмосферах звёзд и планет [17, 18]. Сущность метода заключается в переходе в УПИ от яркости к формулировке уравнений относительно коэффициентов яркости слоя по отражению и пропусканию. Своё развитие метод получил в работах С. Чандрасекара, В.В. Соболева [19, 20] и др. В этих работах подробно рассмотрены случаи, когда элементарное рассеяние можно характеризовать сферической индикатрисой или индикатрисой Рэлея [17–20]. По этой причине одной из эффективных методик решения была итерационная, где в первом приближении выбиралось решение для однократного рассеяния [18]. Для получения правильного результата было достаточно трёх-четырёх итераций. Однако большой прикладной интерес связан с задачами, в которых индикатриса сильно вытянута вперёд и в элементарном акте преобладает малоугловое рассеяние. Сильная вытянутость индикатрисы упругого рассеяния вперёд характерна для про-

цесса рассеяния электронов в твёрдом теле и фотонов в мутной среде. В настоящей работе будет показано, что случай малоуглового рассеяния позволяет заметно упростить методику решения, поскольку допускает линеаризацию нелинейных уравнений Чандрасекара.

Впервые преимущества сильной вытянутости индикатрисы были использованы С. Гаудсмитом и Д. Саундерсеном [21, 22] для решения уравнения переноса электронов на основе малоуглового приближения и метода сферических гармоник. Рассматривалась бесконечная среда, в центре которой (плоскость с координатой $z = 0$) расположены источники света (или частиц) удовлетворяющие

условию $L(z = 0, \hat{\mathbf{i}}) = \delta(\hat{\mathbf{i}} - \hat{\mathbf{i}}_0)$. Развитию методов решения

уравнений переноса в малоугловом приближении посвящены работы У. Скотта [23]. Впервые уравнение Амбарцумяна (решающее граничную задачу об отражении от полубесконечной среды) было использовано для описания процесса электронного рассеяния в работе Р. Дашена [3]. Успешные попытки решения линеаризованных уравнений Амбарцумяна и Чандрасекара в малоугловом приближении были предприняты в работах [4, 24]. В настоящей работе малоугловым приближением мы называем все действия, связанные с наличием малого параметра

$$x(\pi) / x(0) \ll 1. \quad (3)$$

На основе малоуглового приближения в настоящей работе будут получены аналитические выражения, позволяющие описывать процессы отражения излучения как от полубесконечного слоя, так и от слоёв конечной толщины. Будут представлены малоугловые решения уравнений Чандрасекара для функции пропускания. Будет показано, что реализация малоугловых приближений возможна только при использовании системы уравнений для функции пропускания, полученной Чандрасекаром [19], а не подхода, представленного в работе [25]. Будет построена итерационная процедура, решающая задачу об отражении от многослойных мишеней с подстилающей поверхностью.

Основным преимуществом приближённых аналитических решений является их быстродействие, что создаёт комфортные условия для решения обратных задач методом подбора. При этом и дистанционное зондирование, и определение послойного и компонентного составов в электронной спектроскопии – это решение обратных, ма-

Рис. 1. Функции отражения в случае нормального падения излучения на полубесконечный рассеивающий слой. Расчёт для случая индикатрисы Хеньи-Гринштейна. На графиках а демонстрируется влияние нелинейного слагаемого на величину функции отражения. Расчёты с учётом (сплошная линия) и без учёта (штриховая линия) нелинейного слагаемого. На графиках б указан рост погрешности малоуглового приближения с уменьшением вытянутости индикатрисы. Сплошная линия – численное решение (по программе «*MDOM*»), штриховая линия – малоугловое приближение. Зондирование – по нормали, альbedo однократного рассеяния – 0,67. Стрелками указаны параметры асимметрии индикатрисы Хеньи-Гринштейна, использованные в расчётах

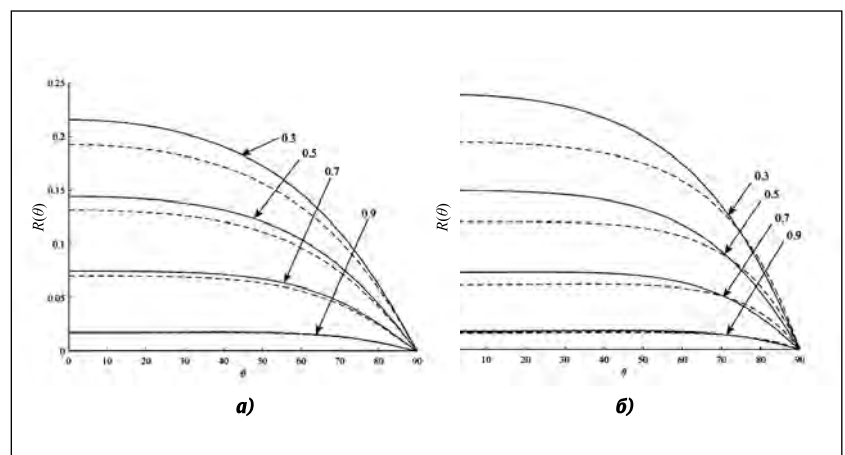
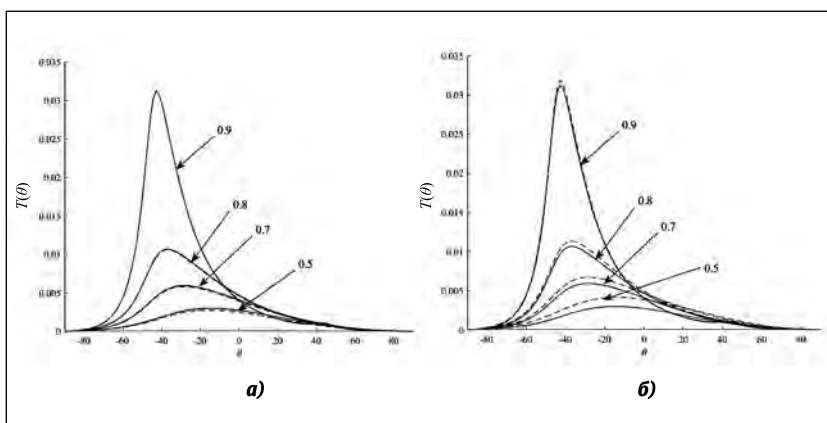


Рис. 2. Функции пропускания для слоёв толщиной $0,1l_{tr}$, измеряемой в длинах транспортного пробега. На графиках *a* демонстрируется влияние нелинейного слагаемого на значение функции пропускания. Сплошная линия – расчёт с учётом нелинейного слагаемого, штриховая линия – расчёт без учёта нелинейного слагаемого. На графиках *б* указан рост погрешности малоуглового приближения с уменьшением вытянутости индикатрисы. Сплошная линия – численное решение (по программе «MDOM»), штриховая линия – малоугловое приближение. Угол зондирования – 45° , альбеда однократного рассеяния – $0,54$. Стрелками указаны параметры асимметрии индикатрисы Хеньи-Гринштейна, использованные в расчётах



тематически некорректных задач наиболее последовательным и надёжным методом – процедурой подбора [26, 27].

В настоящей работе будут представлены методы численного решения уравнений Chandrasekhara. Сегодня для описания энергетических и угловых спектров электронной спектроскопии в основном используется моделирование методом Монте-Карло (МК) [28, 29]. МК-вычисления требуют больших затрат времени: на стандартном ноутбуке это время составляет десятки минут. Те же вычисления на том же ноутбуке, который использовался для МК-вычислений, на основе численного решения уравнений Chandrasekhara, представленного в настоящей работе ниже, занимают доли секунды. Идея использования численных методов для интерпретации спектров электронной спектроскопии заимствована из оптической теории переноса.

Апробация развитых в работе приближённых малоугловых методов проводится как на основе сравнения с точными численными решениями, так и – сравнения с экспериментальными данными.

Уравнения Chandrasekhara для функций отражения и пропускания, процедура линеаризации, решение в малоугловом приближении

Выпишем уравнение для функции отражения, полученное для слоя конечной толщины z в работе [19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \rho_m(\tau, \mu, \mu_0) + \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right) \rho_m(\tau, \mu, \mu_0) = \\ = \Lambda x_m(\mu, \mu') + \Lambda \int_0^1 x_m(\mu, \mu') \rho_m(\tau, \mu', \mu_0) \frac{d\mu'}{\mu'} + \\ + \Lambda \int_{-1}^0 \rho_m(\tau, \mu, \mu') x_m(\mu', \mu_0) \frac{d\mu'}{\mu'} + \\ + \Lambda \int_0^1 \int_{-1}^0 \rho_m(\tau, \mu, \mu') x_m(\mu', \mu'') \rho_m(\tau, \mu'', \mu_0) \frac{d\mu'}{\mu'} \frac{d\mu''}{\mu''}, \end{aligned} \quad (4)$$

где τ – безразмерная толщина слоя, индекс m определяет азимутальную зависимость функций отражения ρ_m и индикатрисы рассеяния $x_m(\mu', \mu'')$, $\Lambda = \sigma_{el}' / (\sigma_{el} + \sigma_{in})$ – альбеда однократного рассеяния. Причём

$$\rho(\tau, \mu, \mu_0, \varphi - \varphi_0) = \sum_m \rho_m(\tau, \mu, \mu_0) \exp[im(\varphi - \varphi_0)], \quad (5)$$

где $\theta_0 = \arccos \mu_0$, φ_0 и $\theta = \arccos \mu$, φ – зенитные и азимутальные углы падения и вылета электронов из мишени, определённые относительно оси, перпендикулярной поверхности и направленной вглубь мишени.

Аналогичное уравнению (4) уравнение для функции пропускания $T(\tau, \mu, \mu_0, \varphi - \varphi_0)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu} T_m(\tau, \mu, \mu_0) + \frac{\partial T_m(\tau, \mu, \mu_0)}{\partial \tau} = \Lambda \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) x_m(\mu, \mu_0) + \\ + \Lambda \int_0^1 x_m(\mu, \mu') T_m(\tau, \mu', \mu_0) \frac{d\mu'}{\mu'} + \\ + \Lambda \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \int_0^{-1} \rho_m(\tau, \mu, \mu') x_m(\mu', \mu_0, \varphi' - \varphi_0) \frac{d\mu'}{\mu'} + \\ + \Lambda \int_0^{-1} \int_0^{-1} \rho_m(\tau, \mu, \mu') x_m(\mu', \mu'', \varphi' - \varphi'') T_m(\tau, \mu'', \mu_0, \varphi'' - \varphi_0) \frac{d\mu'}{\mu'} \frac{d\mu''}{\mu''}. \end{aligned} \quad (6)$$

Численное решение уравнений для функций отражения и пропускания

Отметим, что методы, о которых идёт речь в настоящем параграфе, впервые были развиты при решении задач оптического переноса и значительно обогатили теорию переноса электронов. Перейдём к матричной записи уравнения (1), заменив непрерывные переменные μ' дискретным набором N значений μ'_i , а интегралы – квадратными формулами. Тогда функция отражения S^m превратится в матрицу размерности $N \times N$, где s_i – веса квадратного метода, μ'_i – узлы сетки по косинусу угла падения/

наблюдения, $w = \text{diag}(s_i/\mu_i)$. Уравнение (4) переписывается в виде:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho^m(\tau) + A \rho^m(\tau) + \rho^m(\tau) A = C + \rho^m(\tau) D \rho^m(\tau), \quad (7)$$

где $A = \text{diag}(1/\mu) - \Lambda x^{m+} w$, $C = \Lambda x^{m-}$, $D = \Lambda w x^{m-} w$.

Индекс «+» в индикатрисе указывает на описание процесса перехода нисходящего движения в нисходящее либо восходящего в восходящее, а индекс «-» показывает, что восходящее движение потока переходит в нисходящее либо наоборот.

Уравнение вида (7) носит название дифференциального алгебраического уравнения Риккати [30, 31]. Оно может быть численно решено рядом методов [31–34]. В настоящей работе используется метод *BDF* (*Backward Differential Formula*) [34]. Причём несколько упрощает ситуацию симметричность матрицы x^{m+} .

Выполнив аналогичную дискретизацию для упруго-рассеянных в слое частиц, получим матричное представление уравнения для функции пропускания:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T_0^m(\tau) + A' T_0^m(\tau) = C, \quad (8)$$

где $A' = \text{diag}(1/\mu) - \Lambda x^{m+} w - A \rho_0^m(\tau) w x^{m-} w$,
 $C = \Lambda (x^{m+} + \rho_0^m(\tau) w x^{m-}) \text{diag}[\exp(-\tau/\mu)]$.

Найдём решения полученных уравнений как с учётом нелинейных слагаемых, так и решения упрощённых, т.е. линеаризованных, матричных уравнений, на основе *BDF*-метода. Воспользуемся для описания упругого рассеяния хорошо известной в оптике индикатрисой Хензи-Гринштейна. Цифры на графиках, представленных на рис. 1 и 2, показывают величину параметра асимметрии g , определяющего степень вытянутости индикатрисы Хензи-Гринштейна:

$$x_{HG}(\mu) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\mu)^{3/2}} = \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)g^l P_l(\mu), \quad (9)$$

где P_l – полиномы Лежандра.

На рис. 1 сплошными линиями представлено решение уравнения (7) (и, соответственно, (4)), пунктир – решение уравнения (7) с отброшенным нелинейным слагаемым (вторым слагаемым в правой части). Набор графиков на рис. 1 указывает на рост погрешности расчётов, выполненных на основе линеаризованных уравнений. Это очевидный результат, поскольку трудно назвать «сильно вытянутыми» индикатрисы с $g \leq 0,5$. Но даже в случае нарушения условия (3) линеаризованные уравнения дают результат, ошибка которого $\leq 10\%$.

На рис. 2 сплошными линиями представлено решение уравнения (8), а пунктир – решение уравнения (8) с отброшенными слагаемыми, которые включают функцию отражения $\rho_0^m(\tau)$. Иными словами, это решение уравнения (6), в котором пренебрегается последними двумя слагаемыми в правой части.

Аналитические решения линеаризованных уравнений для функций отражения и пропускания

Проведённый анализ, выполненный на основе численных решений, указывает на то, что для «сильно вытянутых индикатрис» (см. условие (3)) возможно описание процессов отражения и прохождения частиц и излучения сквозь слой на основе следующих уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho_m(\tau, \mu, \mu_0) + \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right) \rho_m(\tau, \mu, \mu_0) = \Lambda x_m(\mu, \mu') + \Lambda \left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right) \int_0^1 x_m(\mu, \mu') \rho_m(\tau, \mu', \mu_0) \frac{d\mu'}{\mu'} \quad (10)$$

и

$$\frac{1}{\mu} T_m(\tau, \mu, \mu_0) + \frac{\partial T_m(\tau, \mu, \mu_0)}{\partial \tau} = \Lambda \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) x_m(\mu, \mu_0) + \Lambda \int_0^1 x_m(\mu, \mu') T_m(\tau, \mu', \mu_0) \frac{d\mu'}{\mu'}. \quad (11)$$

Метод сферических гармоник основан на представлении функций в виде рядов по полиномам Лежандра. Однако для использования метода сферических гармоник (стандартной процедуры аналитического решения уравнений вида (10) и (11), основанной на свойстве ортогональности полиномов Лежандра на отрезке $[-1, 1]$) необходимо выполнять аналитическое продолжение подынтегральных выражений на область $(0, -1)$. Если для уравнения (10) это действие тривиально, т.к. в области $(0, -1)$ величина подынтегрального выражения в силу условия (3) стремится к нулю, то аналитическое продолжение для уравнения (11) – нетривиальная процедура. Существует целый ряд подходов к решению этой задачи (например, представленных в работе [2]), но наиболее эффективный описан нами в работах [35, 36].

Решение уравнения (11), в котором в интегральном слагаемом в силу аналитического продолжения пределы интегрирования находятся в интервале от -1 до $+1$, будем искать, используя идеологию С. Гаудсмита и Д. Саундерсена: считая μ и μ_0 константами, соответственно, во множителе $1/\mu$ в первом слагаемом левой части (11) и в показателе экспоненты в первом слагаемом правой части этого уравнения (в отношении τ/μ_0). Это приближение эквивалентно замене реального пробега на проективный. Наибольшая погрешность наблюдается, когда транспортный пробег фотона или электрона $l_{tr} = n^{-1}(\sigma_{el} + \sigma_{in})^{-1}$ соизмерим со средним пробегом электрона между упругими соударениями $l_{el} = 1/(n\sigma_{el})$. Отметим, что в случае индикатрисы Хензи-Гринштейна

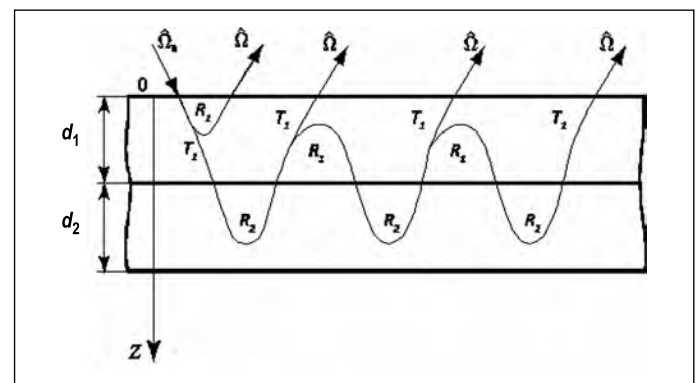


Рис. 3. Двуслойная модель отражения. Обозначения: $\Omega = (\mu, \varphi)$; $T = d(\sigma_{el} + \sigma_{in})$; полукруг – функция отражения, прямая – функция пропускания

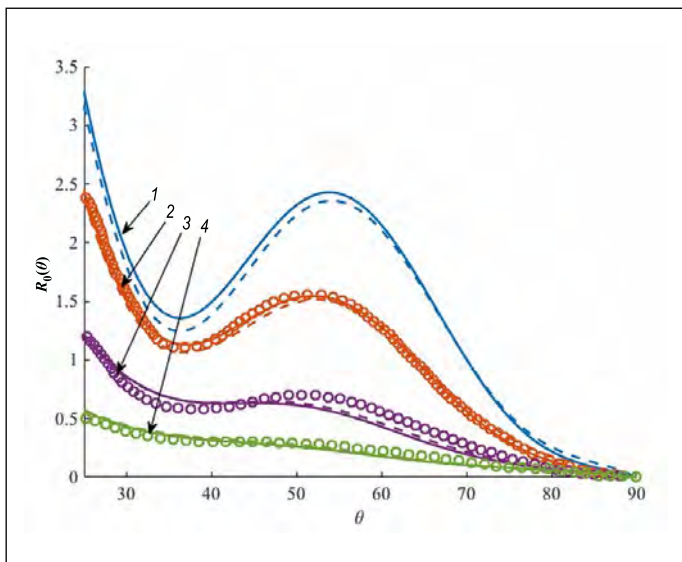


Рис. 4. Угловые распределения электронов, отражённых от золотой мишени, покрытой слоями бериллия разной толщины. Сплошная линия – точное численное решение уравнений (7) и (8), штриховая линия – расчёт в малоугловом приближении, формулы (13) и (14). Круги – экспериментальные данные [10]. Расчётные толщины слоя бериллия, напылённого на золото: 1 – 0 нм; 2 – 0,5 нм; 3 – 2,5 нм; 4 – 3,8 нм

$$l_r / l_{el} = \sigma_{el} / (\sigma_{el} + \sigma_{in}) = 1 / (1 - g). \quad (12).$$

При $l_r / l_{el} \gg 1$ мы получаем ошибку $\leq 5\%$.

С учётом сделанных допущений после подстановки разложений функций по полиномам Лежандра в уравнение (11) получаем систему разделяющихся дифференциальных уравнений, решение которой при начальном условии $T_{lm}(\tau) = 1$ имеет вид

$$T(\tau, \mu, \mu_0) = \frac{\Lambda \mu \mu_0}{2} \sum_l \frac{2l+1}{2} x_l P_l(\mu_0 \rightarrow \mu) \times \left[\frac{e^{-\tau/\mu} - e^{-(1-\Lambda x_l)\tau/\mu_0}}{(\mu - \mu_0) - \Lambda x_l \mu} + \frac{e^{-\tau/\mu_0} - e^{-(1-\Lambda x_l)\tau/\mu}}{(\mu_0 - \mu) - \Lambda x_l \mu_0} \right]. \quad (13)$$

Уравнение (10) решается методом итераций, который позволяет наиболее последовательно определять процедуру аналитического продолжения. Она подробно описана в работах [35, 36] и приводит к следующему результату:

$$\rho(\tau, \mu, \mu_0) = \frac{\mu \mu_0}{\mu + \mu_0} \sum_l \frac{2l+1}{2} x_l P_l(\mu_0 \rightarrow \mu) \times \left[E_1\left(\tau \frac{\mu + \mu_0}{\mu \mu_0}\right) - E_1\left((1 - \Lambda x_l) \tau \frac{\mu + \mu_0}{\mu \mu_0}\right) - \ln(1 - \Lambda x_l) \right], \quad (14)$$

где $E_1(x) = \int_x^\infty t^{-1} e^{-t} dt$ – интегральная экспонента.

На рис. 1 и 2 представлено сравнение точных численных решений уравнения с решениями в малоугловом приближении.

Отражение от многослойных структур

Эту ситуацию мы будем обсуждать на примере угловых распределений электронов, упруго отражённых от твёрдых тел. В литературе имеются экспериментальные данные по угловым распределениям электронов, отражённых как от однородных образцов, так и от многослойных [9–10, 37–42].

Рассмотрим двуслойную мишень (рис. 3). В соответствии с представленной схемой функция отражения от этой мишени представима в виде

$$R_{12m}(\tau_1, \tau_2, \mu_0, \mu) = R_{1m}(\tau_1, \mu_0, \mu) + \int_{-1}^1 d\mu' \int_{-1}^1 d\mu'' T_{1m}(\tau_1, \mu_0, \mu') R_{2m}(\tau_2, \mu', \mu'') \times T_{1m}(\tau_1, \mu'', \mu), \quad (15)$$

или, в силу односкоростного и малоуглового приближения, –

$$R_{12m}(\tau_1, \tau_2, \mu_0, \mu) = R_{1m}(\tau_1, \mu_0, \mu) + \int_{-1}^1 d\mu' T_{1m}(\tau_1(1/\mu_0 + 1/\mu), \mu_0, \mu') \times R_{2m}(\tau_2, \mu', \mu). \quad (16)$$

Расчёт для трёхслойной мишени можно вести на основе выражения, аналогичного формуле (16):

$$R_{123lm}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = R_{1lm}(\tau_1) + R_{23lm}(\tau_2, \tau_3) \times \exp\left[-(1 - \Lambda x_{lm}) \tau_1 (\mu^{-1} + \mu_0^{-1})\right],$$

где $R_{23lm}(\tau_2, \tau_3)$ вычисляется на основе формулы (16) с соответствующей заменой индексов: $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 3$.

На рис. 4 представлены результаты расчётов угловых распределений электронов, упруго отражённых от «бутерброда» Be/Au , выполненные на основе точных численных решений и с использованием малоуглового решения (16).

Заключение. Основные результаты

В статье представлен ряд аналитических решений, позволяющих с удовлетворительной точностью описывать прохождение и отражение излучения от мутных сред. Полученные решения составляют набор инструментов, позволяющих описывать рассеяние излучения в слоисто-неоднородных средах. В основе развиваемого в работе подхода лежат методы, которые возникли при решении оптических задач со сферической или релеевской индикатрисами рассеяния, а также методы, созданные В.А. Амбарцумяном, С. Чандрасекаром, В.В. Соболевым и другими замечательными учёными, решавшими задачи рассеяния

света в атмосферах звёзд и планет. В статье показано, что созданные в работах [17–20] методы прекрасно работают и в задачах, в которых индикатриса рассеяния «сильно вытянута вперёд» (см. условие (3)).

Наличие аналитических решений типа и позволяет выполнять вычисления с высокими скоростью и точностью, обеспечивая возможность отслеживать значения ошибки как функции основных характеристик рассеяния: параметров индикатрисы (параметр g в случае индикатрисы Хенни-Гринштейна) и альbedo однократного рассеяния.

Скорость вычислений – важный фактор при решении обратных задач. Например, когда рассматривается отражение от многослойных структур, необходимое определение толщины слоёв производится методом подбора (*fitting*), в котором многократно решается прямая задача.

Благодаря применению численных методов фотометрической теории светового поля в задачах рассеяния электронов при определении послонных профилей изотопов водорода методом спектроскопии пиков упруго-отражённых электронов (СПУЭ) удалось на порядок повысить чувствительность метода, достигнув актуальной для задач управляемого термоядерного синтеза чувствительности на уровне 10 % изотопов водорода в материале, обращённом к плазме [43].

Использование методик оптической теории переноса для физической интерпретации эффектов рассеяния электронов и ионов привело к появлению в электронной и ионной спектроскопии «оптических» терминов вроде «поворот тела яркости» и «подстилающая поверхность» [44]. Авторы настоящей работы уверены, что представленные малоугловые решения найдут применение при решении задач рассеяния света в мутных средах и в задачах оптики моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Векленко Б.А. Природа фотона и квантовая оптика // Светотехника.– 2018.– № 1. – С. 7–14.
2. Beer A. Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten // Annal. Phys. Chem.– 1852. – Vol. 86. – P. 78–88.
3. Dashen R.F. Theory of electron backscattering // Phys. Rev.– 1964. – Vol. 134. – P. 1025–1032.
4. Afanas'ev V.P., Naujoks D. Backscattering of fast electrons // Phys. Stat. Sol.– 1990. – Vol. 164. – P. 133–140.
5. Borodyansky S. Effects of elastic scattering on energy spectra of emitted and backscattered electrons // Surf. Interface. Anal.– 1993. – Vol. 84. – P. 811–814.
6. Hofmann S. Auger- and X-Ray Photoelectron Spectroscopy in Materials Science. –Berlin/Heidelberg: Springer, 2013.
7. Powell C.J., Jablonski A. Progress in quantitative surface analysis by X-ray photoelectron spectroscopy: Current status and perspectives // J. of Electron Spectros. Relat. Phenom.– 2010. – Vol. 178–179. – P. 331–346.
8. Капля П.С. Создание высокоточных методов анализа твёрдых тел на основе расшифровки данных электронной спектроскопии методами инвариантного погружения / Дис. ... к-та физ.-мат. наук, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.3428.8246.
9. Бронштейн И.М., Васильев А.А., Пронин В.П., Хинич И.И. Упругое отражение электронов средних энергий от неупорядоченных металлических поверхностей // Известия АН СССР, Сер. физическая.– 1985. – Т. 49.– № 9. – С. 1755–1759.
10. Бронштейн И.М., Пронин В.П. Упругое рассеяние электронов средних энергий металлическими плёнками // Физика твёрдого тела.– 1975. – Т. 17. – С. 2431–2433.
11. Gergely G. Elastic backscattering of electrons: determination of physical parameters of electron transport processes by elastic peak electron spectroscopy // Prog. Surf. Sci.– 2002. – Vol. 71. – P. 31–88.
12. Doicu A., Trautmann T. Discrete-ordinate method with matrix exponential for a pseudo-spherical atmosphere: Scalar case // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.– 2009. Vol. 110. – P. 146–158.
13. Spurr R.J.D., Kurosu T.P., Chance K.V. A linearized discrete ordinate radiative transfer model for atmospheric remote-sensing retrieval // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.– 2001. – Vol. 68.– № 6. – P. 689–735.
14. Stamnes K., Tsay S., C., Wiscombe W., Jayaweera K. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media // Appl. Opt.– 1988. – Vol.27. – P. 2502–2509.
15. Budak V.P., Korkin S.V. Complete matrix solution of radiative transfer equation for pile of horizontally homogeneous slabs // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.– 2011. – Vol. 112. – P. 1141–1148.
16. Афанасьев В.П., Будак В.П., Ефременко Д.С., Лубенченко А.В. Угловые распределения электронов и лёгких ионов, упруго отражённых от поверхности твёрдого тела // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.– 2010.– № 6. – С. 34–39.
17. Амбарцумян В.А. Новый способ расчёта рассеяния света в мутной среде // Изв. АН Арм. ССР. Сер. геогр. и геофиз.– 1942. – Вып. 3. – С. 97–106.
18. Амбарцумян В.А. К задаче о диффузном отражении света // Журнал экспериментальной и теоретической физики.– 1943. – Т. 13, вып. 9–10. – С. 323–334.
19. Chandrasekhar S. Radiative transfer. – London: Oxford University Press, 1950.
20. Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. – М.: Наука, 1972.
21. Goudsmit S., Saunderson J.L. Multiple scattering of electrons // Phys. Rev.– 1940. – Vol. 57. – P. 24–29.
22. Goudsmit S., Saunderson J.L. Multiple scattering of electrons. II // Phys. Rev.– 1940. – Vol. 58. –P.36–42.
23. Scott W. Theory of Small-Angle Multiple Scattering of Fast Charged Particles // Rev. of Modern Phys.– 1963. – Vol. 35. – P. 231–313.
24. Афанасьев В.П. Элементарные процессы и кинетика высокотемпературной неравновесной плазмы. – М.: Изд. МЭИ, 1988.
25. Амбарцумян В.А. К вопросу о диффузном отражении света мутной средой // Доклады Академии наук СССР.– 1943. – Т. 38.– № 8. – С. 257–261.
26. Afanas'ev V.P., Golovina O. Yu., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S. Photoelectron spectra of finite-thickness layers // Journal of Vacuum Science & Technology B.– 2015. – Vol. 33. – P. 03D101.
27. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S. Differential inverse inelastic mean free path and differential surface excitation probability retrieval from electron energy loss spectra // Vacuum.– 2017. – Vol. 136. – P. 146–155.
28. Werner W.S.M. Differential probability for surface and volume electronic excitations in Fe, Pd and Pt // Surface Science. – 2005. – Vol. 588. – P. 26–40.
29. Werner W.S.M. Analysis of reflection electron energy loss spectra (REELS) for determination of the dielectric function of solids: Fe, Co, Ni // Surface Science. – 2007. – Vol. 601, No. 10. – P. 2125–2138.
30. Bellman R, Kalaba R, Wing G. Invariant imbedding and mathematical physics. I. Particle processes // J. Math. Phys.– 1960. – Vol. 1. – P. 280–308.
31. Flatau P.J, Stephens G.L. On the fundamental solution of the radiative transfer equation // J. Geophys. Res.– 1988. –Vol. 93(D9). – P. 11037–11050.
32. Waterman P.C. Matrix-exponential description of radiative transfer // J. Opt. Soc. Am. –1981. –Vol. 71(4). – P. 410–422.
33. Efremenko D.S., Molina Garcia V., Gimeno Garsia S., Doicu A. A review of the matrix-exponential formalism in radiative transfer // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.– 2017. – Vol. 196. – P. 17–45.

34. Pienado J., Ibañez J., Hernández V., Arias E. A family of BDF algorithms for solving Differential Matrix Riccati Equations using adaptive techniques // Procedia Computer Science. – 2010. – Vol. 1. – P. 2569–2577.

35. Afanas'ev V.P., Efremenko D.S., Kaplya P.S. Analytical and numerical methods for computing electron partial intensities in the case of multilayer systems // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2016. – Vol. 210. – P. 16–29.

36. Афанасьев В.П., Капля П.С., Лисицына Е.Ю. Малоугловое приближение и модель Освальда-Каспера-Гауклера в задачах отражения электронов от твёрдых тел // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 3. – С. 66–71.

37. Jablonski A., Hansen H.S., Jansson C., Tougaard S. Elastic electron backscattering from surfaces with overlayers // Phys. Rev.B. – 1992. – Vol. 45. – P. 3694–3702.

38. Jablonski A. Elastic electron backscattering from gold // Phys. Rev.B. – 1991. – Vol. 43. – P. 7546–7554.

39. Jablonski A., Jansson C., Tougaard S. Elastic electron backscattering from surfaces: Prediction of maximum intensity // Phys. Rev. B. – 1993. – Vol. 47. – P. 7420–7430.

40. Zommer L., Lesiak B., Jablonski A. Energy dependence of elastic electron backscattering from solids // Phys. Rev.B. – 1993. – Vol. 47. – P. 13759–13762.

41. Kuzovlev A.I., Kurnaev V.A., Remizovich V.S., Trifonov N.N. Refraction of the beam of charged particles during inclined transmission through a thin target // Nucl. Instrum. and Methods. Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1998. – Vol. 135. – P. 477–481.

42. Бронштейн И.М., Пронин В.П. Упругое отражение электронов средних энергий при напылении Ве на Au // XXVIII Герценовские чтения. Физическая и полупроводниковая электроника. – Л.: Изд-во ЛГПИ им. А.И. Герцена, 1975. – С. 18–20.

43. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Köppen M., Ridzel O.Y., Subbotin N.Y., Hansen P. Investigation of Deuterium Implantation into Beryllium Sample by Electron Energy Loss Spectroscopy // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – Vol. 891. – P. 012303(1–6).

44. Афанасьев В.П., Капля П.С. Функция пропускания. Эффект «поворота тела яркости» // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – № 12. – С. 66–75.



Афанасьев Виктор Петрович, доктор физ.-мат. наук, доцент. Окончил в 1970 г. МЭИ. Профессор кафедры «Общая физика и ядерный синтез» НИУ «МЭИ». Член трёх диссертационных советов. Эксперт РАН и ФАНО



Будак Владимир Павлович, доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1981 г. МЭИ. Главный редактор журнала «Светотехника» / «Light & Engineering» и профессор кафедры светотехники НИУ «МЭИ». Действительный член РАЭН



Ефременко Дмитрий Сергеевич, доктор техн. наук (2017 г.). Окончил в 2009 г. МЭИ (ТУ). Работает в Институте дистанционного зондирования Германского центра авиации и космонавтики (DLR) и читает лекции в Техническом университете Мюнхена (TU München) по дисциплинам «Вычислительная электродинамика» и «Нелинейная оптимизация»



Капля Павел Сергеевич, кандидат физ.-мат. наук (2016 г.). Окончил в 2012 г. НИУ «МЭИ». Сотрудник компании «Яндекс»

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



ХОЛДИНГ **BL GROUP**



Экспериментальное исследование влияния типа фотоприёмника на характеристики оптических министиков унифицированных человеко-машинных интерфейсов

С.А. ГОЛУБИН^{1,4}, А.Н. ЛОМАНОВ², В.С. НИКИТИН³, В.М. КОМАРОВ²

¹ ООО «НПП «Тензосенсор», г. Рыбинск

² ФГБОУ ВПО «РГТУ им. П.А. Соловьёва», г. Рыбинск

³ ООО «НТЦ «Интрофизика», г. Рыбинск

⁴ E-mail: 707gsa@mail.ru

Аннотация

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований влияния разных типов фотоприёмников цифровых оптических министиков на их функцию преобразования, т.е. на зависимость полезного сигнала министика от величины отклонения его управляющей рукоятки. Поставленная задача решалась методами экспериментальных исследований. Исследовались схемы с фотодиодом (*PIN*-фотодиод *PD15–21B/TR8* компании *Everlight*) и схемы с фототранзистором (фототранзистор *KP2012P3C* компании *Kingbright*). Для исследования использовался автоматизированный испытательный стенд, который позволяет задавать угол поворота министика и величину отклонения рукоятки министика от центрального положения влево или вправо. Воздействие на министика задавалось программным обеспечением стенда. По результатам тестирования программа стенда автоматически строила лучевую диаграмму. Качество сигнала министика оценивалось по разрешению, точности, нелинейности и гистерезису. В результате экспериментов получены следующие результаты. Министик, используемый в качестве фотоприёмника фототранзистор, обеспечивает амплитуду выходного сигнала и разрешение, в 3,5–4 раза большие, чем у министика с фотодиодом. Это позволяет использовать министики с фототранзисторами для высокоточного управления сложной робототехникой, манипуляторами и летательными аппаратами, а также для построения на их основе джойстиков и унифицированных человеко-машинных интерфейсов. Показатели точности, нелинейности и гистерезиса у министиков обоих типов сопоставимы и удовлетворяют

основным требованиям, предъявляемым к средствам управления.

Таким образом, наилучшими с точки зрения качества сигнала могут быть признаны министики на основе фототранзисторов. Учитывая одинаковые для обоих фотоприёмников схемотехнику, габаритные размеры и стоимость элементной базы фотоприёмников, следует признать министики на основе фототранзисторов более перспективными коммутационными устройствами.

Ключевые слова: оптический министик, управление робототехникой, коммутационное устройство, упругодеформируемый полимерный элемент, фотодиод, фототранзистор, экспериментальное исследование.

1. Введение

В настоящее время роботизация постепенно входит в стадию, когда применение получают робототехнические комплексы, состоящие из множества разнотипных роботов, дистанционно управляемых операторами. Примером является роботизированный комплекс для тушения лесных пожаров, разрабатываемый компанией ООО «НПП «Тензосенсор» [1], содержащий три разных специализированных типа сухопутных роботов и дрон воздушной разведки. Для эффективного управления роботами таких комплексов необходимы компактные, многофункциональные и унифицированные устройства ввода. Таким требованиям удовлетворяют цифровые оптические министики. Министик представляет собой двухкоординатный миниджойстик, который управляется пальцем руки. Движение пальцев в 5–7 раз быстрее движения кисти руки, что позволяет намного быстрее и точнее формировать управляющие

воздействия. Малые размеры министиков позволяют размещать их по несколько штук на панели или ручке управления.

Компанией ООО «НПП «Тензосенсор» в сотрудничестве со специалистами РГТУ им. П.А. Соловьёва была разработана конструкция оптического министика, рассмотренная в [2–8] и отражённая в патенте [10] (рис. 1, 2). По сравнению с аналогами, оптические министики отличаются простотой конструкции, технологичностью и высокой надёжностью. За счёт возможности перепрограммирования выполняемых функций, они обладают многофункциональностью, а также бесшумностью, пожаро- и взрывобезопасностью, травмо- и взрывобезопасностью, малым весом и габаритами [11, 12].

Оптический министик состоит из печатной платы 1 и упругодеформируемого элемента 2 (рис. 2). На упругодеформируемом элементе 2 расположена управляющая рукоятка 3. Упругодеформируемый элемент из эластичного полимера содержит светоотражающую поверхность 4, обра-



Рис. 1. Внешний вид оптического министика

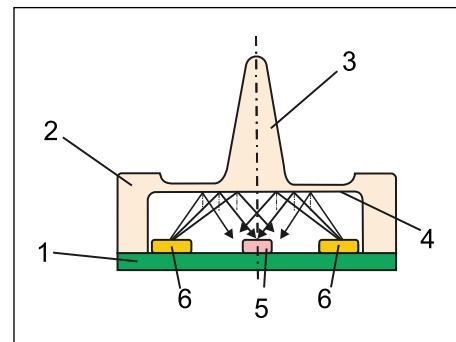


Рис. 2. Оптический министик: 1 – печатная плата; 2 – упругодеформируемый элемент; 3 – управляющая рукоятка; 4 – светоотражающая поверхность; 5 – фотоприёмник; 6 – светодиод

щённую к печатной плате 1. На плате 1 установлены фотоприёмник 5 и несколько источников света 6, которые соединены с управляющим микропроцессором и обращены к светоотражающей поверхности 4.

Принцип работы оптического министика основан на эффекте отражения света от светоотражающей поверхности упругодеформируемого элемента. При нажатии на управляющую рукоятку светоотражающая поверхность деформируется в зависимости от направления и величины нажатия. Деформация светоотражающей поверхности изменяет распределение отражённого света, которое фиксируется фотоэлектрическими преобразователями. На основании показаний фотоэлектрических преобразователей микропроцессор министика производит вычисление текущего положения управляющей рукоятки.

Так как тип фотоэлектрических преобразователей чрезвычайно сильно влияет на качество работы министика, было очень важно выяснить влияние разных типов фотоприёмника на характеристики оптических министиков.

2. Методы исследования

Научной задачей исследования являлось определение влияния типа фотоприёмника министика на его функцию преобразования, т.е. на зависимость полезного сигнала министика от величины отклонения его управляющей рукоятки.

Поставленная задача решалась методами экспериментальных исследований.

Полезный сигнал министика представляет собой два числовых значения, которые соответствуют величинам отклонения рукоятки министика по координатам X и Y . Единицей измерения выходного сигнала являются отсчёты аналого-цифрового преобразователя управляющего микроконтроллера министика, которые соответствуют отношению напряжения на фотоэлектрическом преобразователе министика к опорному напряжению аналого-цифрового преобразователя. Напряжение на фотоэлектрическом преобразователе определяется интенсивностью падающего на него отражённого света, которая зависит от величины отклонения управляющей рукоятки министика.

Методом проведения эксперимента являлся метод регистрации показаний министика по осям X и Y в точках с заданными величиной отклонения рукоятки министика от центрального положения и направлением отклонения, которое задаётся углом поворота корпуса министика.

Для исследования функции преобразования министика использовался специальный испытательный стенд для автоматизированного исследования характеристик министиков. Стенд позволял задавать угол поворота министика и величину отклонения рукоятки министика от центрального положения влево или вправо. Воздействие на исследуемый министик задавалось программным обеспечением стенда. Более подробное описание стенда приведено в [3–4, 6–7, 9].

Для обеспечения адекватности эксперимента по исследованию влияния типа фотоприёмника на показания министиков экспериментальные образцы были изготовлены со следующими параметрами:

- упругодеформируемый элемент – с одинаковыми размерами и формой;
- тип источников света – инфракрасные светодиоды *KP-3216F3C* производства компании *Kingbright*;
- тип измерителя – 10-разрядный аналогово-цифровой преобразователь, интегрированный в микроконтроллер *PIC16F1704-I/ML* производства компании *Microchip*.

В качестве фотоэлектрических преобразователей были использованы:

- в схеме с фотодиодом – *PIN*-фотодиод *PD15-21B/TR8* производства компании *Everlight*;
- в схеме с фототранзистором – фототранзистор *KP2012P3C* производства компании *Kingbright*.

Измерение показаний министиков проводилось в следующих условиях:

- пределы отклонения рукоятки министика от центра: в пределах ± 5 мм с шагом 0,5 мм;
- направление изменения величины отклонения рукоятки: от крайнего левого положения (-5 мм) до крайнего правого положения ($+5$ мм) и обратно, от крайнего правого положения ($+5$ мм) до крайнего левого положения (-5 мм);
- угол поворота министика: от 0 до $157,5^\circ$ с шагом $22,5^\circ$;
- число замеров показаний: 5, с последующим усреднением полученных значений.

По результатам тестирования программа стенда автоматически строила лучевую диаграмму. На лучевой диаграмме результаты измерений полезного сигнала министика представлены в виде точек с координатами X и Y , соответствующими числовым значениям выходного сигнала министика. Результаты измерений, полученные при отклонении рукоятки вправо и влево представлены, соответственно, точками красного и зелёного цвета. Лучевая диаграмма позволяет визуально оценить качество выходного сигнала министика: амплитуду сигнала, разрешение, точность, нелинейность, гистерезис.

Качество полезного сигнала реального министика оценивалось по следующим показателям:

1. Разрешение – параметр, характеризующий чувствительность министика.
2. Точность – параметр, характеризующий разброс значений полезного сигнала при определённом отклонении рукоятки.
3. Нелинейность – параметр, характеризующий отклонение кривой функции преобразования исследуемого министика от прямой линии.
4. Гистерезис – параметр, характеризующий различие значений выходного сигнала при одном и том же значении отклонения рукоятки, но разных направлениях его изменения.

Разрешение представляет собой изменение числа значений полезного сигнала на единицу величины отклонения рукоятки. Разрешение определяет чувствительность министика: более высокое разрешение позволяет более точно определить положение управляющей рукоятки министика.

Разрешение министика определяется по формуле

$$R = |\Delta x / \Delta L|, \quad (1)$$

где R – разрешение министика, ΔL – шаг изменения величины отклонения рукоятки министика, Δx – величина изменения показаний министика при изменении величины отклонения рукоятки министика на ΔL .

Для оценки точности применялось значение среднеквадратического отклонения измеренных показаний в точке с заданным отклонением рукоятки. Относительное значение точности показаний δ вычислялось по формуле:

$$\delta = |\text{СКО}/\Delta X|, \quad (2)$$

где δ – относительное отклонение показаний министика по данной координате, СКО – среднее квадратическое отклонение показаний министика по данной координате, ΔX – диапазон значений (амплитуда) функции преобразования по данной координате.

Для оценки нелинейности при помощи метода наименьших квадратов строилась аппроксимирующая прямая $X = k \cdot x + b$. Далее вычислялась нелинейность N_L :

$$N_L = |X - X_{\text{РАСЧ}}|/\Delta X, \quad (3)$$

где X – фактическое значение показаний министика по данной координате в данной точке; $X_{\text{РАСЧ}}$ – значение показаний министика, вычисленное при помощи аппроксимирующей функции; ΔX – диапазон значений (амплитуда) функции преобразования по данной координате.

Гистерезис G показаний оценивается по формуле:

$$G = |X_{\text{ПР}} - X_{\text{Л}}|/\Delta X, \quad (4)$$

где $X_{\text{ПР}}$ и $X_{\text{Л}}$ – значения показаний министика по данной координате в данной точке при перемещении рукоятки, соответственно, вправо и влево; ΔX – диапазон значений (амплитуда) функции преобразования по данной координате.

3. Результаты экспериментальных исследований

Лучевые диаграммы исследованных министиков приведены на рис. 3.

Графики функции преобразования министиков по осям X (угол поворота 0°) и Y (угол поворота 90°) представлены, соответственно, на рис. 4 и 5.

Для возможности сравнения графики функций различных министиков наложены друг на друга.

Результаты расчётов представлены в таблице.

4. Выводы и рекомендации

1. Выбранные схемы министиков на основе упругодеформируемого элемента, инфракрасных светодиодов и фотоприёмников на основе фотодиода и фототранзистора позволяют создавать работоспособные устройст-

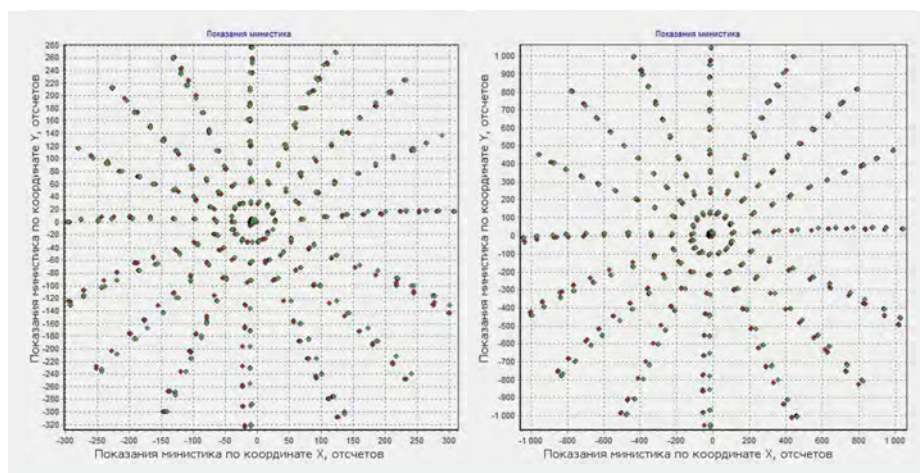


Рис. 3. Лучевые диаграммы показаний министиков. Отклонения рукоятки вправо и влево представлены, соответственно, точками красного и зелёного цвета: а – министик с фотодиодом; б – министик с фототранзистором

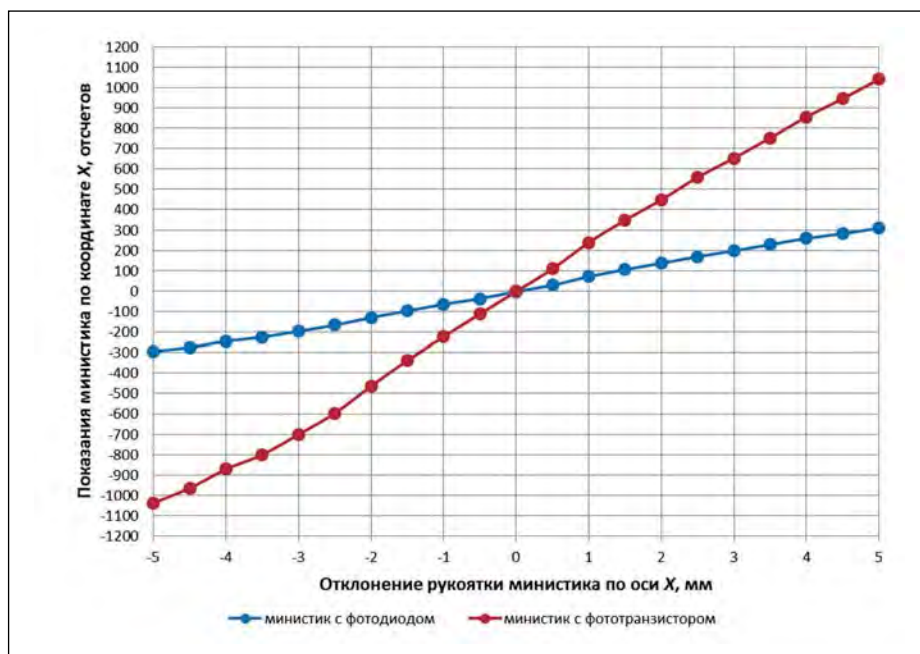


Рис. 4. Функции преобразования министиков различных схем по координате X (при угле поворота министика 0°)

ва, обеспечивающие приемлемые для применения в органах управления характеристики. Использование выходного сигнала министика в средствах управления не требует математически сложной и ресурсоёмкой обработки, что упрощает реализацию и увеличивает скорость реагирования.

2. Министик, использующий в качестве фотоприёмника фототранзистор, обеспечивает амплитуду выходного сигнала и разрешение в 3,5–4 раза большие, чем у министика с фотодиодом. Минимальное разрешение министика с фототранзистором значительно превышает 100 отсчётов на миллиметр, что значительно превосходит все существующие анало-

ги и обеспечивает гарантированную чувствительность министика 0,01 мм. Это позволяет использовать министики с фототранзисторами для высокоточного управления сложной робототехникой, манипуляторами и летательными аппаратами, а также для построения на их основе джойстиков и унифицированных человеко-машинных интерфейсов.

3. Показатели точности, нелинейности и гистерезиса у министиков обоих типов сопоставимы и удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к средствам управления. Министики на основе фототранзисторов обеспечивают несколько более высокие показатели.

Параметры качества сигналов министиков

Тип фотоприёмника министика	Министик с фотодиодом	Министик с фототранзистором
Диапазон значений (амплитуда) по оси X, отсчётов	602	2078
Диапазон значений (амплитуда) по оси Y, отсчётов	599	2106
Мин. разрешение по оси X, отсчётов/мм	37	142
Мин. разрешение по оси Y, отсчётов/мм	39	162
Макс. разброс значений	< 0,5	< 0,5
Макс. нелинейность по оси X, %	3,24	2,58
Макс. нелинейность по оси Y, %	4,25	2,64
Макс. гистерезис по оси X, %	1,83	2,02
Макс. гистерезис по оси Y, %	2,34	1,66

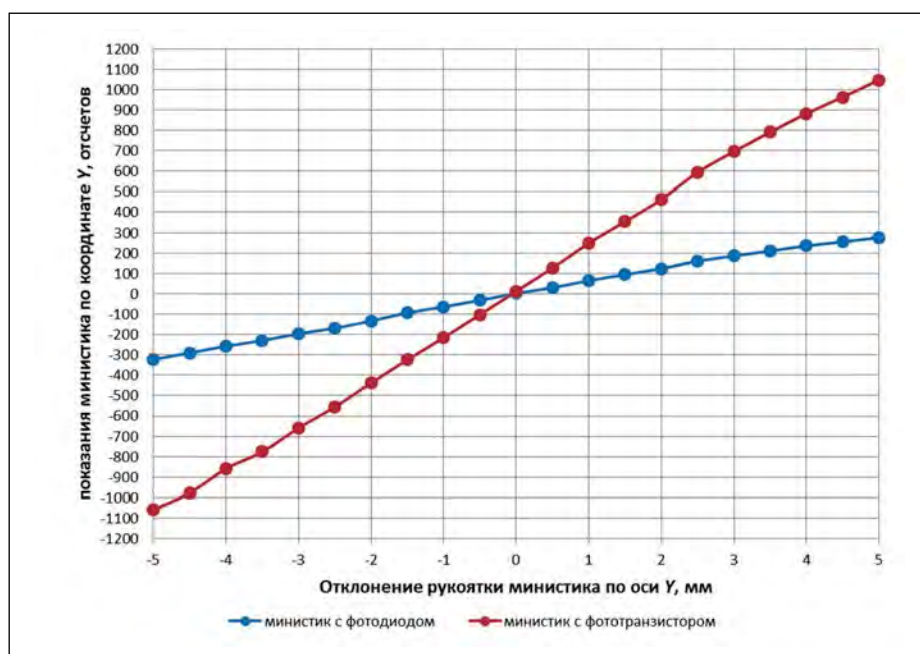


Рис. 5. Функции преобразования министиков различных схем по координате Y (при угле поворота министика 90°)

4. К недостаткам фототранзисторов по сравнению с фотодиодами обычно относят их более низкое быстродействие. Время нарастания и время спада для использованных в эксперименте фототранзисторов составляют не более чем 15 мкс. Однако время реакции человека в среднем составляет не менее чем 100 мс, что в 6,6 тысяч раз дольше, и для использования в министиках задержку при работе фототранзисторов можно считать несущественной.

Таким образом, наилучшими с точки зрения качества сигнала могут быть признаны министики на основе фототранзисторов. Учитывая

одинаковые для обоих фотоприёмников схемотехнику, габаритные размеры и стоимость элементной базы, следует признать министики на основе фототранзисторов более перспективными коммутационными устройствами.

Исследования проводятся при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения Соглашения от 26 сентября 2017 г. № 14.579.21.0151. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок RFMEFI57917X0151. Авторы призна-

тельны мониторам и экспертам Дирекции НТП за корректное и доброжелательное обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин В.С., Белов Р.Б. Роботизированный комплекс для тушения лесных пожаров // Materials of the 13th Int. Scientific and Practical Conf. «FUNDAMENTAL AND APPLIED SCIENCE – 2017» – Sheffield, Science and Education LTD.– 2017. – Volume 3. – P. 24–27. //URL: <http://www.rusnauka.com/books/2017-10-28-A4-tom-3.pdf>
2. Голубин С.А., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Комаров В.М., Семенов Э.И. Экспериментальное исследование характеристик оптических министиков // Светотехника.– 2015.– № 6. – С. 17–20.
3. Голубин С.А., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Комаров В.М., Семенов Э.И. Исследование влияния светотехнической схемы оптических министиков на их характеристики // Светотехника.– 2016.– № 6. – С. 34–38.
4. Голубин С.А., Ломанов А.Н., Никитин В.С., Комаров В.М., Семенов Э.И. Исследование характеристик оптического министика с VCSEL-лазером // Светотехника.– 2017.– № 1. – С. 24–27.
5. Golubin, S.A., Lomanov, A.N., Nikitin, V.S., Komarov, V.M. Experimental research on the performance of optical ministicks with a common receiver // Light&Engineering.– 2015. – Vol. 23, No. 4. – P. 81–87.
6. Golubin, S.A., Lomanov, A.N., Nikitin, V.S., Komarov, V.M., Semenov, E.I. Experimental study of how lighting patterns affect optical ministicks characteristics // Light&Engineering.– 2016. – Vol. 24, No. 4. – P. 105–110.

7. Golubin, S.A., Lomanov, A.N., Nikitin, V.S., Komarov, V.M., Semenov, E.I. Study of Characteristics of VCSEL-based Optical Ministicks // Light&Engineering.– 2016. – Vol. 24, No. 4. – P. 111–116.

8. Голубин С. А., Никитин В. С., Белов Р.Б. Цифровые оптические министикки для управления робототехническими комплексами // Электросвязь.– 2015.– № 11. – С. 68–69.

9. Никитин В.С., Белов Р.Б. Управлять без рычагов // Наука и жизнь.– 2012. – № 12. – С. 73–76.

10. Патент РФ № 2594992, 26.01.2015.

11. Патент РФ № . 2455678, 13.01.2011.



Голубин Сергей Александрович, инженер. Окончил в 2013 г. РГАТУ им. П.А.Соловьёва. Инженер-системотехник ООО «НПП Тензосенсор». Аспирант ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва»



Ломанов Алексей Николаевич, кандидат техн. наук. Окончил в 2003 г. РГАТУ им. П.А.Соловьёва. Декан факультета радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва»



Никитин Владимир Степанович, кандидат техн. наук. Окончил в 1976 г. Тбилисское Высшее артиллерийское командное училище. Директор ООО «НТЦ «Интрофизика»



Комаров Валерий Михайлович, кандидат техн. наук, профессор. Окончил 1972 г. РГАТУ им. П.А.Соловьёва. Зав. кафедрой «Вычислительные системы» ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А.Соловьёва»

Минэнерго США выделяет до \$15 млн на исследования в области освещения

Министерство энергетики США объявило о выделении до \$15 млн на проведение предварительных инновационных исследований в целях стимулирования прогресса в области освещения СД. Это финансирование ускорит разработку высококачественных изделий с СД и органическими СД (ОСД), способных сократить расходы американских семей и бизнеса на электроэнергию и увеличить конкурентоспособность США на мировом рынке.

Объявленное финансирование будет способствовать реализации стоящей перед правительством США задачей обеспечения лидирующего положения США в области освещения СД путём поддержки проведения инновационных исследований в следующих четырёх направлениях:

1. Базовые исследования в области СД и ОСД и междисциплинарные исследования в области освещения

Эти проекты будут способствовать развитию научных основ разработки СД, включая научные подходы, технические вопросы и вопросы физиологического воздействия и эффективности использования света СД.

2. Подтверждение работоспособности концепции и разработка опытных образцов СД, ОСД и изделий с ними

Эти проекты будут направлены на проведение предварительных исследований с целью создания опытных образцов изделий с СД, равно как и на подтверждение подхода к выбору материалов для СД, устройств и све-

тильников с СД. Проводимые в этой области исследования будут сосредоточены на создании опытных образцов высокоэффективных СД, усовершенствованных систем освещения с СД, электронных устройств для СД большой мощности, ОСД генераторов света, платформ освещения с ОСД, а также на выведении света из ОСД панелей и его использовании.

3. НИОКР по развитию производственных технологий

Эти проекты будут сосредоточены на химических и физических основах изготовления СД и ОСД, в том числе, на прогрессивных методах изготовления СД, изготовлении подложек для ОСД и их инкапсуляции, а также на изготовлении ОСД панелей.

4. Инновационное освещение при его ограниченном условии («учебном») применении

Эти проекты обеспечат оценку прогрессивных систем освещения в режиме ограниченной условной эксплуатации. Полученные в результате технические заделы и базы данных помогут исследователям усовершенствовать или перенацелить выполняемые ими предварительные исследования и разработку, светильников и других изделий, и систем с СД.

В целом, Министерство профинансирует примерно 10–15 проектов с долевым участием, предложенных промышленностью, университетами и национальными лабораториями.

ies.org/
08.2018

Эксперимент опроверг один из фундаментальных физических законов

Проведён эксперимент, в котором опровергнут один из основополагающих законов современной физики. Результаты исследования могут изменить наше понимание передачи энергии.

Закон излучения Планка был в центре интенсивных проверок почти целый век, и в результате нового анализа обнаружено, что он не работает «на самых малых масштабах». Пока не ясно, что именно это значит для науки, но обычно, когда законы перестают работать, можно ожидать новых открытий. Описание и результаты исследования опубликованы в журнале «Nature».

Этот фундаментальный закон квантовой физики недавно испытали исследователи из Мичиганского университета и Колледжа Вильгельма и Марии, которые решили выяснить, сможет ли вековой закон описать тепловое излучение наномасштабных объектов.

Закон не просто не сработал: результаты эксперимента превысили предсказанное число в 100 раз. Следовательно, наномасштабные объекты способны излучать и поглощать тепло намного эффективнее, чем могут объяснить существующие модели.

Физики, хорошо знакомые с динамикой электромагнетизма, прекрасно понимают, что странно в так называемом ближнем поле – обычное дело. С одной стороны, соотношение между электрическим и магнитным аспектами электромагнитного поля становятся сложнее в свете этого открытия.

Перед исследователями стояла непростая задача. Им потребовалось спроектировать объекты размером меньше 10 мкм (приблизительная длина волны в ИК диапазоне). Учёные использовали две мембраны из нитрида кремния толщиной в 0,5 мкм, разделённые расстоянием, достаточным для того, чтобы считаться дальним полем. Нагрев одной и измерение температуры другой позволили протестировать закон Планка с достаточно высокой степенью точности.

«Закон излучения Планка говорит, что если вы примените идеи, сформулированные им, к двум объектам, то получите определённую степень передачи энергии между ними, – объясняет один из исследователей. – Мы экспериментально наблюдали, что эта степень в 100 раз превышает показатели, предсказанные законом Планка, если объекты крайне малы».

При этом точное понимание физики проведённого эксперимента может иметь серьёзные последствия – и не только для нанотехнологий. Такая сверхэффективная степень передачи энергии может сильно изменить наше понимание передачи тепла в макромире.

nanonewsnet.ru
06.09.2018



Реконструкция осветительных приборов Московского метрополитена

Л.Г. НОВАКОВСКИЙ, С.А. ФЕОФАНОВ

ООО «Фарос-Алеф», Москва
E-mail: pharos-alef@yandex.ru

Аннотация

Сохранение архитектурного облика станций, входящих в культурное наследие, – одна из важных проблем Московского метрополитена. Формирование облика станций во многом связано с ОП, обеспечивающими световую среду всех станционных зон, определяющих уровень комфорта пассажиров и обслуживающего персонала. Спроектированные в первой половине прошлого века они не удовлетворяют высоким современным требованиям, причём многие из них утрачены или заменены ОП, светотехнически более эффективными, но абсолютно искажающими первоначальный облик станций. Появление светодиодных источников света позволяет комплексно оптимизировать световую среду при сохранении «исторического» облика ОП и станций в целом. В статье показаны способы решения этой задачи на примере вестибюля и межэскалаторного аванзала станции «Красные Ворота».

Ключевые слова: метро, освещение станций, архитектура, световая среда, культурное наследие, реконструкция, реставрация, светодиоды, энергосбережение, бра.

Введение

Модернизация освещения станционного пространства первых станций Московского метрополитена, представляющего объекты культурного наследия, является сложной многопараметрической и противоречивой задачей. Основная проблема состоит в том, что эти станции спроектированы в начале 30-х годов и, как следствие, конструкция ОП (люстр, бра, торшеров, платформенных осветителей) предусматривала использование в качестве источников света (ИС) ЛН, которые в 50-х годах были заменены на ЛЛ. При этом, учитывая возможности того времени, какие-либо ограничения в отношении прямого воздействия из-

лучения этих ИИ на зрительный аппарат человека просто отсутствовали. В подавляющем большинстве случаев, не связанных с использованием светодиодов (СД), как это следует из современных требований к освещению станционных зон [1], они отсутствуют и сейчас.

В результате сложилась ситуация, при которой в метро используются ОП с ЛЛ (рис. 1), что создаёт значительный дискомфорт из-за наличия пульсаций светового потока и сле-



Рис. 1. Внешний вид ОП с прозрачным рассеивателем и ЛЛ

пящего действия, создаваемого прямым излучением ИС этих приборов для зрительного анализатора (рис. 2). Кроме того, попытка усилить освещение станций с помощью традиционных ЛЛ и современных КЛЛ далеко не везде приводит к улучшению световой среды. В подавляющем большинстве случаев освещение станций осталось хуже нормативного, что показано на рис. 3, полученном расчётом по программе «DIALux evo 7.0» при использовании в качестве исходных данных измеренные КСС бра с ЛН мощностью 100 Вт и КЛЛ мощностью 30 Вт.

При этом значительные размеры светящего тела ЛЛ и КЛЛ по существу обесценивают роль огранички стеклянных рассеивателей (плафонов) этих ОП, зрительно «играющей» при относительно небольших размерах тела накала ЛН, под которые эти ОП в подавляющем большинстве были «заточены» [2]. Кроме того, возможностей

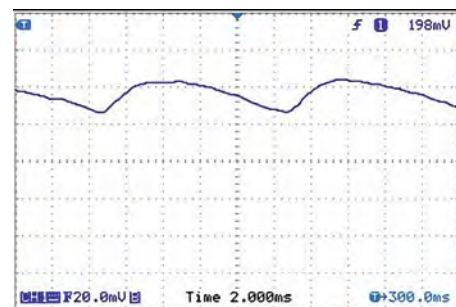


Рис. 2. Характерный уровень пульсации светового потока ЛЛ

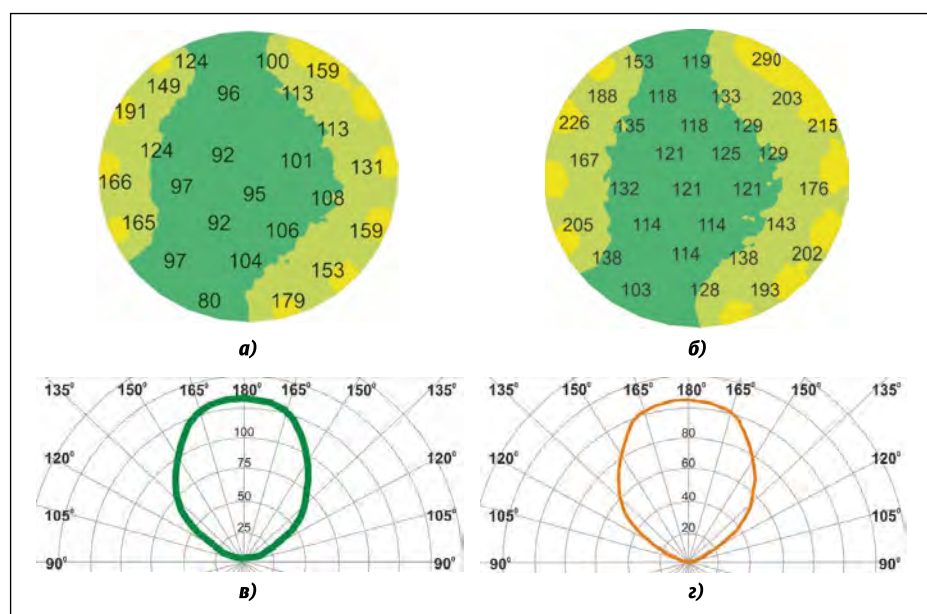


Рис. 3. Распределение освещённости (лк) на полу вестибюля и межэскалаторного аванзала: а и б – при использовании ЛН и КЛЛ с цоколем E27 соответственно; в и г – КСС «рожка» ОП (бра-«рожок») с ЛН мощностью 100 Вт и КЛЛ мощностью 30 Вт соответственно

Рис. 4. Внешний вид потолка вестибюля и характер его освещения до реконструкции ОП: а – внешний вид; б – распределение освещённости (лк)

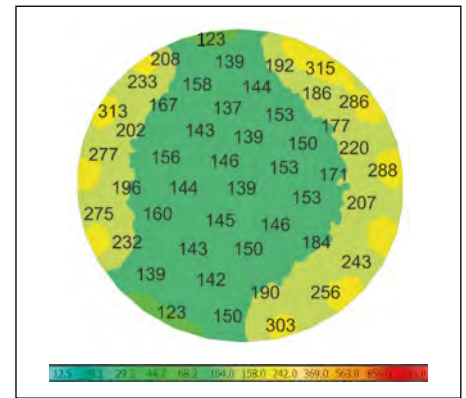


Рис. 6. Распределение освещённости (лк) на полу межэскалаторного аванзала, при увеличении светового потока на 2000 лм



а)



б)

Рис. 5. ОП на станции «Красные Ворота» до реконструкции: а – бра; б – люстра

ОП, наиболее используемых сегодня и тем более в 30-х годах, не хватает для должного освещения архитектурных зон, определяющих лицо станций, например потолков, характер освещения которых ОП с традиционными ИС показан на рис. 4.

Появление мощных белых СД позволяет¹ решать задачи реконструкции и реставрации указанных ОП.

При решении этих задач необходимо также помнить, что модернизация освещения должна осуществляться посредством минимальной номенклатуры максимально унифицированных ИС, обеспечивающих работу ОП с учётом особенностей их обслуживания. Кроме того, формирование комфортной световой среды может обеспечиваться полнее согласованием изменения цветовой температуры ИС с циркадным биоритмом человека, к примеру с 4200–3700 К с утра до 3200–2800 К к вечеру [7, 8].

Очевидно, комплексное решение подобных задач должно осуществляться в контексте формирования общей световой среды, соответствующей

современным требованиям к архитектурному освещению конкретной станции (в нашем случае, объекта культурного наследия станции «Красные Ворота»), с сохранением исторического внешнего вида ОП, используемых в первоначальном проекте 1935 года.

В качестве объектов исследования были выбраны ОП (люстры и бра) с прозрачным стеклянным рассеивателем /плафоном/ (рис. 5), устанавливаемые и на многих других станциях Московского метрополитена (с незначительными различиями в художест-

венном оформлении и конструкции), таких как «Проспект Мира» (кольцевая), «Комсомольская» (кольцевая), «Киевская» (кольцевая) и «ВДНХ».

Их работа показана здесь на примере вестибюля и межэскалаторного аванзала станции «Красные Ворота». По проекту 1935 года пространство межэскалаторного аванзала освещается 11 бра с 4 цилиндрическими стеклянными рассеивателями с призматической огранкой, ранее с ЛН мощностью 100 Вт [9], затем с КЛЛ мощностью 30 Вт.

Как уже отмечалось, уровень освещения (рис. 3), создаваемый этими бра и с ЛН, и с КЛЛ, не соответствует современным нормативным требованиям. При этом анализ показывает, что простое увеличение светового потока, например, на 2000 лм (рис. 6), не избавляет от всех указанных недостатков из-за несовершенства используемой схемы освещения этой станции². Поэтому для освещения вестибюля и меж-

² Качество освещения от этого скорее ухудшится, т.к. незначительно большее освещение пола сопровождается резким повышением зрительного дискомфорта (при «нера-

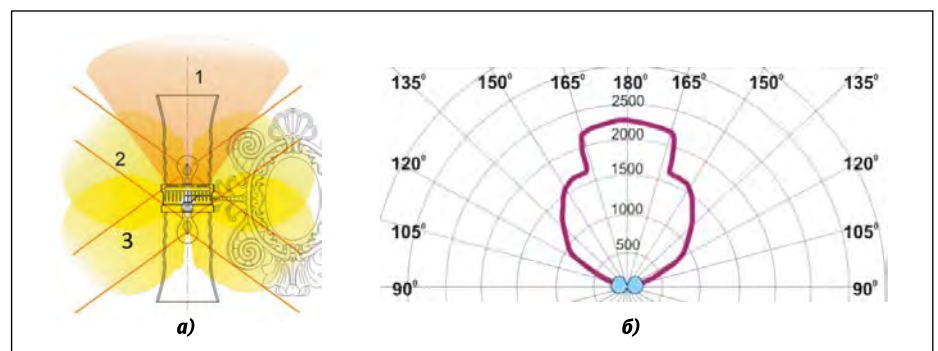


Рис. 7. Принцип технического решения ОП (бра):

а – схема зонального деления светового потока ОП: его доля в зоне 1 – за счёт СД модуля, а доли в зонах 2 и 3 – СД ламп «Philips LED Filament» (с цоколем E27); б) КСС ОП с этими источниками света

¹ При условии преодоления их основного недостатка – наличия в спектре энергетически значимого (чрезмерно) и вредного для зрительного аппарата синего компонента [3–6].

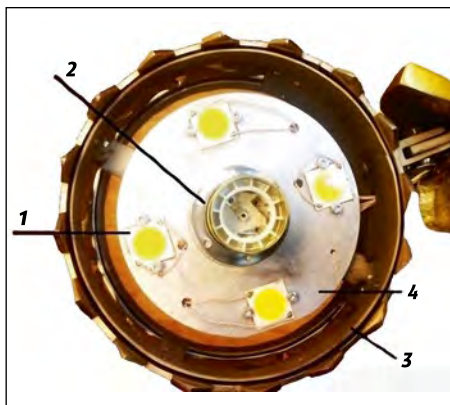


Рис. 8. Внешний вид СД модуля, установленного на радиаторе: 1 – СД матрица; 2 – патрон E27; 3 – декоративное кольцо с крепёжной арматурой; 4 – радиатор

эскалаторного аванзала была предложена схема, по которой световой поток каждого ОП (бра, люстры) разделяется на 3 зональных (рис. 7). В зоне 1 световой поток в 7000 лм генерируется СД модулем с 4 СД матрицами, расположенным в основании рассеивателя внутри декоративного кольца ОП так, чтобы исключалось попадание излучения в поле зрения пассажиров (рис. 8). Этот поток направляется на потолок и от него отражается (рис. 9). Световые потоки в зонах 2 и 3, по 800 лм каждый, формируются СД лампой

ботающем» потолке) при, соответственно, большем расходе электроэнергии.

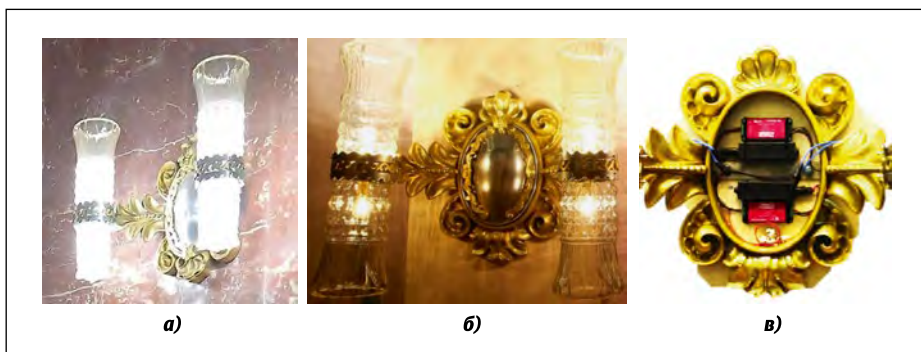
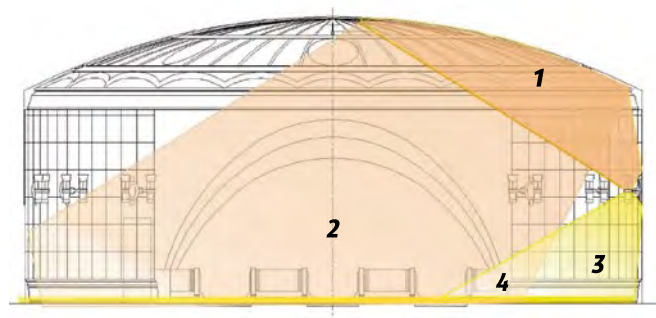


Рис. 10. Внешний вид ОП (бра) в рабочем состоянии: а – до реконструкции; б – после реконструкции; в – размещение блока питания и управления (для СД модуля и обеспечения аварийного освещения)



Рис. 11. Внешний вид освещаемого потолка межэскалаторного аванзала: а – до реконструкции; б – после реконструкции (инсталляция)

Рис. 9. Схема освещения межэскалаторного аванзала – зоны распространения: основной части светового потока ОП, создаваемой СД модулем, (1) и её отражения (2); части светового потока ОП, создаваемой СД лампой (3); суммы частей 2 и 3 (4)



серии «Philips LED Filament» с 6 СД нитями, расположенными под углом, который обеспечивает необходимую «игру света» на огранке рассеивателя и создаёт «иллюзию» [10] основного ИС, освещающего всё пространство зала в режиме рабочего освещения без ослепления пассажиров из-за низкой яркости светящего тела. Остальные части светового потока ОП создают требуемый уровень освещения стены и пола под ним (рис. 9).

Очевидно, предлагаемое техническое решение дороже решения с тривиальной заменой ламп, поэтому такое удорожание должно компенсироваться сокращением эксплуатационных расходов, что достижимо, в основном, из-за большего срока службы СД ламп.

При этом блок питания и управления в ОП, расположен на несущем кронштейне под декоративным кожухом, что способствует сохранению

исторического внешнего вида ОП (рис. 10) при обеспечении функциональности, соответствующей современным требованиям.

В режиме аварийного освещения работают только нижние части ОП с указанными СД лампами, что обеспечивает суммарную освещённость на полу порядка 60 лк; при этом питание ИС производится от резервной цепи постоянного тока с номинальным напряжением 100 В, для чего блок питания и управления имеет отдельный полюсный вход.

В целом, предложенная конструкция ОП полностью исключает дискомфорт [11] (средний обобщённый показатель дискомфорта $UGR = 10$) и одновременно обеспечивает необходимый уровень освещённости и равномерность распределения освещённости как на представляющем художественную ценность потолке (рис. 11), так и на полу (рис. 12), при снижении суммарной потребляемой мощности на 50 %.

Расчёты освещённости и UGR при реализации предлагаемой схемы освещения проводились также по программе «DIALux evo 7.0» при использовании в качестве исходных данных измеренные КСС ОП (бра) с указанными СД модулем и СД лампами, мощностью 7,5 Вт (рис. 12).

Аналогично решается задача освещения вестибюля, с той лишь разницей, что для обеспечения равномерного освещения потолка СД матрицы (в СД модуле) снабжены дополнительным цилиндрическим рассеивателем, «развёртывающим» световой пучок вдоль линии лепнины. С этой же целью также используется первый торшер эскалатора (выполненный по техническому решению, описанному в [12, 13]), ИС которого обеспечивает дополнительное освещение крайней зоны лепнины потолка.

Из распределения освещённости на полу и потолке вестибюля (рис. 13)

Рис. 12. Распределение освещённости (лк) на полу межэскалаторного аванзала после реконструкции в рабочем (а) и аварийном (б) режимах освещения

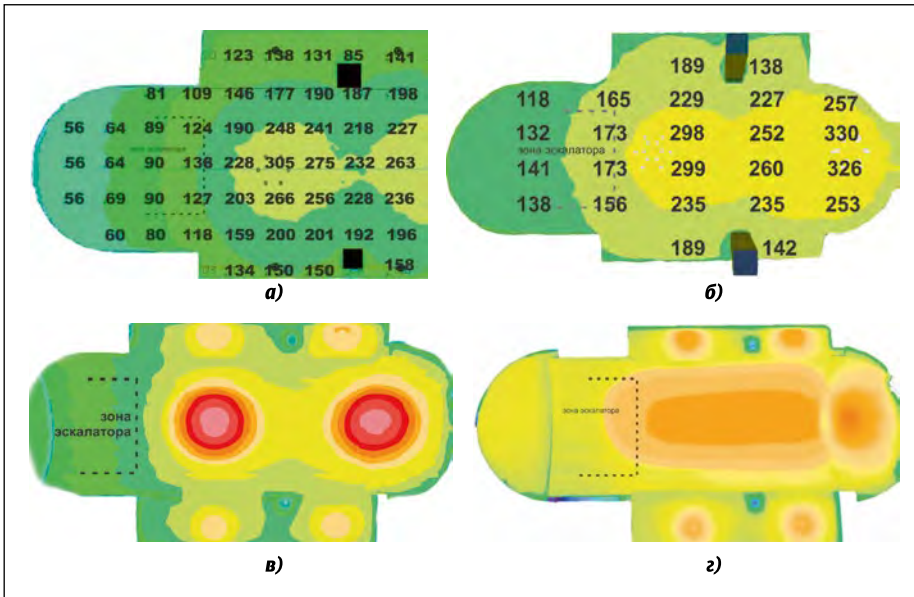
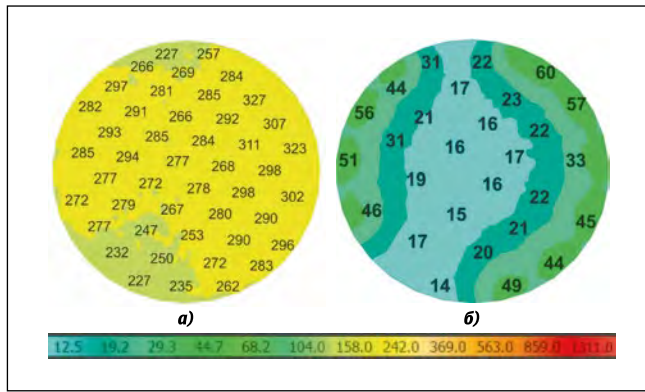


Рис. 13. Распределение освещённости (лк) на полу и потолке вестибюля: а – на полу до реконструкции; б – на полу после реконструкции; в – на потолке до реконструкции; г – на потолке после реконструкции

видно, что после реализации проекта потолок «заработал». На полу тоже все зоны достаточно равномерно освещены (в полном согласии с требованиями [1]), при необходимом уровне освещения и расчётном $UGR \leq 20$).

Заключение

В работе сформулированы принципы реконструкции ОП для метрополитена с прозрачными рассеивателями (плафонами), обеспечивающими, при замене малоэффективных ИС (ЛН и ЛЛ) на СД ИС:

- сохранение «исторического» облика ОП;
- выполнение требований [1] по уровню освещения станционных зон при отсутствии зрительного дискомфорта, снижении потребляемой мощности и соблюдении требований, предъявляемых к объектам культурного наследия.

К большому сожалению, при проведении реставрационных работ на станции «Красные Ворота» в 2017 г. представленные выше результаты работы авторов Метрополитен полностью проигнорировал, и потому на отреставрированной станции продолжают гореть ОП со «старыми» ЛЛ и КЛЛ (с их пульсирующим световым потоком и низким качеством цветопередачи), не отвечающие современным требованиям [1, 14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санитарно-эпидемиологические правила СП 2.5.1337-03 «Санитарные правила эксплуатации метрополитенов».
2. Горбачёв Н.В., Ратнер Е.С. Освещение московского метро: предварительное сообщение // Светотехника. – 1935. – № 1. – С. 2–13.
3. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Транспортная светотехника: риски здоровью персона-

ла и пассажиров // Анализ риска здоровью. – 2016. – № 3. – С. 4–12.

4. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Синий свет светодиодов – новая гигиеническая проблема // Анализ риска здоровью. – 2016. – № 1(13). – С. 15–25.

5. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Нарушение меланопериодического эффекта сужения зрачка – фактор риска заболевания глаз // Анализ риска здоровью. – 2017. – № 1. – С. 132–148.

6. Бижак Г., Кобав М.Б. Спектры излучения светодиодов и спектр действия для подавления секреции мелатонина // Светотехника. – 2012. – № 3. – С. 11–16.

7. Демидов В. Как мы видим то, что видим [издание 3-е, перераб. и доп.]. – Берлин: Ни Т. Раритетные издания, 2010. – 280 с.

8. Блатнер П. Световая среда для человека: наука, промышленность и закон // Светотехника. – 2016. – № 1. – С. 45–49.

9. ГОСТ Р 52706–2007 «Лампы накаливания вольфрамовые для бытового и аналогичного общего освещения. Эксплуатационные требования».

10. Новаковский Л.Г., Аллаш Е.Х., Мирас Ж.-П. «Световой прибор для формирования светового пучка» // ПМ № 159921 РФ. 2016. Бюл. № 5.

11. ГОСТ 33392–2015 «Здания и сооружения. Метод определения показателя дискомфорта при искусственном освещении помещений».

12. Новаковский Л.Г., Казовский Н.И., Каневский А.В., Песелис Ю.А. Осветитель эскалаторной балюстрады метрополитена / Решение от 03.2017 г. № 2017107716 о выдаче патента на ПМ.

13. Новаковский Л.Г., Феофанов С.А. Правильное освещение эскалатора метрополитена – набор радикальных решений // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 20–26.

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



Новаковский Леонид Григорьевич, кандидат техн. наук. Окончил в 1969 г. МАМИ. Директор ООО «Фарос-Алеф»



Феофанов Сергей Александрович, кандидат техн. наук. Окончил в 2005 г. МАДИ. Старший научный сотрудник ООО «Фарос-Алеф»

Новый метод оценки работы адаптивных кинетических солнцезащитных устройств¹

М. ТЕКСОЙ¹, О. ДУРСАН²

¹ Компания *Teksoy Yapı Mimarlık Ltd*, Турция. E-mail: mustafateksoy@teksoyyapi.com

² Университет Яшар, Измир, Турция. E-mail: onur.dursun@yasar.edu.tr

Аннотация

Определение управляющих параметров кинетических солнцезащитных устройств представляет собой проблему, которую лучше всего решать расчётными методами. В то же время, затраты на проведение расчётов, позволяющих получить почти оптимальное решение, потребовали исключения многих конструктивных решений и погодных условий. В этой связи, в данном исследовании предлагается новый подход, позволяющий осуществить адекватное рассмотрение пространства проектных решений и произвести оценку работы адаптивных кинетических солнцезащитных устройств (АКСЗУ). Современный подход основан на суррогатном методе многокритериальной оптимизации управляющих параметров АКСЗУ на основе выбранных произвольным образом часов светлого времени суток. Для оценки правильности результатов, полученных предлагаемым методом, был проведён контрольный эксперимент. Эмпирические данные говорят о том, что АКСЗУ имеет преимущества перед статическими солнцезащитными устройствами в части регулирования естественного освещения и вида из окна. Что же касается температуры в помещении, то никаких существенных различий выявлено не было.

Ключевые слова: адаптивный, кинетический, солнцезащита, дневной свет, температура, вид из окна, моделирование, суррогатный, оптимизация.

1. Введение

Управление солнечным светом всегда было важным аспектом архитектурного проекта, так как оно имеет огромное значение как для энергосбережения, так и для обеспечения комфорта. Правильный подход к управлению солнечным светом, основанный

на использовании солнцезащитных устройств, позволяет должным образом регулировать температуру в помещении и естественное освещение и, тем самым, вносит вклад в энергосбережение, одновременно обеспечивая комфортные условия для находящихся в помещении людей [1]. Регулирование уровня солнечного освещения фасада здания до попадания солнечных лучей в помещения является очень эффективным методом регулирования солнечного света [1–3]. Соответственно, для выполнения этой задачи на фасадах устанавливают статические солнцезащитные устройства (ССЗУ). Однако статические устройства не способны реагировать на изменяющиеся внешние условия и связанные с обеспечением комфорта требования. В [4] был сформулирован острый вопрос: «Логично ли утверждать, что статическая система может решать динамические задачи?».

Для решения этой проблемы были предложены адаптивные кинетические солнцезащитные устройства (АКСЗУ), которые и являются предметом данного исследования. По определению, АКСЗУ относятся к активным солнцезащитным устройствам. В них входят компоненты, способные изменяться в соответствии с изменениями окружающих условий, что достигается посредством автоматического изменения их положения. Для того, чтобы быть адаптивными, солнцезащитные устройства должны иметь подвижные детали, приводы, систему управления и датчики и быть запрограммированы таким образом, чтобы реагировать определённым образом на получаемые от датчиков данные. При проектировании кинетической системы, которая учитывает изменения во времени, задача существенно усложняется. С другой стороны, прогресс в области вычислительной техники и появление новых методов расчётов позволили исследователям решить эту проблему.

Как один из подразделов системы автоматизированного проектирова-

ния, ориентированное на рабочие характеристики комплексное параметрическое проектирование и оптимизация рабочих характеристик помогают принимать обоснованные проектные решения. Однако обеспечиваемая в процессе проектирования информационная обратная связь имеет свою цену – увеличение продолжительности расчётов. Большинство эмуляторов, которые генерируют подобную проектную информацию, вычислительно трудоёмки. В данном исследовании управления солнечными солнцезащитными устройствами, которое реагирует на внешние условия, проблема большой продолжительности расчётов становится ещё более важной, так как определение значений параметров, необходимых для управления солнцезащитой, должно занимать очень мало времени.

Критический обзор литературы по вопросу АКСЗУ показал, что в большинстве исследований проектные задачи слишком сильно упрощались из-за большой сложности этих задач и стоимости проведения расчётов (например, [5–9]). Подобные упрощения могут привести к недостаточному охвату пространства проектных решений. Например, в [10] и [11] для рассмотрения проектных решений, обеспечивающих наилучшее естественное освещение, использовался метод метаэвристического поиска, а именно, генетический алгоритм. В этом случае для получения оптимального проектного решения требуется чрезмерное количество имитаций. В результате стоимость расчётов была чрезвычайно высокой, так как в случае основанной на моделировании оптимизации нужно моделировать каждого представителя «населения» при заданном количестве поколений. С другой стороны, в [12] утверждалось, что при решении архитектурных задач оптимизация на основе суррогатной модели лучше, чем основанная на моделировании оптимизация, как с точки зрения затрат на проведение расчётов, так и с точки зрения получения хороших решений. Например, в [13] была разработана основанная на искусственной нейронной сети прогнозирующая модель для определения уровней естественного освещения в офисных зданиях, расположенных в г. Измире, Турция. Параллельно с этим, в [14] суррогатные модели были использованы для про-

¹ Перевод с англ. Розовского Е.И.

гнозирования влияния внутренних составленных из полос жалюзи на уровни освещённости, причём погрешности прогнозирования оказались очень низкими. В обеих этих работах ([13] и [14]) рассматривалось только естественное освещение, без учёта как теплового режима, так и связанных со зрительным комфортом моментов, таких как вид из окна. В [15] искусственная нейронная сеть использовалась для обеспечивающего требуемого естественного освещения управления непредсказуемым поведением наружной солнцезащитной системы, приводившейся в действие клеточными автоматами. Однако в этой работе главное внимание уделялось методам обучения нейронных сетей, а не влиянию предложенной АКЗСУ на комфорт и энергосбережение.

В предшествующих работах проводились не только оценка работы солнцезащитных устройств вычислительными методами, но и сравнение статических и адаптивно-кинетических солнцезащитных устройств (например, [7, 9, 16, 17]). Во всех упомянутых работах исследователи пришли к выводу, что кинетические солнцезащитные устройства лучше статических. Однако рассмотренные ими ССЗУ не были оптимизированы. Кроме того, ни в одной из этих работ наряду с вопросами теплового режима и естественного освещения в качестве параметра не рассматривался вид из окна, представляющий собой один из наиболее важных аспектов архитектурного проекта. И наконец, в качестве основы для сравнения рассматривался только один момент времени. А именно, сравнение проводилось только к одному моменту времени в году, например, к 11:00 в июле. Поэтому любые результаты, полученные в рамках этих ограничений, имеют ограниченную ценность.

Для заполнения бреши в литературных данных, в этом исследовании предлагается новый подход, позволяющий осуществить адекватное рассмотрение пространства проектных решений и произвести оценку работы АКЗСУ. Современный подход основан на суррогатном методе многокритериальной оптимизации управляющих параметров АКЗСУ на основе выбранных произвольным образом часов светлого времени суток. Для оценки правильности результатов, полученных предлагаемым методом, был

проведён контрольный эксперимент, который подробно описан в разделе 2. Эмпирические данные говорят о том, что АКЗСУ имеет преимущества перед ССЗУ в части регулирования естественного освещения и вида из окна. Что же касается температуры в помещении, то никаких существенных различий выявлено не было.

2. Методика

В данном исследовании использован количественный подход к оценке работы солнцезащитных устройств, для реализации которого была предло-

жена новая методика расчётов (рис. 1). Затем этот подход был апробирован в рамках сравнительного исследования оптимизированных применительно к году ССЗУ и АКЗСУ с почасовой оптимизацией. Предполагалось, что применительно к заданным эксплуатационным показателям АКЗСУ превзойдут оптимизированные ССЗУ. Для проверки этой гипотезы был разработан контролируемый эксперимент, в рамках которого с использованием расчётных методов было исследовано влияние независимых количественных переменных на выбранные эксплуатационные показатели.

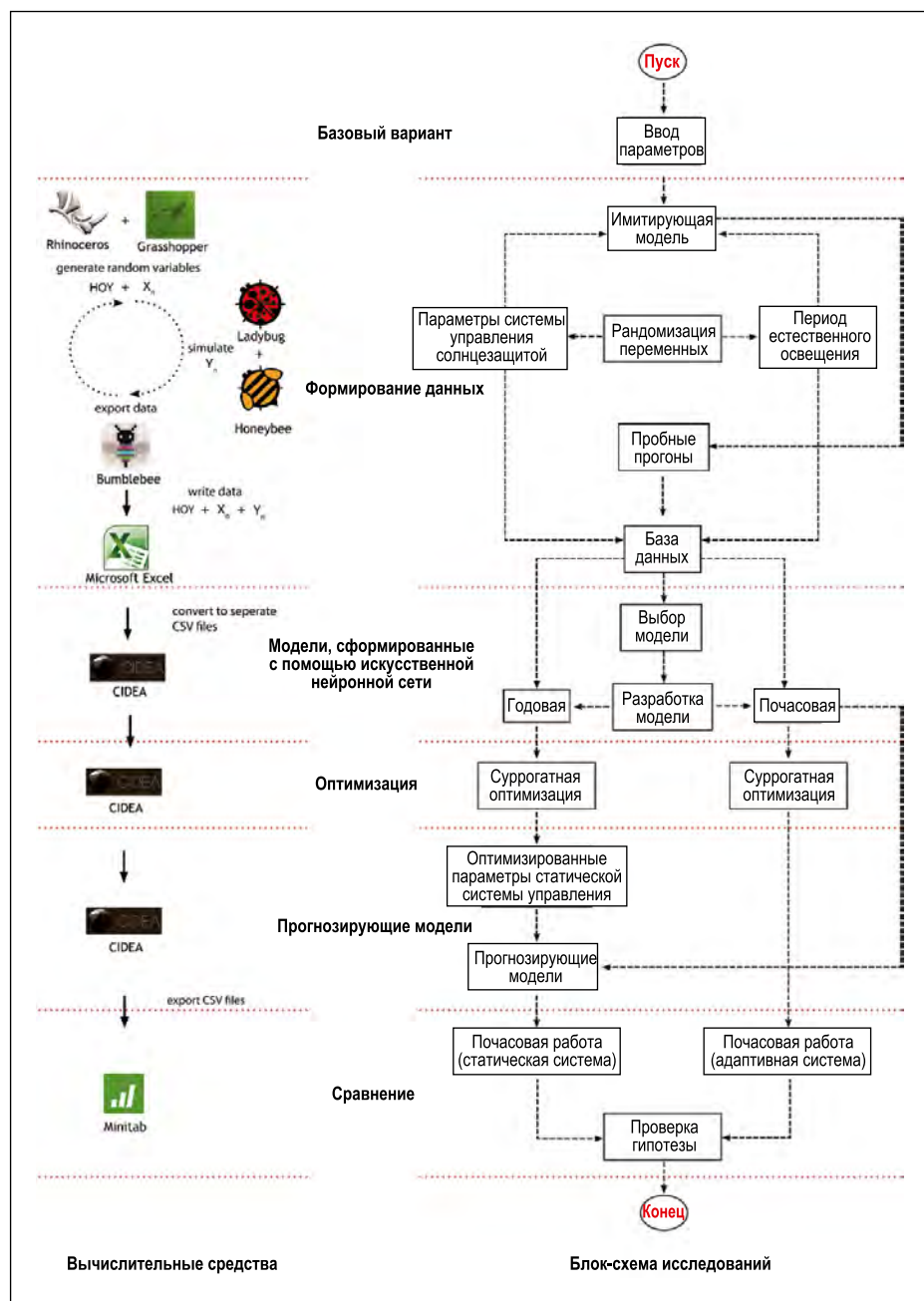


Рис. 1. Использовавшиеся вычислительные средства и блок-схема экспериментального проектирования

В данном исследовании были рассмотрены три эксплуатационных показателя. Первый эксплуатационный показатель, обозначенный как $|\Delta T|$, представляет собой абсолютное значение разности между расчётной температурой воздуха внутри гипотетического помещения и равным $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ опорным значением температуры. Второй эксплуатационный показатель, обозначенный как $|Lux|$, представляет собой абсолютное значение разности между средним расчётным значением освещённости внутри гипотетического помещения и равным 500 лк опорным значением освещённости. И наконец, третий эксплуатационный показатель, обозначенный как *View*, представляет собой среднее процентное соотношение между участком, реально наблюдаемым из заданной точки внутри помещения, и всем доступным для наблюдения изнутри помещения участком.

2.1. Характеристики гипотетического помещения

При планировании эксперимента в первую очередь было выбрано помещение для исследования наружных солнцезащитных устройств. При всех вариантах солнцезащитных устройств характеристики этого помещения оставались неизменными. Были рассмотрены зависимые параметры установленных на здании годично оптимизированных солнцезащитных устройств и АКЗСУ. В качестве места нахождения гипотетического помещения был выбран г. Измир, Турция. Важно подчеркнуть, что для того, чтобы исключить влияние прочих воздействующих факторов и, тем самым, ис-

следовать влияние на выбранные эксплуатационные характеристики одних только солнцезащитных устройств, в рамках данного эксперимента передача тепла была возможна только от южного фасада. Более того, считалось, что отсутствуют любые внутренние тепловые нагрузки. Исходные характеристики гипотетического помещения приведены в таблице.

2.2. Выбор параметров солнцезащитного устройства – независимые (выбираемые) переменные

Выбор параметров солнцезащитных устройств производился при помощи алгоритмической платформы моделирования *Grasshopper*. Геометрия солнцезащитного устройства генерировалась посредством разделения на шесть частей поверхности, отстоящей от южного фасада на 5 см (рис. 2). Это должно было обеспечить позонное управление предполагаемой солнцезащитной системой. Впоследствии каждая из этих частей была дополнительно разделена на 30 участков. Эта операция позволила получить дерево данных с шестью списками, в каждый из которых входит по 30 элементов. Каждая из поверхностей образует горизонтальную пластинку солнцезащитного устройства размером $0,03 \times 1,49\text{ м}$. Для всех поверхностей была предусмотрена возможность поворота вокруг горизонтальной оси. Входящие в разные списки солнцезащитные поверхности управлялись независимо друг от друга посредством задания параметров поворота X_1, \dots, X_6 , которые могли принимать значения от $0,00$ до $180,00$ градусов. Отметим, что для

обеспечения честного сравнения конструкции СЗСУ и АКЗСУ были одинаковыми.

2.3. Введение эксплуатационных показателей в параметрическую модель

Введение эксплуатационных показателей в параметрическую модель было выполнено при помощи хорошо известных дополнительных модулей для *Grasshopper* (*Ladybug* и *Honeybee*), разработанных в целях оказания помощи проектировщикам при исследованиях и оценке экологических показателей вариантов проектов на стадии разработки концепции. При помощи программ, входящих в пакет *Ladybug*, можно импортировать в *Grasshopper* погодные файлы *EnergyPlus* (*EPW*) и проводить различные анализы окружающей среды, основанные на ранее зарегистрированных локальных временных данных. Пакет *Honeybee* содержит программы, совмещающие визуальную среду программирования *Grasshopper* с различными надёжными спецпроцессорами для моделирования, такими как *EnergyPlus*, *Radiance*, *Daysim* и *OpenStudio* [18]. Интегрированный и гибкий подход к проектированию можно с лёгкостью реализовать с помощью этих дополнительных модулей и предоставляемой платформой *Grasshopper* визуальной среды разработки скриптов. При помощи *Grasshopper* можно сформировать различные проектные параметры и связанные с ними рабочие характеристики для проведения дальнейших исследований.

2.4. Создание базы данных

Учитывающая рабочие характеристики параметрическая модель была сформирована для рассмотрения вариантов в пределах проектного пространства и определения выходных параметров СЗСУ и АКЗСУ. Предшествующая параметрическая модель включала в себя шесть независимых переменных и три выходных параметра, которые будем называть эксплуатационными показателями. Следующим шагом была автоматизация процесса генерации и регистрации в базе данных случайных независимых переменных для обеспечения управления участками солнцезащитных устройств и их расчётных эксплуатационных ха-

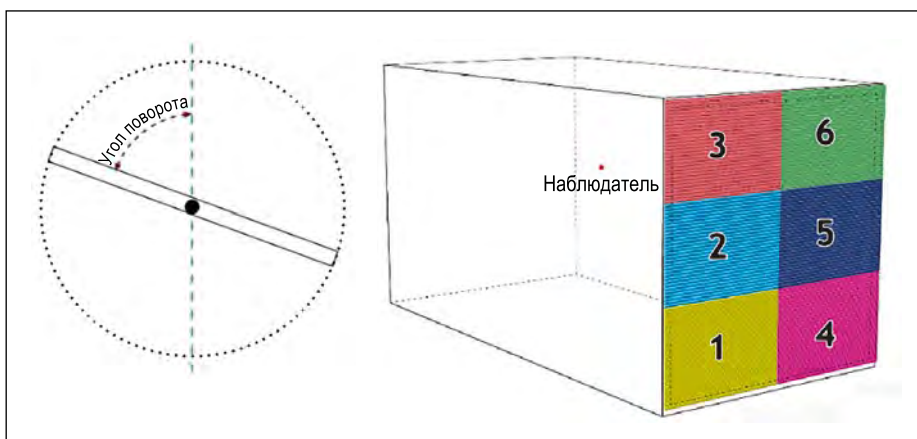


Рис. 2. Наружная система солнцезащиты с шестью контрольными зонами (справа) и схема с одним параметром управления солнцезащитой (слева)

рактических. Для этого использовался следующий алгоритм:

- Шаг 1: генерация 6 случайных значений, входящих в область изменения управляющих параметров солнцезащитного устройства (независимые переменные).
- Шаг 2: моделирование естественного освещения, энергетической ситуации и вида из окна для каждого сформированного сценария.
- Шаг 3: занесение независимых проектных параметров и зависимых выходных параметров солнцезащитных устройств в электронные таблицы.
- Шаг 4: повторение (итерация) вышеописанного процесса 500 раз для каждого часа.
- Шаг 5: изменение часа года.
- Шаг 6: повторение (итерация) 50 раз.

В [19] отмечалось, что подвыборка данных из метеорологической базы, например, рассмотрение только одного дня каждого месяца, в конце концов приведёт к искажению результатов, так как будут исключены разные состояния неба. Однако целью данного исследования было не получение среднегодовых данных, а исследование ситуации в заданный момент времени. По этой причине из всех дневных часов года были случайным образом выбраны 50 часов, который попадали в промежуток между 9:00 и 17:00.

Моделирование осуществлялось на почасовой основе для выбранных случайным образом моментов года. Приписывая значимым переменным случайные значения, лежащие в пределах заданного диапазона, было реализовано 500 моделей для каждого из 50 выбранных случайным образом часов. В случае статической солнцезащиты сформированная случайным образом совокупность 500 примеров была реализована применительно к году. В результате было сделано 25500 прогнозов, позволивших сформировать 51 базу данных для дальнейшей разработки суррогатных моделей. После каждого прогноза независимые и связанные с ними переменные, содержащие сведения о работе устройств для каждого часа и года, сохранялись в отдельных электронных таблицах. По окончании процесса формирования базы данных каждая из таблиц была преобразована в данные, разделённые запятыми (CSV).

2.5. Разработка суррогатных моделей

В случае рассматриваемого в данном исследовании экспериментального проекта суррогатные модели играют главную роль, так как они решают две важные задачи. Во-первых, они используются в качестве целевых функций в рамках последующего процесса оптимизации. Так как они устанавливают причинно-следственные связи между входными и выходными переменными, то в данной работе эти связи используются для проведения одновременной оценки эксплуатационных показателей. Во-вторых, они обеспечивают прогнозирование эксплуатационных показателей ССЗУ для рассматриваемого дня/часа года, что облегчает сравнение с эксплуатационными показателями, полученными в случае АКЗСУ.

Для разработки суррогатных моделей использовалась искусственная нейронная сеть прямого распространения (FAAN). В такой нейронной сети связь допустима только от узла в слое к узлу в следующем слое. Многослойная сеть прямого распространения – это очень популярная и хорошо зарекомендовавшая себя конфигурация искусственных нейронных сетей, которая использовалась во многих областях применения, таких как прогнозирование и аппроксимация функций [20]. Для этого класса нейронных сетей характерно наличие скрытых слоёв между входным и выходным слоями сети. Скрытый слой содержит скрытые нейроны, которые не видны напрямую ни из входного, ни из выходного слоя [21]. Подготовленные для данного исследования модели относятся к классу многослойных перцептронов (MLP), так как они содержат один скрытый слой, а не только входной и выходной слои. В подробном обзоре [20] отмечается, что искусственной нейронной сети с одним скрытым слоем достаточно для аппроксимации любой сложной нелинейной функции с любой степенью точности. Так что количество скрытых слоёв не рассматривалось в процессе выбора модели, целью которого было определение наилучшей нейронной сети и предотвращение избыточного обучения сети.

Формированию MLP предшествовал выбор моделей для каждого из показателей, целью которого было опре-

деление архитектуры сети. В случае нейронной сети, предназначенной для моделирования АКЗСУ, сетевая модель тестировалась с использованием набора данных, соответствующих случайно выбранному часу, а не применительно ко всем 50 наборам данных. Сеть, показавшая себя наилучшим образом применительно к выбранному часу, затем использовалась для моделирования АКЗСУ и применительно к остальным 49 часам. В случае оптимизируемых применительно к году ССЗУ такой проблемы не было, так как в сетевых моделях использовался только один набор данных, характеризующих работу устройства в течение года.

Для перекрёстной проверки на достоверность к выбору модели и к процессу обучения нейронной сети был применён метод Монте-Карло.

В рамках метода Монте-Карло случайная выборка данных была разделена на две случайные подвыборки с коэффициентом 0,1. Это значит, что для обучения нейронной сети использовались 450 случайных наблюдений из набора данных (что соответствует 0,9 от общего количества наблюдений). Для оценки способности обученной сети к прогнозированию использовались остальные 50 наблюдений (контрольная выборка). Этот процесс повторяли 10 раз, случайным образом выбирая новые обучающие и контрольные выборки. Критерием оценки при проведении перекрёстной проверки служит среднеквадратичная погрешность (RMSE)², которую следует свести к минимуму.

После того, как для моделей были выбраны архитектуры нейронной сети и количества итераций, сети обучали с использованием данных, содержащихся в сформированных в результате моделирования наблюдений. MLP обучали при помощи алгоритма обратного распространения (Resilient Back-Propagation – RProp). RProp представляет собой алгоритм быстрого обучения MLP, осуществляющий локальную адаптацию посредством модификации весов с использованием интеграла вероятности ошибок. Подробное описание обучающего алгоритма, который использовался в данной работе, содержится в [22]. Разработанная в [23] вычислительно-

$$^2 RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y - \hat{y})^2}$$

Исходные параметры блочной модели

Параметры		Значения
Местоположение		Измир, Турция
Размеры	Ширина, м	3
	Глубина, м	6
	Высота, м	3
Коэффициент отражения	Пол, %	30
	Потолок, %	80
	Стены, %	50
	Солнцезащитное устройство (наружное), %	40
Коэффициент теплопередачи	Стены (кроме южной)	Адиабатический процесс
	Крыша	Адиабатический процесс
	Пол	Адиабатический процесс
	Окно, Вт·К/м ²	2,39
	Южная стена, Вт·К/м ²	0,49
Внутренние нагрузки	Оборудование, Вт/м ²	
	Скорость инфильтрации (м ³ /с)/м ²	0,003
	Облучённость, Вт/м ²	0
	Количество людей, чел./м ²	0
Окно	Ориентация	Юг
	Площадь остекления, м ²	7,84
	Отношение площади окна к площади стены	0,87
	Конструкция окна	Двойное стекло с низкой излучательной способностью
Стекло	Тип	Прозрачное стекло
	Коэффициент пропускания в видимой области	0,79
	Показатель преломления	1,52

интеллектуальная среда принятия решений при архитектурно-строительном проектировании использовалась для разработки суррогатной модели и проведения многокритериальной оптимизации.

2.6. Многокритериальная оптимизация – целевые функции

Алгоритм *НурЕ* использовался для получения оптимального решения для $|\Delta T|$, $|\Delta E|$ и *View*. В [24] *НурЕ* был предложен в качестве эволюционного алгоритма многокритериальной оп-

тимизации, основанного на показателях качества многомерного индикатора. В этой работе было проведено сравнение этого алгоритма с другими эволюционными алгоритмами оптимизации, такими как *NSGA-II*, *SPEA2* и т.д. Полученные результаты показали, что *НурЕ* превосходит все прочие алгоритмы при решении задач многокритериальной оптимизации с размерностью, большей чем 2. Так что алгоритм *НурЕ* представляется подходящим для решения трёхмерной задачи оптимизации, которая была сформулирована применительно к ис-

следованиям наружных солнцезащитных устройств.

В соответствии с постановкой задачи, $|\Delta T|$ и $|\Delta E|$ следует минимизировать, а *View* – максимизировать. Это привело к явно конфликтной ситуации. На стадии оптимизации, алгоритм *НурЕ* обращался к нейронным сетям при рассмотрении каждой из целевых функций.

В данной работе при оптимизации использовались устанавливаемые по умолчанию параметры, обеспечившие генерацию 100 поколений, популяция каждого из которых насчитывала 100

членов, тогда как размерность многомерных образцов и вероятности мутаций были, соответственно, приняты равными 5000 и 0,1. Для получения наилучших вариантов проектных решений, основанный на суррогатном методе способ оптимизации был реализован применительно к обоим типам солнцезащитных устройств. При оптимизации АКЗЗУ было сделано 50 прогонов для каждого выбранного случайным образом часа дня. В случае ССЗУ для выбора наилучшего варианта применительно к году в целом была проведена всего одна оптимизация. В конце этого процесса мы извлекли из каждого из 51-го процесса оптимизации 100-е поколение, которое было использовано в дальнейшем.

2.7. Проверка гипотез

В данной работе предполагалось, что применительно к заданным эксплуатационным показателям АКЗЗУ превзойдут оптимизированные ССЗУ. Соответственно, были проверены следующие гипотезы:

- $H_{alt,1} = |\Delta T_{responsive}| - |\Delta T_{static}| \leq 0$.
- $H_{alt,2} = |\Delta E_{responsive}| - |\Delta E_{static}| \leq 0$.
- $H_{alt,3} = View_{responsive} - View_{static} \geq 0$,

где $H_{alt,1}$, $H_{alt,2}$ и $H_{alt,3}$ – гипотезы 1, 2 и 3 соответственно, ΔT – изменение температуры, ΔE – изменение освещённости, $View$ – вид из окна; нижние индексы: *responsive* – АКЗЗУ, *static* – ССЗУ.

Программа эксперимента предусматривает сравнение усреднённых характеристик одного образца для разных вариантов, когда данные находятся в непрерывной области. Один и тот же набор параметров измеряли для двух разных вариантов – статического и адаптивно-кинетического. Так что для формальной проверки гипотез подходит парный *t*-критерий Стьюдента.

3. Результаты и обсуждение

По завершении успешной реализации экспериментального подхода, подробно описанного выше, было получено 50 наборов оптимизированных выходных параметров для 50-ти выбранных случайным образом дневных часов в случае АКЗЗУ и один набор

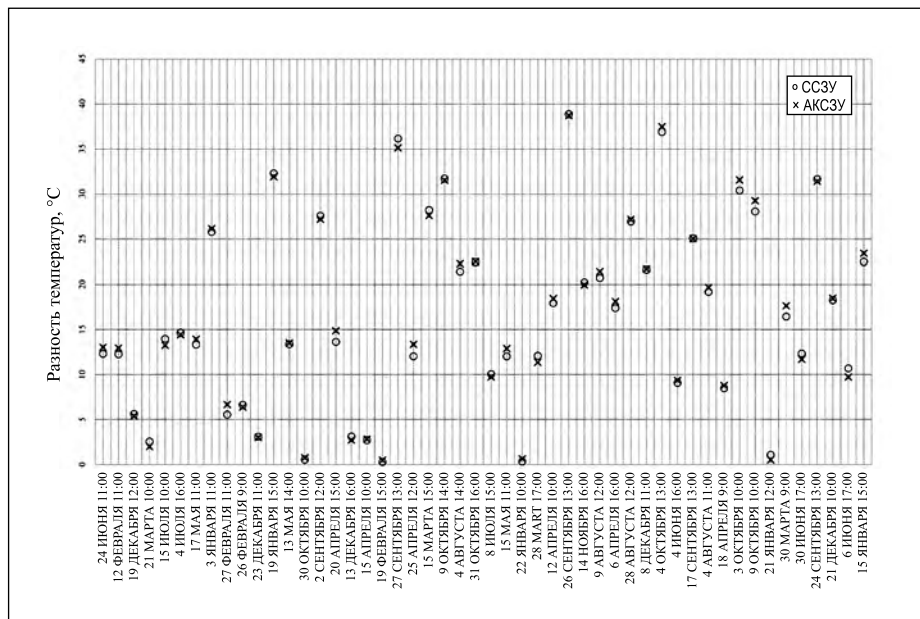


Рис. 3. Сравнение средних значений $|\Delta T|$ в случаях ССЗУ и АКЗЗУ

оптимизированных выходных параметров для ССЗУ. Каждый из этих 51-го набора данных включал в себя 100 оптимизированных вариантов проектных решений.

Перед реализацией основанной на суррогатном методе оптимизации, с использованием основанного на моделировании метода были проведены несколько предварительных исследований работы АКЗЗУ применительно к выбранным случайным образом дневным часам. Основными целями этих исследований были проверка правильности методики эксперимента, а также определение времени, требуемого для получения почти оптимального решения при использовании основанного на моделировании метода. В ходе предварительных исследований почти оптимальные решения для только одного дня года были получены за более чем 60 ч расчётов. То есть, если архитектор выбрал традиционный основанный на моделировании метод расчётов для оценки работы АКЗЗУ применительно к, скажем, 50-ти выбранным случайным образом часам года, то для решения этой задачи ему потребуется примерно 125 дней. С другой стороны, использование суррогатной модели приводит к существенному уменьшению времени расчётов. При исследовании работы АКЗЗУ применительно к 50-ти выбранным случайным образом дневным часам, на проведение всех расчётов потребовалось примерно 90 ч, причём большая часть

расчётов выполнялась компьютером в автоматическом режиме.

В рамках этого исследования были рассмотрены три гипотезы. Во всех случаях предполагалось, что АКЗЗУ проявит себя лучше, чем оптимизированное ССЗУ. Однако результаты, полученные при помощи парного *t*-критерия Стьюдента, говорят о том, что гипотезами $H_{alt,1}$ и $H_{alt,3}$ пренебречь нельзя, а гипотезой $H_{alt,2}$ – можно. Это означает, что АКЗЗУ превосходит ССЗУ в части естественной освещённости и вида из окна, тогда как в части влияния на температуру в помещении эти два типа солнцезащитных устройств друг от друга не отличаются.

Первой целевой функцией была оптимизация $|\Delta T|$. И мы ожидали, что в случае АКЗЗУ $|\Delta T|$ будет меньше. Однако полученные результаты говорят об отсутствии достаточных доказательств, позволяющих с уровнем значимости 0,05 считать, что в случае АКЗЗУ среднее значение $|\Delta T|$ будет меньше, чем в случае ССЗУ. Мы установили, что среднее значение $|\Delta T_{responsive}|$ оказалось равным 16,77 °C, тогда как среднее значение $|\Delta T_{static}|$ оказалось равным 16,60 °C. В расположенном в г. Измире выходящем строго на юг помещении, АКЗЗУ обеспечивает не лучшие, чем оптимизированные ССЗУ, уровни теплового комфорта и энергоэффективности. При этом следует подчеркнуть, что в данной работе одновременно рассматривались и другие целевые функции задачи оптими-

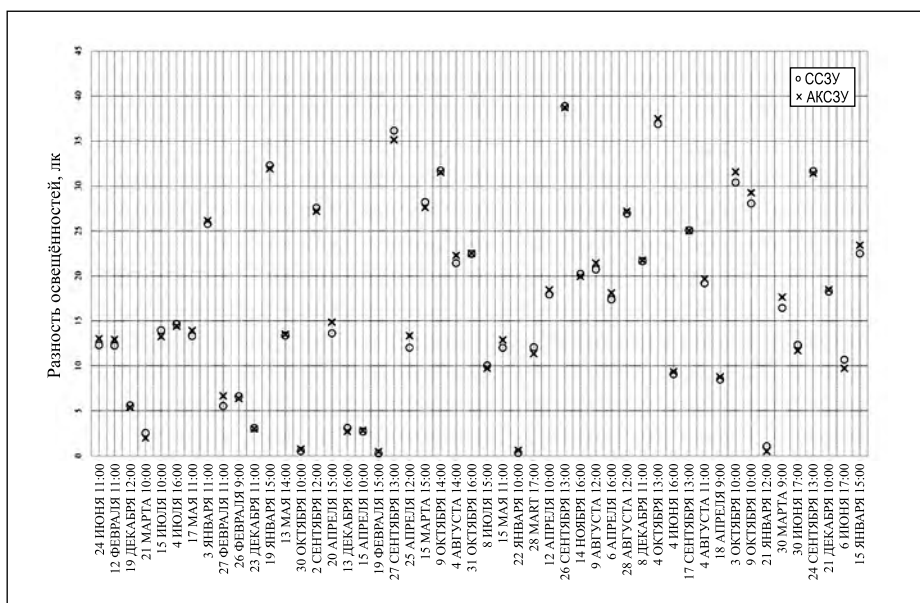


Рис. 4. Сравнение средних значений $|\Delta E|$ в случаях ССЗУ и АКСЗУ

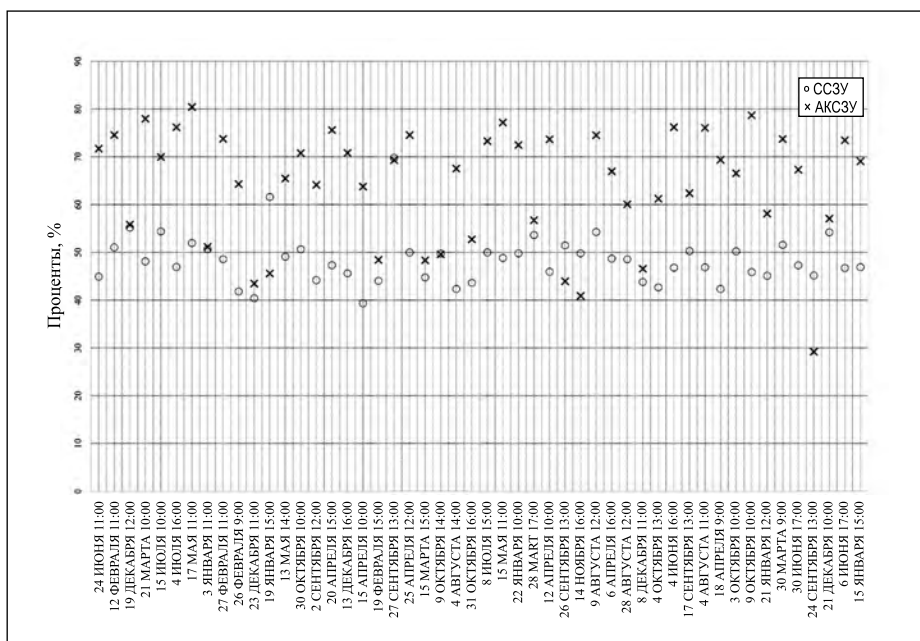


Рис. 5. Сравнение средних значений $View$ в случаях ССЗУ и АКСЗУ

зации. Максимизация функции «вид из окна» может повлиять на результат, так как это явно противоречивый параметр при большинстве погодных условий. На рис. 3 приведены результаты применения парного t -критерия Стьюдента к сравнению значений $|\Delta I|$ для выбранных случайным образом часов.

Второй целевой функцией была оптимизация $|\Delta E|$. Как и в случае первой целевой функции, в данной работе требовалось минимизировать $|\Delta E|$, с тем чтобы среднее значение естественной освещённости оказалось по возможности максимально близким к 500 лк. При сравнении значений

$|\Delta E|$ было установлено с уровнем значимости 0,05, что АКСЗУ работает значительно лучше, чем оптимизированное ССЗУ. Было получено, что средние значения $|\Delta E_{responsive}|$ и $|\Delta E_{static}|$ оказались, соответственно, равными 420 и 1277 лк. Так что применительно к естественной освещённости АКСЗУ оказалась примерно в три раза лучше, чем оптимизированное ССЗУ. Однако следует отметить, что пять из парных разностей оказались нетипичными, то есть различия в пределах пары оказались большими, чем во всех остальных случаях (рис. 4). Это обстоятельство привело к увеличению средней разности в целом. Тем не ме-

нее, можно быть на 95 % уверенными в том, что реальная средняя разность составляет не менее чем 507 лк, и с вероятностью 90 % утверждать, что она попадает в интервал между 507 и 1206 лк.

Последней целевой функцией при описываемой оценке работы солнцезащитных устройств была выраженная в процентах реализуемая часть вида из окна помещения ($View$). Эта функция подлежит максимизации, так что желательными являются как можно более высокие значения $View$. Полученные результаты говорят о том, что средние значения $View_{responsive}$ и $View_{static}$ составляют, соответственно, 64,2 и 48,4 %. На основании этого мы и пришли к вышеизложенному выводу, что применительно к этому параметру АКСЗУ в среднем существенно лучше, чем оптимизированное ССЗУ, с уровнем значимости 0,05. Можно быть на 95 % уверенными в том, что реальная средняя разность составляет более чем 12,7 %, и с вероятностью 90 % утверждать, что она попадает в интервал между 12,7 и 18,7 %. Результаты парного сравнения параметра $View$ приведены на рис. 5.

Полученные результаты можно связать с программой исследования. Единственной целью этого исследования было определение влияния солнечного света на условия внутри помещения. Солнечные лучи оказывают двойное действие: они нагревают помещение и освещают его. Тепловая энергия не может отражаться, она только излучается. И то, и другое солнцезащитные устройства сходным образом перехватывают вне здания тепловую энергию, переносимую солнечными лучами. Однако применительно к управлению создаваемым солнечными лучами освещением, АКСЗУ оказались значительно лучше, чем ССЗУ. Вывод о преимуществах АКСЗУ подкрепляется результатами рассмотрения входящей в формулировку проектной задачи целевой функцией, которая связана с видом из окна и не является динамической переменной, и при этом вступает в конфликт с прочими целевыми функциями.

4. Заключение

В данной работе описан новый способ адекватной оценки вариантов проектных решений и оптимизации рабо-

ты АКЗЗУ применительно к целевым функциям $|\Delta T|$, $|\Delta E|$ и *View*. Необходимость разработки такого способа обусловлена отсутствием адекватной и эффективной методики рассмотрения и оценки работы АКЗЗУ. Кроме того, в литературе эта проблема до сих пор рассматривалась без одновременного учёта температуры, освещённости и вида из окна. Полученные результаты говорят о том, что при использовании предложенного способа можно добиться существенно уменьшения времени расчётов по сравнению с временем, затрачиваемым в случае основанных на моделировании методов. Неожиданным было то, что оптимизированное ССЗУ оказалось несколько лучше, чем АКЗЗУ, в части целевой функции $|\Delta T|$. Что касается $|\Delta E|$ и *View*, то эмпирические данные говорят о том, что АКЗЗУ существенно превосходят оптимизированные ССЗУ.

В дальнейшем следует рассмотреть связь между погодными условиями, проектными переменными и целевыми рабочими характеристиками солнцезащитных устройств. Определённые климатические параметры, такие как освещённость и облучённость, создаваемые суммарным солнечным излучением, следует извлечь из погодных файлов и сопоставить с проектными и выходными параметрами, получив на выходе картину их взаимосвязи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hausladen, G., de Saldanha, M., Liedl, P. *Climate Skin*. Basel: Birkhauser, 2008.
2. Fathy, H. *Natural Energy and Vernacular Architecture*. Chicago and London: The University of Chicago Press, 1986.
3. Olgyay, A., Olgyay, V. *Solar Control and Shading Devices*. New Jersey, 1977.
4. Lechner, N. *Sustainable Design Methods for Architects*. New Jersey: Wiley, 2015.
5. Du Montier, C., Potvin, A., Demers, C.M. Energy and daylighting potential for Adaptive Façades: Evaluation of movable insulated panels // Proc. of Int. Conf. on Adaptation and Movement in Architecture ICAMA 2013, October 2013, Toronto, Canada.
6. Grobman, Y.J., Capeluto, I.G., Austern, G. External shading in buildings: comparative analysis of daylighting performance in static and kinetic operation scenarios // *Architectural Science Review*. – 2016. – Vol. 60, No. 2. – P. 1–11, 2016.

7. Kensek, K., Hansanuwat, R. Environment Control Systems for Sustainable Design: A Methodology for Testing, Simulating and Comparing Kinetic Façade Systems // *Journal of Creative Sustainable Architecture & Built Environment*. – 2011. – Vol. 1, No. 11. – P. 27–46.

8. Lee, D.S., Koo, S.H., Seong, Y.B., Jo, J.H. Evaluating thermal and lighting energy performance of shading devices on kinetic façades // *Sustainability (Switzerland)*. – 2016. – Vol. 8, No. 9. – P. 1–18.

9. Nielsen, M.V., Svendsen, S., Jensen, L.B. Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight // *Solar Energy*. – 2011. – Vol. 85, No. 5. – P. 757–768.

10. El Sheikh, M., Gerber, D.J. Building Skin Intelligence // Proc. of the annual conf. of the Association of Computer Aided Design in Architecture ACADIA, 2011, pp. 170–177.

11. Sharaidin, K., Burry, J., Salim, F. Integration of Digital Simulation Tools With Parametric Designs to Evaluate Kinetic Façades for Daylight Performance // *Physical Digitality: Proc. of the 30th eCAADe Conf.*, 2012, Vol. 2, pp. 701–709.

12. Wortmann, T., Costa, A., Nannicini, G., Schroepfer, T. Advantages of surrogate models for architectural design optimization // *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. – 2015. – Vol. 29, No. 4. – P. 471–481.

13. Kazanasmaz, T., Günaydin, M., Binol, S. Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings // *Building and Environment*. – 2009. – Vol. 44, No. 8. – P. 1751–1757.

14. Hu, J., Olbina, S. Illuminance-based slat angle selection model for automated control of split blinds // *Building and Environment*. – 2011. – Vol. 46, No. 3. – P. 786–796.

15. Skavara, M.E. Adaptive cellular automata façade trained by artificial neural network. Barlett School of Graduate Studies, University College of London, 2009.

16. Lee, E.S., DiBartolomeo, D.L., Selkowitz, S.E. Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office // *Energy and Buildings*. – Vol. 29, No. 1. – P. 47–63.

17. Wagdy, A., Fathy, F., Altomonte, S. Evaluating the Daylighting Performance of Dynamic Façades by Using New Annual Climate- Based Metrics Evaluating the Daylighting Performance of Dynamic Façades by Using New Annual Climate – Based Metrics // Proc. of the 32nd Int. Conf. on Passive and Low Energy Architecture, PLEA 2016. August 2016, Los Angeles, CA. – P. 941–947.

18. Sadehipour Roudsari, M., Pak, M. Ladybug: a Parametric Environmental Plugin for Grasshopper To Help Designers Create an Environmentally-Conscious Design // 13th Conf. of Int. building Performance Simulation Association, 2013, pp. 3129–3135.

19. Nabil, A., Mardaljevic, J. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings // *Lighting Research and Technology* // 2005. – Vol. 37, No. 1. – P. 41–59.

20. Zhang, G., Patuwo, B.E., Hu, M.Y. Forecasting with artificial neural networks: The state of the art // *Int. journal of forecasting*. – 1998. – Vol. 14. – P. 35–62.

21. Haykin, S. *Neural Networks and Learning Machines*. 2009.

22. Riedmiller, M., Braun, H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm // Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks, 1993, pp. 586–591.

23. Chatzikonstantinou, I. A Computational Intelligence Decision-Support Environment for Architectural and Building Design: CIDEA // IEEE Congress on Evolutionary Computation 2016, pp. 3887–3894.

24. Bader, J., Zitzler, E. HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization // *Evolutionary Computation*. – 2008. – Vol. 19, No. 1. – P. 45–76.



Мустафа Тексой (Mustafa Teksoy),

M. Sc. Окончил Университет Яшар (2017 г.). Партнёр и главный архитектор компании Teksoy Yapı Mimarlık Ltd, Турция. Область научных интересов:

компьютерное проектирование, архитектурная роботехника, долговечные и экологичные здания



Онур Дурсан (Onur Dursun),

Dr.-Ing. (2014 г.). Доцент архитектурного факультета Университета Яшар, Турция. Область научных интересов: оценка эксплуатационных

показателей при проектировании зданий и экономика строительства

Значение инсоляционного планшета для оценки инсоляционного режима городских территорий и зданий

А. И. ГИЯСОВ

НИУ «МГСУ», Москва

E-mail: adham52@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена актуальным проблемам современного градостроительства – разработке инсоляционного планшета и его широкому применению в решении градостроительных задач для летнего тёплого периода с целью создания комфортных инсоляционной, световой и микроклиматической сред в помещениях зданий и на территориях городской застройки.

Ключевые слова: инсоляция, инсоляционный планшет, освещённость, солнечная радиация, здания, застройка, микроклимат, комфорт среды.

Данная статья касается разработки конструкции инсоляционного планшета (ИП), предназначенного для практических оценок качественных и количественных показателей режима инсоляции помещений и территории городской застройки для летнего тёплого периода на разных географических широтах.

Солнечная радиация имеет чрезвычайно большое биологическое и гигиеническое значение и является мощным оздоровительным и профилактическим фактором, оказывающим положительное психофизиологическое воздействие на человека. При этом нормативные требования регламентируют дозирование инсоляции помещений, территорий и окружающей человека среды [1–5], так как влияние инсоляции на жизнедеятельность человека может быть как положительным (дополнительный обогрев и освещение помещений в холодное время года, бактерицидное действие), так и отрицательным (перегрев среды помещений летом, дискомфортное освещение, блёскость, разрушающее действие солнечных лучей) [6, 7].

Повышение инсоляции в летний период вызывает у человека ряд негативных реакций, в частности вызывает напряжение его терморегуляцион-

ного аппарата, ослабление местных и системных иммунных реакций, нарушение работы сердечно-сосудистой системы и обострение герпетических инфекций.

В летние месяцы при длительном облучении зданий и деятельной поверхности городской застройки в помещениях и на территории застройки формируется перегревный дискомфортный микроклимат, который определяет дозирование инсоляции и солнцезащиту помещений жилых и общественных зданий и городских территорий [4].

В связи с этим в решении градостроительных задач – разработке объёмно-планировочной структуры застройки и определении высоты, ориентации зданий по сторонам света, величины разрывов между ними, мест для детских, хозяйственных и иных площадок – должны учитываться требования к инсоляционной среде, дифференцированные по назначениям зданий, территорий и административного района.

В разработке проектов детальной планировки микрорайонов и городских территорий нередко используется интуитивный подход к проектированию архитектурно-планировочных структур застройки, зонированию территории свободных микропространств, формированию элементов благоустройства, озеленения и малых архитектурных форм. По этой причине в летний перегревный период создаётся тепловой дискомфорт окружающей среды человека.

Для оценки качественных и количественных показателей инсоляции летнего тёплого периода помещений зданий и территорий со сложным объёмно-пространственным архитектурно-планировочным решением и предлагается ИП. Он позволяет на стадии проектирования осуществлять предварительное прогнозирование инсоляционного режима и выявлять архитек-

турно-строительные и планировочные средства регулирования радиационного и тепло-ветрового режимов в городских микропространствах.

Научные разработки вопросов инсоляции городов и зданий широко ведутся в нашей стране и за рубежом. К этой проблеме проявляют большой интерес, в частности, архитекторы и гигиенисты, так как инсоляция – важнейший природный фактор градостроительства. Разработаны графики (во множестве) и ИП для оценки нормативной продолжительности инсоляции по нормам для географических зон [8–17].

Требования к инсоляции и солнцезащите помещений зданий выполняются в соответствии с СанПиН [4] и СП [5]. Границы зон по широтам, расчётные дни и нормативная продолжительность инсоляции, а также нормы по солнцезащите жилых помещений квартиры и территории городской застройки представлены в соответствующих нормативных документах [4, 5, 18–21].

Учёт роли теплового воздействия солнечного излучения как определяющего фактора перегрева климатической среды особенно важен в архитектурно-строительном проектировании зданий и городских микротерриторий для жаркого периода года. В связи с этим существуют гигиенические требования по ограничению избыточного теплового воздействия инсоляции на территории жилой застройки [4].

В настоящее время разработано множество способов расчёта нормы продолжительности инсоляции помещений для нормированного диапазона географических широт [4]. Их можно свести к следующему:

- способ расчёта инсоляции, не моделирующий естественный ход инсоляции на плане застройки. Определение качественных и количественных показателей производится по формулам и таблицам;
- способ расчёта, не моделирующий естественный ход инсоляции на плане застройки, дающий показатели инсоляции с помощью карт, диаграмм и графиков с последующими вычислениями по формулам и таблицам;
- способ расчёта, моделирующий естественный ход инсоляции в плане застройки, позволяющий с помощью приборов определять качественные и количественные показатели излу-

чения солнца, преимущественно, для равноэтажной застройки;

- способы расчёта инсоляции с помощью компьютерного программирования. Созданы алгоритмы и программы, позволяющие рассчитывать только качественные показатели инсоляции.

Существующие ИП, приборы и программы рассчитаны на определённое применение и не способны параллельно решать разнообразные архитектурно-планировочные и объёмно-пространственные практические задачи по количественной и качественной оценкам инсоляции. Каждые из приборов и способов расчёта считаются приемлемыми в границах зон по географическим широтам (для нормируемого периода года) для прогнозирования инсоляционного режима в соответствующей области архитектурно-строительного проектирования¹.

Известно также, что вопросы расчётного определения качественных и количественных показателей инсоляции тёплого периода года в указанных выше способах и приборах остались вне поля зрения.

Наряду с существующими приборами, предлагаемый практичный в применении ИП позволяет рассчитывать как качественные, так и количественные показатели инсоляции тёплого периода года на нанесённой схеме плана застройки разноэтажного архитектурно-планировочного образования на стадии проектирования без сложных графических построений.

Принцип действия ИП обусловлен закономерностями взаимодействия видимого движения солнца по небосводу и положения инсолируемого объекта на поверхности земли.

Комплект частей ИП для географических широт, основанный на солнечной геометрии (движении солнца по небосводу в летний тёплый месяц), показан на рис. 1 и 2. ИП разработан на основе астрономических таблиц, географических данных, эталонных номограмм и данных СНиП и СП по строительной климатологии.

Итак, ИП состоит из двух частей – основной (прозрачной и неподвижной), характеризующей дневной ход солнца (рис. 1), и накладной (прозрачной и поворотной вокруг центральной

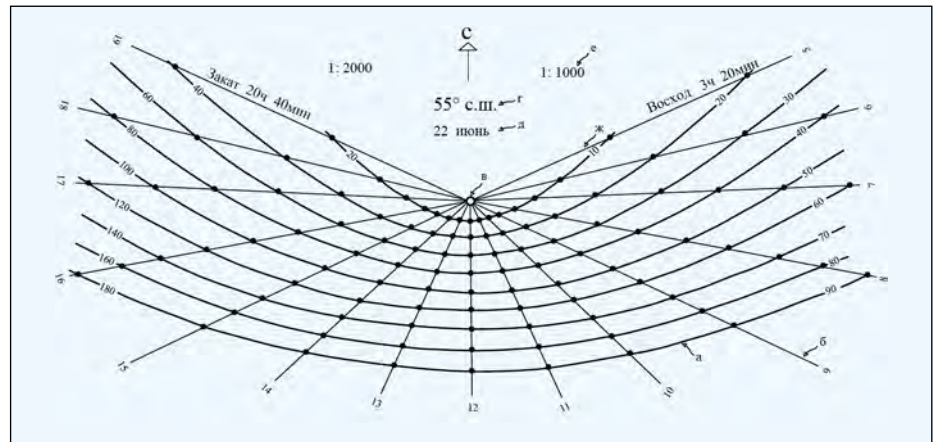


Рис. 1. Инсоляционный планшет дневного хода солнца. Основная часть

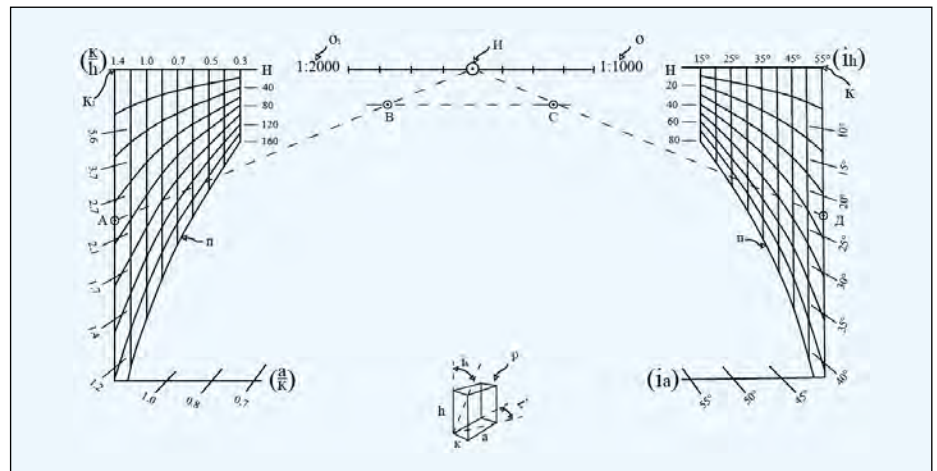


Рис. 2. Инсоляционный планшет. Накладная часть, инсоляционный угол окна

точки), определяющей инсоляционный угол окна (рис. 2).

Основная часть ИП состоит из набора отдельных прозрачных планшеток для северных широт 40, 45, 50, 55 и 60° соответственно, характеризующего дневной ход солнца (рис. 1). К основной части прилагается накладная прозрачная часть, учитывающая горизонтальные и вертикальные инсоляционные углы окна при расчёте качественных и количественных показателей инсоляции помещений (рис. 2). Каждый ИП применим к географическим поясам шириной 5°: например, планшет для 55° с.ш. применим к поясу 52,5–57,5° с.ш.

Скреплённые между собой центральные точки «В» основной и точки «И» подвижной частей ИП совмещаются с инсолируемым объектом застройки, выполненной в масштабе 1:1000 или 1:2000.

Расчёт продолжительности инсоляции помещений зданий разной этажности, в часах, производится на плане застройки визуальным наложением на линию фасада здания скреплённых центральных точек обеих планшеток, согласовывая направление указателя «север» ИП с планировочной схемой застройки. При этом количественное выражение солнечной радиации периода инсоляции, в $Вт/м^2$, подсчитывается, используя таблицу, приложенную к основной части планшета (таблица).

Расчёт продолжительности инсоляции территории разноэтажной городской застройки производится визуальным наложением центральной точки основной части ИП в изучаемую точку планировочной схемы застройки, с последующим сложением данных таблицы прихода солнечной радиации в период инсоляции. Основная часть ИП также предназначена для выявления зон активной инсоляции территории городских структур и построения конверта теней от зда-

¹ В зависимости от конкретного случая объёмно-планировочной структуры городской застройки – этажности зданий, разрыва между ними, ориентации, зонирования микрорайонов, затеняющих элементов, озеленения и благоустройства.

Таблица

Суммарная солнечная радиация, Вт/м²

Ориентация/ Часы	Южная	Восточная	Западная	Горизонтальная плоскость
05	16	294	41	89
06	46	583	58	196
07	78	750	65	314
08	184	786	74	455
09	321	734	76	587
10	447	582	79	691
11	550	385	85	772
12	603	196	199	817
13	550	85	386	772
14	447	79	582	691
15	321	76	734	587
16	184	74	786	455
17	78	65	750	314
18	46	58	583	796
19	16	41	294	89
20	–	17	–	–

ний разноэтажной застройки и площади затенения от зелёных насаждений разного типа в жаркий экстремальный период года.

ИП предназначен для оценки летнего режима инсоляции: 1) фасада и помещений зданий при их разной ориентации, наличии и отсутствии балкона, лоджий и солнцезащитных устройств в условиях разновысотной застройки; 2) территории застройки при разных способах солнцезащиты и озеленения крупнокронными насаждениями.

На ИП время инсоляции приведено к среднему солнечному времени.

Расчёт суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность территории, крыши и вертикальные стены зданий разной ориентации для периода инсоляции производится по данным упомянутой выше таблицы, прилагаемой к основной части ИП (таблица).

В конструкции ИП при расчёте показателей инсоляции помещений зданий, стен фасадов и территории застройки учтён уровень суммарной солнечной радиации, зависящий от

географической широты местности, времени дня в июне месяце, расположения и ориентации поверхности, высоты затеняющих зданий, состояния атмосферы и высоты местности над уровнем моря.

Данные о солнечной радиации периода инсоляции, определяемые по таблице, учитываются при: планировке застройки вновь строящихся и реконструируемых микрорайонов и городов; ориентации и расположении зданий; формообразовании зданий; внутренней планировке зданий; выборе размеров, типа и расположения светопроемов; конструировании солнцезащитных устройств; расчёте ограждающих конструкций на теплоустойчивость; использовании солнечных батарей; благоустройстве, озеленении, обводнении и солнцезащите территорий.

При разработке и реконструкции генеральных планов городов, населённых пунктов и выполнении проектов детальной планировки и схем планировочной организации земельных участков и территорий ИП позволяет прогнозировать качественные и коли-

чественные показатели инсоляционного режима городской территории с выявлением зон и фасадов зданий с активной инсоляцией, что позволяет оценивать комфортность микроклимата.

На этапе составления схемы детальной планировки городской застройки, направленной на повышение комфортности микроклиматической, светоклиматической и биоклиматической среды, ИП позволяет вести проектно-исследовательские работы практического характера следующим образом:

- для фрагмента городской застройки, нанесённой на топографической подоснове посредством ИП, строится инсоляционная карта, включающая инсоляционный график с изолинией 6-, 8-, 10-, и 12-часовой инсоляции и подсчитывается интенсивность прихода солнечной энергии за эти периоды;

- строится конверт теней с выявлением зон наибольшей продолжительности инсоляции, затенения и нагрева поверхностей территории, инсоляции фасадов и помещений с наибольшей продолжительностью инсоляции;

- строится график теней от крупнокронных древесных насаждений, применяемых при составлении дендрологического плана, определяется их месторасположение и плотность с учётом эффекта затенения;

- производится целенаправленное функциональное зонирование территории городской застройки в зависимости от условия инсоляции;

- корректируется (на стадии проектирования) ориентация зданий и определяются разрывы между ними (при решении вопросов планировки и застройки).

ИП имеет широкое применение в решении градостроительных задач для летнего тёплого периода. Специалисты особо отмечают роль ИП в: расчётах продолжительности инсоляции помещений и территории застройки; климатизации зданий; оценках энергоэффективности зданий; определении тепловых нагрузок систем тепло-хладоснабжения зданий; расчёте теплоустойчивости ограждающих конструкций; оценке микроклимата помещений; выборе эффективных защитных мероприятий по борьбе с летним перегревом в помещениях и на территориях застройки; выборе ориентации зданий и их оконных проёмов по сторонам горизонта;

решении светотехнических задач при разных условиях формирования взаимосвязанных зон облучения и затенения в архитектурно-планировочных и объёмно-пространственных городских образованиях; конструировании солнцезащитных установок и гелиосистем, а также в проектировании и строительстве экологических зданий и городов, планировке, застройке, благоустройстве, озеленении и обводнении городских территорий.

В заключение следует отметить, что: 1) применение ИП позволяет решать ряд научно-практических градостроительных задач путём расчёта и оценки количественных и качественных показателей инсоляционного режима, направленного на оздоровление экологической среды городской застройки и зданий в тёплый период года; 2) для широкого применения ИП составлены методические указания по их устройству, принципу действия и использованию в практике проектирования; 3) применение ИП апробировано при разработке генерального плана г. Бука (Узбекистан) и реконструкции г. Душанбе (Таджикистан), а также при подготовке выпускных магистерских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуменер П.И. Изучение терморегуляции в гигиене и физиологии труда. – М.: Медгиз, 1962. – 231 с.
2. Губернский Ю.Д., Лицкевич В.К. Жилище для человека. – М.: Стройиздат, 1991. – 227 с.
3. Банхиди Л. Тепловой микроклимат помещений (расчёт комфортных параметров по теплоощущениям человека). – М.: Стройиздат, 1981. – 247 с.
4. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076–01 «Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий».
5. СП 42.13330.2011 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений (Актуализированная редакция СНиП 2.07.01–89*)».
6. Айзеништат Б.А., Лукина Л.П. Биоклимат и микроклимат Ташкента. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 128 с.
7. Маркус Т.А., Моррис Э.Н. Здания, климат и энергия. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 542 с.
8. Дунаев Б.А. Инсоляция жилища. – М.: Стройиздат, 1979. – 102 с.
9. Дашкевич Л.Л. Методы расчёта инсоляции при проектировании промышлен-

ных зданий. – М.: Гостройиздат, 1963. – 526 с.

10. Масленников Д.С. Основы и методы расчёта условий инсоляции в массовом жилищном строительстве / Автореф. дис. ... к-та техн. наук. – М.: 1968. – 28 с.

11. Оболенский Н.В. Архитектура и солнце. – М.: Стройиздат, 1988. – 207 с.

13. Творовский М. Солнце в архитектуре. – М.: Стройиздат, 1977. – 288 с.

14. Архитектурная физика: Учебник для вузов: Спец. «Архитектура» / В.К. Лицкевич, Л.И. Макриненко, И.В. Мигалина и др.; Под ред. Н.В. Оболенского. – М.: Архитектура-С, 2007. – 448 с.

15. Olgyay V, Olgyay A. Solar control and shading devices. – Princeton, New Jersey: Princeton university press, 1957.

16. Grimmond C.S.B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere // Theoretical and Applied Climatology. – 2006. – Vol. 84, No. 1–3. – P. 3–22.

17. Cocchia A. Smart and Digital City: A Systematic Literature Review / Smart City. Series: Progress in IS. – Springer International Publishing Switzerland, 2014. – P. 13–43. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/bec8/ebf5616f44ae36363cbfbd575ac517642c0a.pdf> (дата обращения: 03.07.2018).

18. СанПиН 2.1.2.2645–10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях».

19. СП 54.13330.2011 «Здания жилые многоквартирные». (Актуализированная редакция СНиП 31–01–2003).

20. СП 160.1325800.2014 «Здания и комплексы многофункциональные. Правила проектирования».

21. СП 118.13330.2012* «Общественные здания и сооружения». (Актуализированная редакция СНиП 31–06–2009).



Гиясов Адхам Иминджонович,

доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1975 г. Таджикский политехнический институт. Профессор кафедры «Проектирование зданий и сооружений» НИУ «МГСУ». Область научных интересов: энергоэффективные здания, архитектурно-строительная физика, инсоляция, аэродинамика и градозащита.

Светильник со светодиодами на солнечных элементах

Компания *MCM Japan Ltd* (Токио) выпустила новую модель светильника «*M Powered*», аккумулятор которой может заряжаться солнечным светом.

Светильник «*M Powered*» в основном предназначен для ежедневного наружного применения. В новейшем варианте «*M Powered Lux Hello Kitty*» использован рисунок «*Hello Kitty*», с популярным персонажем. Предложенная производителем розничная цена этого изделия составляет ¥4000 (без учёта налога).



Светильник «*M Powered*» создан для тех 1,5 млн человек, которые живут без электричества во многих странах и регионах. Сегодня благодаря 250 неправительственным организациям его используют 1,25 млн человек более чем в 110 странах. При наличии солнечных элементов, установленных на верхней поверхности главного блока светильника, его литиево-ионный аккумулятор за 7 ч может полностью заряжаться под действием солнечного света. Полностью заряженный аккумулятор может питать светильник в течение 4–24 ч.

«*M Powered*» содержит 10 СД тёпло-белого света, и его максимальный световой поток составляет 65 лм. Его можно эксплуатировать в 4-х режимах: слабом, среднем, сильном и мигающем. Он также содержит простой СД для показа остаточного уровня зарядки аккумулятора.

Светильник «*M Powered*» имеет степень защиты *IP67* и может использоваться как вне помещений, так и для рассеянного освещения ванных комнат, например.

Он используется после надувания воздухом, а когда не используется, его можно сложить, выпустив из него воздух. Диаметр и высота главного блока светильника – 12,7 и 10,8 см, а его вес – примерно 125 г.

tech.nikkeibp.co.jp/dm/atclen/
31.08.2018



Проект реконструкции осветительных приборов станции метро «Красносельская» Московского метрополитена

К.И. НЕЧАЕВА

ООО «МСК БЛ ГРУПП», Москва

E-mail: ksunechaeva@yandex.ru

Аннотация

Современное состояние станции первой очереди Московского метрополитена «Красносельская», которая была введена в эксплуатацию в 1935 г., не позволяет ей называться объектом культурного наследия, ввиду того, что модернизации освещения, проводившиеся метрополитеном с появлением люминесцентных ламп, более энергоэффективных по сравнению с лампами накаливания, использовавшимися в оригинальных осветительных приборах, заявленных в разработанном архитекторами и оформителями в проекте освещения станции, существенно изменили внешний облик станции, сделав из оригинально оформленной, с точки зрения освещения, станции с цельной, хорошо читающейся архитектурной тектоникой¹, простую, плоскую, ничем не примечательную мало загруженную станцию метро.

В статье описан способ реконструкции освещения станции «Красносельская» с использованием оригинальных осветительных приборов, удовлетворяющий современные нормы и требования, предъявляемые к объектам культурного наследия. Для понимания того, какой станцию задумывали архитекторы, какие изменения происходили с её освещением с течением времени и как это влияло на внешний облик станции и безопасность перевозок пассажиров, проведён исторический анализ развития световой среды станции в течение всего времени её эксплуатации.

Ключевые слова: освещение метро, реконструкция освещения, осветительный прибор, освещённость, по-

¹ Тектоника – это конструктивно-пространственная структура, строение сооружения (в данном случае – платформенного зала), реальная взаимосвязь несущих и несомых элементов конструкций.

казатель дискомфорта, осветительная установка, плафон.

Модернизация освещения станционных пространств первых станций Московского метрополитена, представляющих объекты культурного наследия, является весьма специфической задачей. Основная проблема в данном случае состоит в том, что для сохранения статуса объекта культур-

ного наследия внешний облик станции должен соответствовать первоначальному (рис. 1), что сегодня можно встретить далеко не всегда: часто модернизации, ставившие целью повышение энергоэффективности осветительных установок (ОУ), значительно изменяли внешний вид станций, и, к сожалению, не в лучшую сторону (рис. 2). При этом модернизации освещения привели к тому, что действующие ОУ, зачастую, не отвечают современным нормам освещения [1], что совершенно недопустимо, ведь сегодня метро – это пространство, по которому ежедневно перемещаются тысячи людей, и обеспечение их безопасности – первостепенная задача при реконструкции освещения.

Подобная ситуация сложилась и с одной из первых станций Московского метрополитена «Красносельская», модернизация освещения кото-

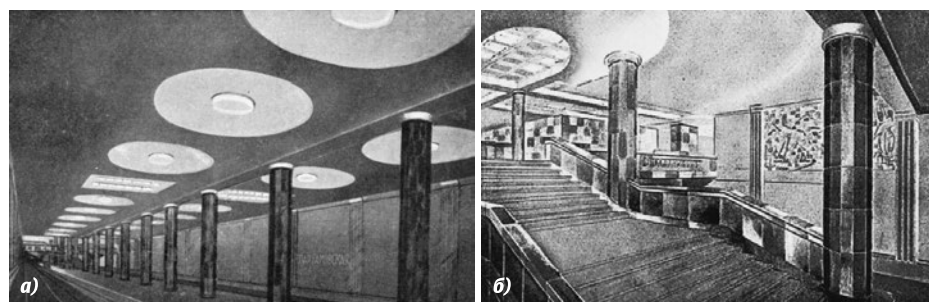


Рис. 1. Эскиз проекта станции «Красносельская»: а) платформа, б) лестничная зона перехода

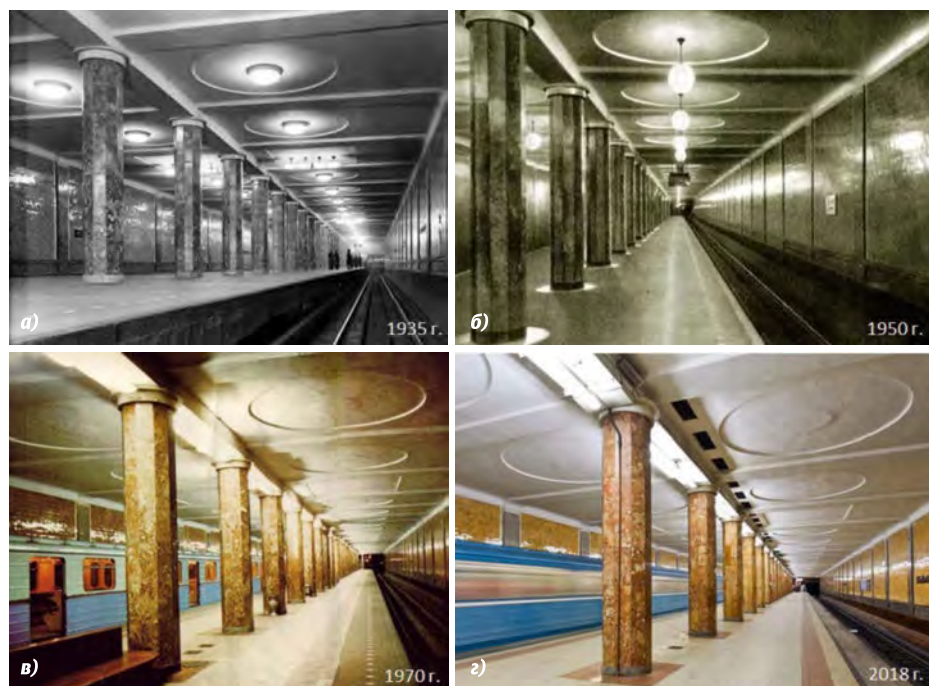


Рис. 2. Внешний облик платформы станции «Красносельская»: а – 1935 г., б – 1950 г., в – 1970 г., г – 2018 г.

рой привела к тому, что современное состояние станции не позволяет ей называться объектом культурного наследия. Для того, чтобы вернуть станции этот статус, необходима полная реконструкция освещения, которую невозможно произвести без ответа на следующие вопросы: какой представляли себе станцию архитекторы и оформители при проектировании, какие осветительные приборы (ОП) и источники света использовались, на какие значения освещённости ориентировались проектировщики и, наконец, как менялась световая среда станции в течение всего времени её эксплуатации? Дать ответы на эти и многие другие вопросы помогли архивные документы 1935 г. [2].

Станция «Красносельская» была открыта 15 мая 1935 г. вместе с ещё двенадцатью станциями первой очереди Московского метрополитена. По проектам архитекторов мастерской № 2 Наркомтяжпрома Б.С. Виленского, В.А. Ершова, В.Ф. Скаржинского и художника Я. Ромаса станция должна была выглядеть, как показано на рис. 1 [2]. Архитекторы стремились визуально выделить круглые и квадратные кессоны, расположенные на потолке станционного зала, задавая тектонику длинному и простому, с точки зрения архитектурного оформления, помещению. Отдельный акцент был сделан на лестничном марше зоны перехода, потолок над которым был украшен кольцеобразной навесной конструкцией, будто парящей в воздухе за счёт оригинального светотехнического решения. Фотографии 1935 г. (рис. 2а) показывают, что архитекторам не до конца удалось воплотить в жизнь свои идеи в оформлении станции, и её внешний вид хотя и был близок к первоначальному проекту, но всё же соответствовал ему не полностью (рис. 1). Ещё больше отличий от проектных эскизов во внешнем виде станции наблюдается сегодня (рис. 2г). На фотографиях 2018 г. сложно узнать старую станцию, несмотря на то, что все конструктивные элементы станции (кессоны, отделанные известняком колонны, настенная плитка, кольцеобразный потолок зоны перехода) сохранились в практически идеальном состоянии (рис. 2, 3). Очевидно, что все значительные изменения во внешнем облике станции связаны с модернизацией ОУ.



Рис. 3. Внешний облик лестничного марша зоны перехода станции «Красносельская»: а – 1935 г., б – 2018 г.

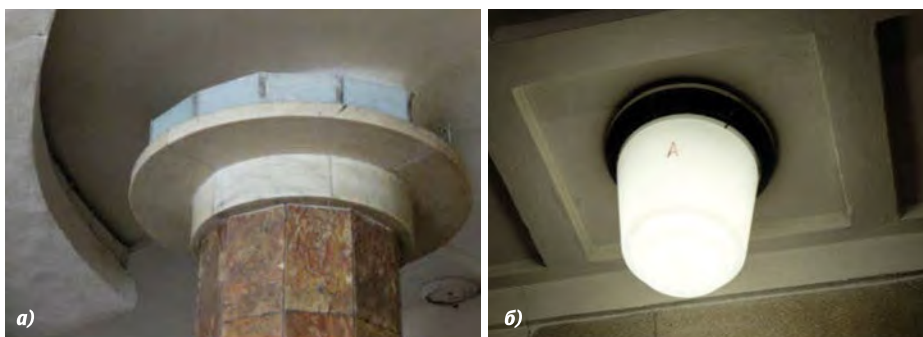


Рис. 4. Сохранившиеся на сегодняшний день первые ОП станции «Красносельская»: а – пластины молочного стекла, используемые для светового оформления лестничного марша; б – светильники зоны перехода

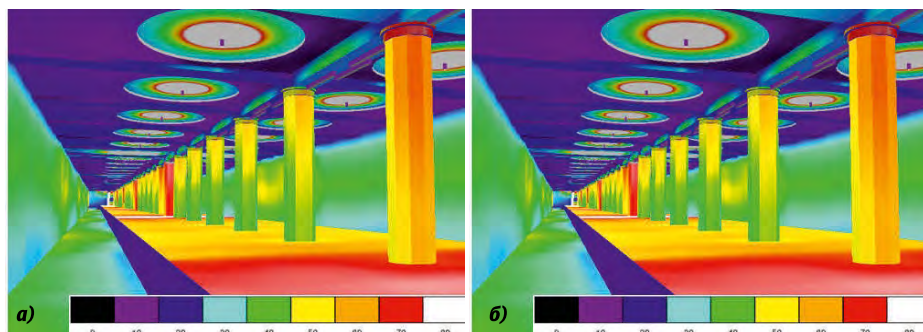


Рис. 5. Результаты светотехнического расчёта для ОУ 1935-го года: а – платформенный зал, б – зона перехода

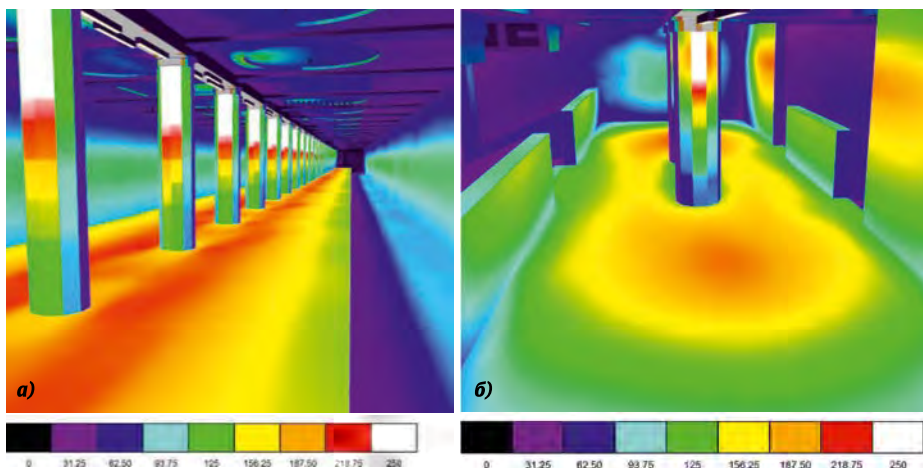
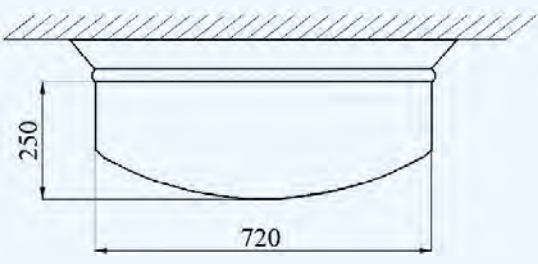
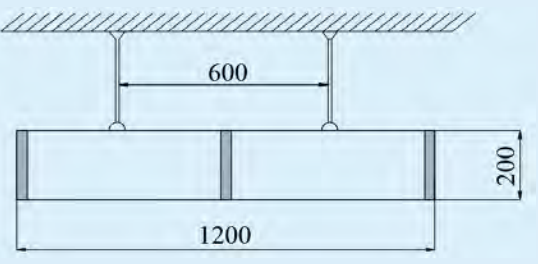
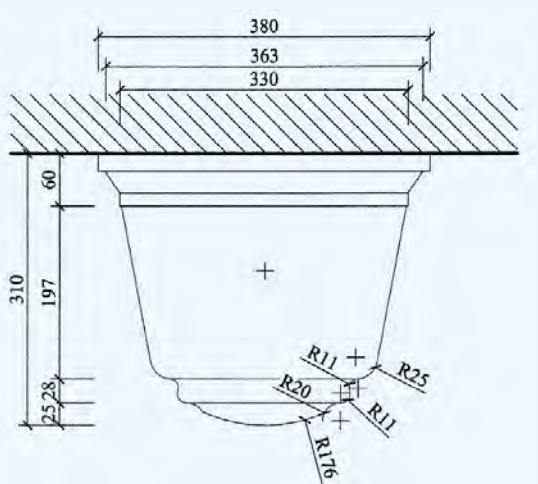


Рис. 6. Результаты светотехнического расчёта ОУ 2018-го года: а – платформенный зал, б – зона перехода

Основные характеристики исторических светильников 1935 г.

№	Наименование светильника	Эскиз светильника	Кол-во и мощность ЛН (шт. x Вт)	КПД, %
1	Плафон D=720 мм		6 x 100 6 x 150	55
2	Цилиндр подвесной		6 x 60	67
3	Светильник для освещения зоны перехода		1 x 150	65

Известно, что в типовых ОП первых станций метрополитена в качестве источника света широко применялись лампы накаливания (ЛН) мощностью от 60 до 150 Вт [2]. Для освещения платформенного зала станции «Красносельская» использовались два типа ОП, основные характеристики которых представлены в табл. 1. В 50-е годы прошлого столетия было принято решение заменить круглые плафоны на подвесные шары, а затем в 70-е годы, с целью повышения энергоэффективности заменить ОП с ЛН на ОП с люминесцентными лампами (ЛЛ). В результате платформенный зал изменился до неузнаваемости: между колоннами были установлены в ряд светильники с ЛЛ, которые значительно увеличили освещённость на полу платфор-

менного зала, но при этом совершенно исказили его облик.

В первоначальном проекте (рис. 3) в зоне перехода по контуру кольцеобразного навеса были установлены ЛН за пластинами из молочного стекла, таким же образом были оформлены и капители колонн зоны перехода (рис. 4а). Это конструктивное решение позволило создать эффект света, появляющегося из ниоткуда, и ощущение, что потолок и колонны парят в воздухе, однако после модернизации освещения в 70-х годах ввиду экономии электроэнергии от такого решения отказались.

Сегодня из всех описанных ранее первых ОП сохранились только два освещающих переход светильника, которые выполняют функцию аварийного освещения современной стан-

ции (рис. 4б), а также несколько пластин молочного стекла, установленных в верхней части одной из колонн (рис. 4а). Все остальные ОП были утрачены.

На основе приведённых данных, станция «Красносельская» была смоделирована в программе *Dialux 4.13* [3], а затем был проведён светотехнический расчёт с ОУ 1935-го года, результаты которого представлены на рис. 5. Для расчёта значений освещённости использовалась КСС аутентичного ОП с ЛН мощностью 60Вт [4]. Расчёт показал, что значения горизонтальной освещённости на поверхности пола в платформенном зале и в зоне перехода вполне соответствуют действующим на тот период нормативам [2], приведённым в табл. 2.

Нормируемые и расчётные значения освещённости в разных зонах станции «Красносельская»

Зона	Платформенные залы			Переходы между станциями			Гребёнки эскалаторов и лестничные марши		
	ОУ 1935 г.	ОУ 2018 г.	Предлагаемая ОУ	ОУ 1935 г.	ОУ 2018 г.	Предлагаемая ОУ	ОУ 1935 г.	ОУ 2018 г.	Предлагаемая ОУ
Плоскость нормирования	Поверхность пола			Поверхность пола			Уровень ступени		
Нормируемое значение горизонтальной освещённости, лк	50	200		60	100		-	100	
Расчётное значение горизонтальной освещённости, лк	60	190	200	60	125	100	37	90	120

Таблица 3

Нормируемые и расчётные значения UGR в четырёх точках с наиболее дискомфортными условиями зрения для пассажиров и машиниста

Положение в пространстве	Нормируемое значение UGR	Расчётное значение UGR		
		ОУ 1935 г.	ОУ 2018 г.	Новая ОУ
Поле зрения пассажира, стоящего на полу платформенного зала	20 (допускается превышение на 20 %, т.е. не более чем 24)	26	22	23
Поле зрения пассажира, стоящего на лестнице платформенного зала		26	23	22
Поле зрения пассажира, стоящего в зоне перехода		22	22	22
Поле зрения машиниста, въезжающего на станцию		26	24	22

Кроме представленных в табл. 2 значений, в четырёх ключевых точках с максимально дискомфортными условиями наблюдения был определён объединённый показатель дискомфорта UGR (табл. 3), значения которого говорят о том, что использовавшиеся в 1935 г. ОП доставляли некоторый зрительный дискомфорт пассажирам и машинисту [2]. Необходимо также отметить, что суммарная мощность ОУ 1935 г. составляла почти 46 кВт.

Такой же расчёт был проведён и для действующей сегодня на станции «Красносельская» ОУ, в которой используются светильники с ЛЛ компании *Osram* мощностью 58 Вт с коррелированной цветовой температурой 2700 и 4000 К, длиной 1500 мм и световым потоком 5000 лм, которые установлены по 3 шт. в ряд между колоннами. Для расчёта значений освещённости использовалась КСС, приведённая на сайте компании [5].

Результаты расчёта и измерений показывают, что нормы освещённости выполняются только в центре плат-

формы под светильниками, а по мере удаления от центра освещённость падает вплоть до 120 лк (рис. 6), что не соответствует действующим отраслевым нормам освещения метро (табл. 2) [6]. Расчёт освещённости и измерения в зоне перехода показали, что в этой части станции нормы освещённости соблюдены. При этом значения показателя дискомфорта,

приведённые в табл. 3, не превышают нормируемые более чем на 20 % и, следовательно, удовлетворяют нормам. Суммарная мощность ОП действующей ОУ составляет 11330 Вт, что свидетельствует о том, что эффективность новой ОУ почти в 4 раза выше первоначальной.

Приведённый анализ показывает, что при реконструкции ОУ станции

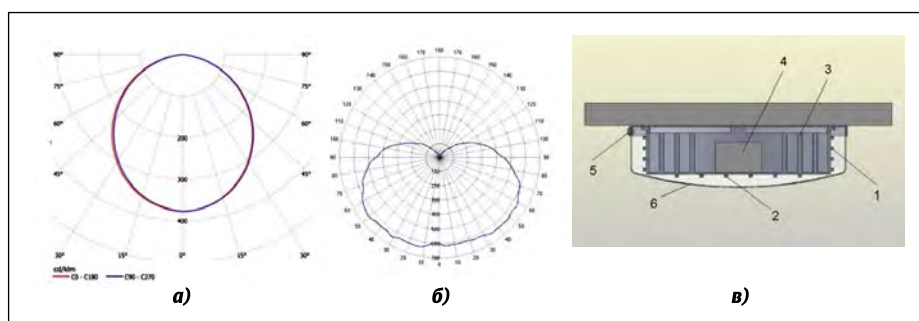


Рис. 7. Перераспределение светового потока плафона станционного зала: а – КСС исторического светильника; б – КСС предлагаемого светильника; в – схема плафона (сечение вертикально-проецирующей плоскостью), где 1 – СД *Cree XP-L*, 2 – СД *Cree JK3030 3-V*, 3 – радиатор для отвода тепла, 4 – устройство управления для СД, 5 – гидрофобный фильтр, 6 – молочный рассеиватель

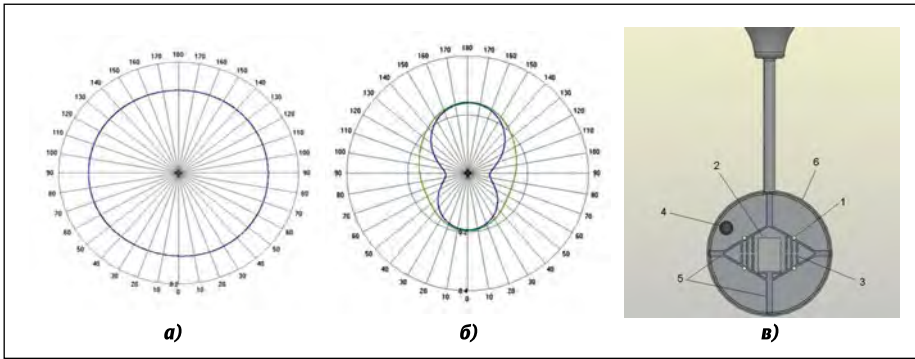


Рис. 8. Перераспределение светового потока цилиндрического светильника стационарного зала: а – КСС исторического светильника; б – КСС предлагаемого светильника; в – схема светильника (сечение вертикально-проецирующей плоскостью), где 1 – СД Cree JK3030 3-V, 2 – устройство управления для СД, 3 – радиатор для отвода тепла, 4 – гидрофобный фильтр, 5 – держатели, 6 – молочный рассеиватель

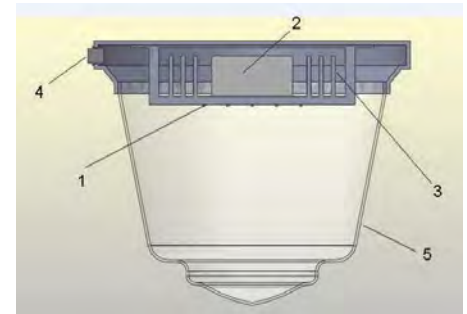


Рис. 9. Схема светильника для освещения зоны перехода (сечение вертикально-проецирующей плоскостью), где 1 – СД Cree JK3030 3-V, 2 – устройство управления для СД, 3 – радиатор для отвода тепла, 4 – гидрофобный фильтр, 5 – молочный рассеиватель

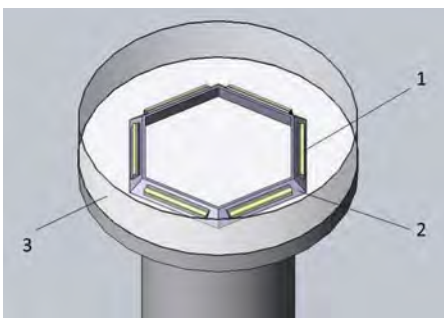


Рис. 10. Элементы светового оформления капителей колонн: 1 – СД лампы компании «Люценди», 2 – кронштейны, 3 – молочный рассеиватель

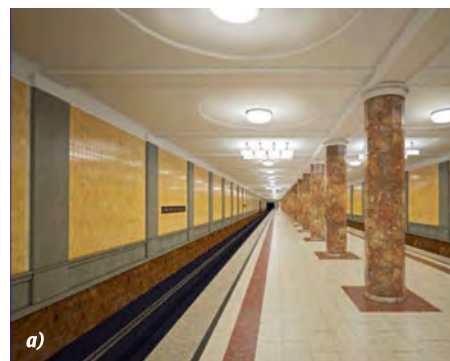


Рис. 11. Визуализация станции «Красносельская» с предлагаемой ОУ: а – платформенный зал; б – лестничный марш зоны перехода

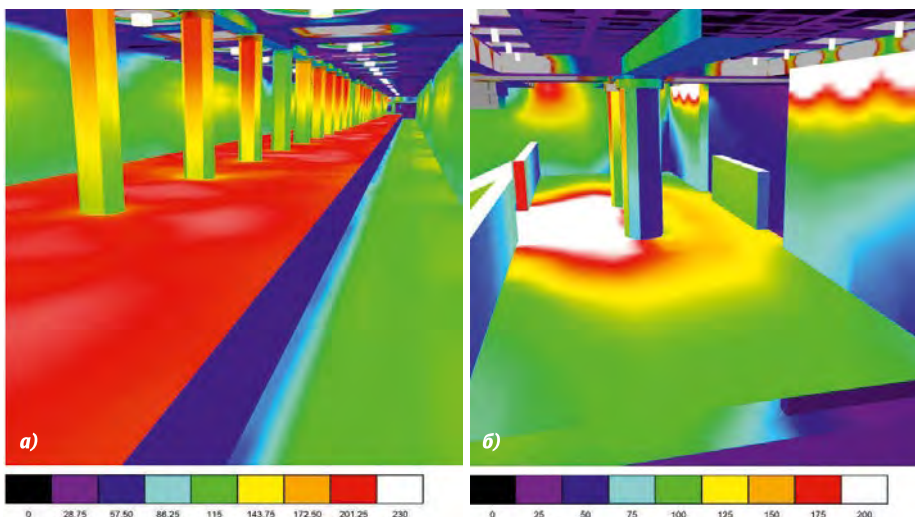
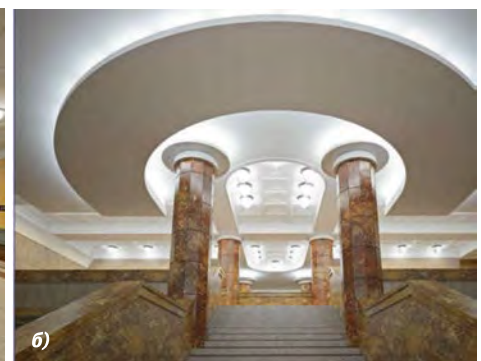


Рис. 12. Результаты светотехнического расчёта новой ОУ: а – платформенный зал; б – лестничный марш зоны перехода

«Красносельская» придётся решать ряд непростых задач, среди которых:

- обеспечение безопасных уровней освещённости на всех участках станции;
- устранение дискомфортного действия ОП согласно современным отраслевым нормам;

- выявление основных архитектурных элементов платформенного зала станции (круглых и квадратных кессонов);
- возвращение утраченного светового оформления лестничного марша зоны перехода;
- обеспечение визуального соответствия новых ОП утраченным светиль-

никам, заложенным в проекте 30-х годов.

Поскольку по сравнению с ОУ 1935-го года освещённость платформенного зала требуется повысить почти в 4 раза, то очевидно, что простое увеличение светового потока источника света приведёт к высокой яркости ОП и к ещё более высокому показателю дискомфорта, а следовательно, решение вышеперечисленных задач потребует существенных конструктивных изменений ОП.

Анализ работы круглых плафонов, расположенных вдоль платформы (рис. 2а), показал, что для уменьшения их слепящего действия требуется перераспределить поток от источника света так, чтобы меньшая его часть попадала вниз, а большая уходила в верхнюю полусферу, освещая при этом отражённым светом пол платформы. Для этой цели в плафон устанавливается цилиндрический светодиодный (СД) модуль, значительная часть светового потока которого (90 %) исходит от СД Cree XP-L, расположенных на образующей поверхности цилиндра, при этом остав-



Рис. 13. Диаграмма сравнения суммарной потребляемой мощности трёх ОУ станции «Красносельская»

шиеся 10 % излучают СД *Cree JK3030 3-V*, установленные на основание цилиндрического модуля (рис. 7в). Поверхность и полость цилиндра в этом случае выполняют функции радиатора для конвективного отвода избыточного тепла, генерируемого СД; суммарная площадь поверхности радиатора составляет 4355 см². При этом в полости цилиндра остаётся место для установки устройства управления. Такое решение позволяет перераспределить поток в необходимом для решения задачи соотношении, как это показано на рис. 7.

В случае с подвесными цилиндрическими светильниками, для выделения квадратных кессонов и уменьшения *UGR* также необходимо было увеличить световой поток в верхнюю полусферу и уменьшить световой поток в нижнюю полусферу, что легко достигается за счёт использования линеек с СД *Cree JK3030 3-V* с различным уровнем токовой нагрузки. Для осуществления этой цели в корпус светильника вставляется алюминиевая конструкция в виде ромба, стороны и полость которого, аналогично поверхностям цилиндрического модуля, описанного ранее, представляют собой радиатор для отвода тепла с площадью поверхности 1220 см². При этом во внутренней полости конструкции монтируется источник стабилизированного питания СД (рис. 8).

Предполагается, что зона перехода будет освещена ОП, внешне похожими на современные аварийные светильники (рис. 4б), только вместо ЛН мощностью 150 Вт в качестве источ-

ника света будет использоваться СД модуль с СД *Cree JK3030 3-V* (рис. 9). Аналогично описанным выше светильникам, устройство управления и радиатор для отвода тепла площадью 812 см² будут размещены в верхней части светильника (рис. 9).

Для восстановления утраченного светового оформления лестничного марша зоны перехода предполагается использовать приём, заложенный в первоначальный проект инженерами ВЭИ в 1935 г. При этом, в проектируемой ОУ в верхней части колонны за молочный рассеиватель вместо ЛН будут установлены 6 СД лампы компании «Люценди» длиной 281 мм [7], образуя шестиугольник (рис. 10).

Приведённые выше ОП были смоделированы в программе *Solidworks* [8], а *ies*-файлы и КСС (рис. 8б и 9б) были получены с помощью плагина *Photopia* [9]. По результатам светотехнического расчёта, проведённого с учётом характеристик предлагаемых приборов, а также основываясь на визуализации полученных результатов, можно сделать вывод о том, что внешний облик станции при такой реконструкции освещения становится аутентичным замыслом архитекторов (рис. 11). При этом новая ОУ не только позволяет выявить основные архитектурные элементы станции, но и в полной мере удовлетворяет современным нормам по освещённости и *UGR* (табл. 3, рис. 12). Кроме того, суммарная мощность предлагаемой ОУ составит 10,7 кВт, что почти на 0,6 кВт ниже, чем мощность действующей ОУ (рис. 13).

В заключение необходимо отметить, что в 60–70-е годы 20-го века с началом использования ЛЛ в погоне за эффективностью было модернизировано освещение многих станций метро, и, к сожалению, станция первой очереди «Красносельская» не является единственной, чьё «современное» освещение в корне изменило её облик. Появление мощных белых СД радикально меняет ситуацию при реконструкции ОУ метрополитена. Их относительно малый размер и высокая эффективность позволяют решать широкий спектр задач, которые стоят перед реставраторами объектов культурного наследия, а объединение их усилий с усилиями светотехников позволяет рассчитывать, что в скором времени нам удастся увидеть первые станции метро такими, какими их задумывали архитекторы и оформители.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Санитарные правила эксплуатации метрополитенов. СП 2.5.1337–03 (в редакции Изменений и дополнений № 1 от 30.04.2010 г., № 50).
2. Горбачёв Н.В., Ратнер Е.С. Освещение московского метро//Светотехника. – 1935. – № 1. – С. 2–11.
3. <https://www.dial.de/de/dialux/>
4. Гурторов М.М. Основы светотехники и источники света: Учеб. пособие для вузов.– 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. <https://www.osram.com>
6. СП 32–105–2004 Метрополитены. Свод правил по проектированию и строительству.
7. <http://lucendi.ru/lynus>
8. <https://www.solidworks.com/>
9. <http://www.ltioptics.com/en/photopia-general-2017.html>



Нечаева Ксения Игоревна, бакалавр техники и технологии по направлению «Электроника и нанoeлектроника» и программе «Теоретическая и прикладная светотехника».

Учится в магистратуре НИУ «МЭИ» (специальность «Светотехника и источники света»). Специалист по светотехнике компании ООО МСК БЛ ГРУПП



БОЛЬШЕ ЧЕМ СВЕТ

Новые возможности в освещении

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

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

Light is OSRAM

OSRAM
Opto Semiconductors

ОТ РЕДАКЦИИ

Публикуем продолжение дискуссии по проблеме светового дизайна, открытой в № 3 статьями С. Сизого «Современное состояние и перспективы развития современного светодизайна» и Д. Макарова «Световой дизайн. Современное состояние» и продолженной в № 4 нашего журнала



Ю.Б. Айзенберг
Профессор, доктор техн. наук, шеф-редактор
журнала «Светотехника»

Архитектурное освещение – Lighting Design

«Архитектурное освещение» или, по-модному, «Световой дизайн» – исключительно интересное и важное направление деятельности, стоящее на стыке науки – светотехники – и изобразительного – инженерного искусства – архитектуры. Свет в руках специалистов-светотехников с хорошим вкусом и архитекторов со знанием светотехники – мощный инструмент для положительного эмоционального воздействия на человека, выявления и подчёркивания лучших сторон архитектурных и изобразительных шедевров гениальных мастеров прошлого и талантливых деятелей настоящего времени.

Световой дизайн – одно из мощных средств создания комфортной, желательной оптимистической световой среды для человека.

Способными к световому дизайну светотехниками рождаются единицы, но эти способности, как музыкальный слух вступающих в жизнь детей, который имеет важное свойство развиваться по мере занятий музыкой, посещения музыкальных концертов. В конце учебного периода дети имеют вполне хороший музыкальный слух и вкус. То же происходит и с молодыми инженерами-светотехниками, попадающими в архитектурную среду и проработавшими ряд лет бок о бок с хорошими архитекторами.

Задачей «Архитектурного освещения» (светового дизайна) является осмысленное и целенаправленное выделение на архитектурных объектах и произведениях изобразительного искусства главного и наиболее удачного (по мысли автора), и оставить в тени то неудачное, второстепенное, если оно есть.

Важной задачей архитектурного освещения является акцентировать внимание и поднять настроение, сделать запоминающимися как природные достопримечательности, так и достижения инженерного искусства. Кто бы увидел и запомнил многокилометровый красавец-мост, отделяющий в Стамбуле континенты Европы и Азии, если бы не его великолепное освещение!

То же можно сказать о сооружениях и природных особенностях во многих городах Европы, Азии и Америки, освещение которых блестяще описано и показано Н.И. Щепетковым в серии его статей в журнале «Светотехника». Кстати, книга этого же автора – клас-

сика современного отечественного архитектурного освещения, изданная в 2006 году, называется «Световой дизайн города».

Происходящий в настоящее время переход от смыслового архитектурного освещения (светового дизайна) к световому развлекательному дизайну, и дизайну коммерческому, рекламному, чётко виден на примере одного из самых удивительных городов мира – Лиона во Франции, больше других городов любящего свет, использующему световой дизайн и уже почти двести лет устраивающему ежегодно «Праздник Света» (7–9 декабря). В первые 175 лет в эти дни световой дизайн города определялся выставлением на подоконниках всех домов города горящих свечей в защитных от ветра прозрачных стаканчиках. Затем стали по-разному иллюминировать каждую улицу гирляндами разноцветных ламп накаливания. В последующие годы стали делать цветными и хорошо освещёнными набережные Марны и Роны, на месте слияния которых стоит город. Всё это делалось со вкусом и любовью к своей работе и городу, который украшали. Выделялись светом соборы, дворцы, мосты, никто не обращал при этом внимания на старые здания и полуразвалившиеся постройки, особенно в бедных кварталах, даже близко от центра.

Всё изменилось в последние 25 лет. Город привлекал всё больше туристов со всего света, и когда их число перевалило за 2 млн человек на эти три дня, город стал задыхаться от приезжих. Коммерческие же интересы руководства города и его бизнес-элиты уже стали стремиться к ещё большему, к превышению разумных пределов. Для того чтобы привлечь ещё более миллиона туристов и зевак, город не только оброс сотнями малых гостиниц и магазинов, но и кардинально изменил характер светового дизайна, ставшего приманкой и «развлекухой!» На стенах дворцов и храмов стали проецировать движущиеся цветные картинки (огромного размера): бегущие лошади, сражения мушкетёров и другие динамичные картины. На площадях города появился другой вид «современного светового «дизайна»: движущиеся светящиеся люди, а также игры светящихся спортсменов, животных. Город резко изменился. Никакого эстетического удовольствия в этой давке толп людей в плохо видимых оформлениях получить уже нельзя. Коммерческие интересы задавили искусство и исковеркали понятие «световой дизайн».

Нельзя с сожалением не отметить, что мы достаточно быстро (не за 25, а за 5–7 лет) идём по этому коммерческому пути, при этом сильно опережая опыт Лиона, где за увиденное не берут денег. А вот у нас – уже берет. И немалые.

Появившиеся за этот период «Праздники света», уже попали в руки дельцов, которые в разных районах Москвы огораживают большие участки земли высокими заборами, где внутри идут спектакли «дизайна» для зрителей по дорогим билетам, а снаружи – чтобы ничего просто людям не было видно.

Так каким же путём мы хотим идти?

В вынесенных журналом для обсуждения двух статей молодых светодизайнеров нет постановки и ответа на этот главный вопрос. Один из авторов – Сергей Сизый – акцентирует внимание на следующих вопросах:

– «светодизайнеры – это художники по свету»;
– «световой дизайн – самостоятельная и новая область науки, отдельная от науки «Светотехника» (Полагаю, что не этим. Не этот вид деятельности является основным путём развития светового дизайна. И вообще световой дизайн ли это, в лучшем понимании этого термина?);

– лучшим из известных автору образцов светового дизайна являются работы зарубежных театральных осветителей.

Второй автор – Денис Макаров – правильно утверждая о необходимости для светодизайнеров полного светотехнического образования и длительной совместной работы с архитекторами (иначе и вряд ли могло быть, так как автор – кандидат технических наук, занимается компьютерным моделированием) видит будущее светового дизайна в создании специализированного общества по этой тематике. С первым из этих утверждений Д. Макарова можно полностью согласиться.

По поводу этих утверждений молодых энтузиастов светового дизайна можно сказать только следующее: «Дизайнер» – это отнюдь не художник, как бы это не хотелось самым большим энтузиастам. Это английское слово «*disign*» означает «проектирование», «конструирование», а «*lighting design*» – световое оформление.

Что касается новизны «светового дизайна», то ответ на это утверждение содержится хотя бы в вышеизложенной истории 200-летнего дизайна в Лионе, хотя в действительности, этому виду деятельности много сотен лет и до Лиона.

– рассматриваемое направление деятельности ни в коей мере не базируется ни на каком научном фундаменте, кроме тех законов, на которых зиждется наука «светотехника», а потому и не может называться самостоятельной наукой.

И это замечательно, что «архитектурное освещение» («световой дизайн»), это одно и то же, и находится на стыке двух интересных и важных наук: науки о свете и его применении и науки «архитектура».

– не видно особого смысла в создании ещё одного «Общества светодизайнеров» при наличии общества «Союз дизайнеров России». Вероятно, в этом большом сообществе надо организовать соответствующую секцию.

В заключение хотел бы высказать следующее:

1. На кафедрах светотехники в Москве, Саранске, Томске надо организовать с помощью архитектурных вузов в этих городах чтение курсов лекций по архитектурному освещению (световому дизайну) с отдельными занятиями по компьютерному моделированию освещения архитектурных и других объектов, где важен световой дизайн. И это представляется главным направлением развития светового дизайна с учётом всех требований светотехнической науки и учёта особенностей зрения человека.

2. Надо собрать инициативную группу из светотехников и архитекторов для разработки программы курсов лекций по теме.

3. Необходимо централизованно, а не разрозненно, провести общероссийскую конференцию по светодизайну. Желательно совместить это мероприятие с выставкой *Interlight Moscow powered by light+building* в Москве, где уже более 20 лет проводится всероссийский миниконкурс по световому дизайну осветительных установок и световых приборов (к сожалению, многие молодые энтузиасты дизайна и не подозревают об этом!)

4. Необходимо подготовить и издать учебное пособие по световому дизайну для кафедр светотехники с совместным авторством специалистов обоих направлений.

5. Надо организовать обязательную полугодовую практику в архитектурных организациях для студентов магистратуры, выбирающих «Световой дизайн», как направление своей деятельности.

Наша страна имеет большой исторический опыт по разработке идей светового дизайна и их реализации на практике строительства и возведения уникальных объектов. Имена Н.М. Гусева, В.Г. Макаревича, Н.В. Оболенского, С.А. Ключева, Л.А. Ципермана, Н.В. Горбачёва, В.М. Царькова, М.Ю. Каплинской, Н.И. Щепеткова, В.М. Пятигорского широко известны специалистам.

Москва является одним из лучших городов мира по архитектурному освещению. За эту работу группа специалистов – в составе в частности светотехников Г.В. Бооса и В.М. Пятигорского и архитектора Н.И. Щепеткова – получила Государственную премию. У нас издан целый ряд монографий по этой проблеме, а также более полусотни статей в журнале «Светотехника». Этот опыт необходимо изучать, синтезировать и модернизировать с учётом новых методов и средств освещения.



Матовников Г.,
Доцент кафедры Архитектурной физики МАРХИ

Невозможно спорить об актуальности вопросов, поднятых С. Сизым и Д. Макаровым в своих статьях [1]: истории и перспективах развития светодизайна,

профессиональных обязанностях светодизайнера, стадийности и состава проекта – они важны и достойны обсуждения. Тем не менее, ответ на них не изменит наблюдаемого факта: светодизайн в кризисе, и есть все основания думать, что такая ситуация сохранится. Он оказался в этой ситуации не сам и не в одиночку, а за компанию со стройкомплексом в целом, чьим малозначительным отделением он по большей части являлся, традиционно занимая порядка 1 % бюджета строительных работ. Поэтому уменьшение их объёма, распространение практик сокращения расходов на материалы и оборудование неизбежно привело к уменьшению коммерческого интереса к светодизайну. В момент начала кризиса, в 2011–2012 гг., казалось, что ответом на пробуксовки в жилом, торговом и офисном строительстве станут масштабные программы по благоустройству. Что они заменят квадратные метры полезной площади квадратными метрами плитки и газонов, скамейками, и да – светильниками. Вскоре (совпадение?) были составлены получившие высочайшее одобрение рекомендации по благоустройству (и, через запятую, освещению) сперва вылетных магистралей от ГлавАПУ Москомархитектуры [2], а затем и городских улиц в целом от КБ «Стрелка» [3]. Им же несколько лет спустя был разработан индекс качества городской среды, презентованный в 2015 году [4], в который в качестве критериев оценки качества среды оказались включены несколько пунктов, связанных с освещением. Казалось, всё шло к тому, что как будто появившийся интерес городских властей к светодизайну получит импульс к реализации... Однако к настоящему времени ситуация изменилась.

Новые майские указы президента ставят на вид всем муниципалитетам: качество городской среды необходимо улучшить, и мерилom этого улучшения послужит тот самый индекс качества городской среды, его нужно поднять на 30 %. А устройство индекса тем временем без лишнего шума и презентаций кардинально изменилось. Из всего, связанного со световой средой, остался один подпункт в одном из критериев оценки – «доля освещённых частей улиц, проездов, набережных в общем количестве (%)» (*sic!*). Отрадno видеть, что ведущие специалисты по качественной городской среде, наконец, всерьёз обратили внимание на выполнение указов, относящихся ещё к эпохе правления Анны Иоановны, а также на такую незначительную малость, как соблюдение обязательных к применению, пусть и далеко не безупречных, сводов правил. Помимо данного пункта – света нет, в оценке качества городской среды он не учитывается, не интересует. Световой комфорт? Выразительный образ? Световой урбанизм? Не включены, не участвуют [5]. Можно понять это таким образом, что, по мнению ведущих отечественных урбанистов, место светодизайну – в сфере ЖКХ, обеспечивать работу инфраструктуры и не «тянуть одеяло на себя». Так, на последнем *Moscow Urban Forum*, по сравнению с прошлогодним, вопрос городского освещения и светового урбанизма оказался практически не представлен – что же по-

лучается, разговоры о качестве городской среды относятся только к её дневному состоянию? Или, может быть, свет – это «опция по умолчанию»?

Вот почему на фоне таких изменений представляется, что уже поздно спорить об исторических приоритетах и определениях, возможно, пришло время искать союзников, способных подтвердить и поддержать заявку светодизайна на роль проектной дисциплины, являющейся неотъемлемой частью комплексного проектирования городской среды. Являясь архитектором по образованию и роду деятельности, я думаю, что именно архитекторы могут стать такими союзниками. Только в архитектурно-дизайнерском кругу существует профессиональное видение городской среды как чего-то большего, чем просто утилитарное соединение функций, пространств и инфраструктуры – так, именно архитектурно-световая среда города в тёмное время суток стала сферой моего исследовательского интереса [6]. Возможно даже, что в настоящее время наша отрасль проще и доброжелательнее воспримет светодизайнеров как архитекторов-светодизайнеров – специалистов, фокусирующихся на свете и световой среде, но укоренённых в общем понятийном поле с архитекторами, говорящих с ними на одном языке, разделяющих общие ценности. И только тогда, когда роль и значение света станет общепринятой очевидностью, наступит время художников света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Современное состояние и перспективы развития современного светодизайна, С. Сизый; Световой дизайн. Современное состояние, Д. Макаров. «СВЕТОТЕХНИКА», 2018, № 3
2. Альбом типовых решений (стандартов) комплексного благоустройства территории «вылетных» магистралей города Москвы.: М. 2015.
3. Сводный стандарт благоустройства улиц Москвы, приложение 1 к распоряжению правительства Москвы «об утверждении сводного Стандарта благоустройства улиц Москвы» от 04.08.2016 г. № 387-РП
4. [<https://strelka.com/ru/videos/event/2017/07/17/what-are-the-diseases-of-modern-cities> Пешеходные улицы Москвы]
5. *Щепетков Н.И.* Освещение улиц Москвы в новых стандартах <http://www.marhi.ru/AMIT/2016/4kvart16/Schepetkov/untitled.php>
6. *Матовников, Г.С., Щепетков Н.И.* Освещение новых пешеходных улиц Москвы; – М., Светотехника, 2015 № 2. С. 11–17



П.А. Смирнов, к.т.н.,
доцент, кафедре светотехники НИУ «МЭИ»

К дискуссии о проблеме светового дизайна

К теме дискуссии хотелось бы подойти со своей профессиональной точки зрения, как преподавателя. После прочтения статей посвящённых проблеме светодизайна в 3-м номере журнала «Светотехника» за 2018 г.,

а также комментариев по дискуссии, опубликованных в 4-м номере, пропало желание критики приведённых материалов. Из реакции на статьи наиболее соответствуют моим представлениям статья доктора искусствоведения, профессора Ю.В. Назарова и статья генерального директора «Фарос-Алеф» Л.Г. Новаковско-го. Драгоценные рациональные зёрна присутствуют и во многих других ответах на дискуссию, и, несомненно, в открывших дискуссию статьях С.Н. Сизого и Д.Н. Макарова.

В первую очередь имеет смысл определиться с базовыми моментами, которые нужно передать, чтобы подготовить нового светодизайнера. И первым, очевидным и, пожалуй, самым важным моментом, является то, что светодизайнер должен быть мастером работы со светом! Нужно понимать, что как бы это слово грубо ни звучало, светодизайнеру необходимо передать власть работы со светом, и эта власть должна ощущаться в его делах и решениях. Что это значит? Это значит, что светодизайнер должен мочь трансформировать световую среду так, как он желает, придавая ей те формы, которые задумал. Конечно, достичь идеала в этом отношении сложно, т.к. мы ограничены очевидными техническими рамками, но при этом мастер должен ощущать, что он движется в правильном направлении, насколько он продвинулся по отношению к решению задачи. Так мастер резьбы сначала придаёт своему творению грубую форму, а затем начинает её уточнять, пока не приведёт её к совершенству: на определённом этапе он останавливается, не позволяя нарушить заданную форму, излишне углубляясь в материал.

Проблемой мастера по свету является передача желаемого образа до его осуществления, чтобы можно было его обсудить с коллегами смежных профессий, участвующих в реализации проекта, в том числе и с владельцем (владельцами) будущей осветительной установки. Для этого решения, пока не существуют точных методов. Один из вариантов – представление визуализации проекта и её обсуждение. Однако существующие методы представления визуализаций не учитывают множество факторов, присутствующих в реальных решениях, и кроме того, для популярных методов визуализации, наличие таких факторов в общем случае невыгодно и излишне. Например, визуализация на экране монитора, или в распечатке на бумаге, никак не может воспроизвести возможный дискомфорт от ослепления попаданием прямого излучения от источников света или от бликов, что в реальности может в значительной степени повлиять на восприятие. Однако зачем реализовывать дискомфорт при публикации изображений, что является основным источником дохода отрасли? На этом фоне остальные проблемы, кажущиеся значительными – связанные с полем окружения, точностью воспроизведения и соотношением телесных углов (количества, пространства, света и цвета) и другие факторы, позволяющие точно передать результат реализации проекта – начинают бледнеть. Следующим значительным для светотехника фак-

тором, который может серьёзно нарушить восприятие, может быть не точность воспроизведения на мониторе в виду особенностей спектральных и пространственных кривых его светящихся элементов, а в другом случае нарушения в полиграфии, что может изменить как соотношение яркостей, так и общий оттенок изображения, может появиться ощущение изменения цветовой температуры источников освещения и основного цветового тона всей сцены. Все эти моменты разрушают дискуссию, и если светотехник, как правило, ещё может экстраполировать ситуацию и понимать, что в итоге должно быть на самом деле, то его собеседник совершенно не обязан этого делать. Поэтому нужно прийти к какому-то общему языку. И если язык искусства может оказаться достаточно редким, малопонятным, и отличаться вкусовыми особенностями (а на вкус и на цвет товарища нет), то язык математики оказывается гораздо более распространённым, и, дополняя изображения связывающими количественными переходами, соотношениями и графиками, найти общий язык окажется гораздо более простой задачей.

В освоении такого языка, сочетающего в себе детали науки и искусства, и заключается второй важнейший момент в подготовке специалиста по световому дизайну.

Как отмечается в статье Д.Н. Макарова, термин «*lighting designer*» в дословном переводе с английского означает «проектировщик освещения» или «дизайнер освещения». Но если мы далее проследим до уточнения слова «*design*», то эта задача неплохо решена в книге Шарлотты и Питера Филла «История дизайна» [1], где отмечается: «Откуда же взялось это хитрое слово? Оно восходит к латинскому *designare* (отмерять, намечать, выбирать)». Стоит привести цитаты идущие далее: «Можно утверждать, что красота, производная функциональности – закон дизайна»; и далее: «Дизайн – это процесс, благодаря которому люди с древнейших времён превращали природные материалы в полезные вещи, поскольку в конечном счёте дизайн – это способ решения задач». Итак, как же понятие «проектировщик освещения» трансформировалось в «дизайнер освещения», или «светодизайнер»? На самом деле, это требование времени и ситуации. Это иностранное слово, которое приходится задействовать, чтобы уточнить высоту понимания и уровень профессии. Можно отметить, что множество выдающихся архитекторов проходили обучение в Италии, и, таким образом, кажется вполне естественным проникновение в их язык, некоторого особого языка. Почему нельзя назвать этот язык итальянским или латынью? Потому что в своё время в этот профессиональный язык перешли слова из древнегреческого (само слово «архитектура»), а возможно и из других языков. Это способ формирования общего профессионального языка специалистов заданной профессии, и это в равной мере относится и к светодизайну. На мой взгляд, разделение профессий светотехника и светодизайнера в корне не верно. Предложение, прозвучавшее в одной из дискуссий: светотехнику заниматься выбо-

ром оборудования и решением технических вопросов подключения, крепления, обеспечения питания сети и т.п. сводит работу светотехника в область, с которой вполне могут справиться сметчики, отдел технического обеспечения и электрики, здесь мало работы со светом, и переводить заслуженные труды светотехников, в это русло несправедливо. Как известно, хотя текущие ГОСТы, определяющие правила выполнения рабочей документации проектов освещения, (ГОСТ 2.607–2014 и ГОСТ 2.608–2014) этого не подразумевают, проект освещения обычно состоит из светотехнической и электрической частей, выполнение светотехнической части проекта на высоком качественном уровне и имеет смысл называть светодизайном. Отметим, что эта часть до сих пор именуется «светотехнической», и не надо смещать нашу область в сторону электрической части. Светотехника и светодизайн – немного разные понятия, но большей частью они пересекаются, как и в обычном случае перевода иностранных слов, определяющих сложные понятия: по сути, они – одно и то же, но в каждой стране понимаются по-разному, так, судя по всему, происходит и в данном случае. Понятие «светодизайнер» подразумевает переход на международный светотехнический язык, понятие «светотехник» – на региональный. Соответственно подразумевается, что светодизайнер в широкой степени владеет международным светотехническим языком, но это не определяет совершенство его светотехнических решений.

В случае светового дизайна светотехническая часть подразумевается более углублённой, что и требует некоторого знания смежных областей, чтобы точнее определить возможности для светового решения. Искусство принятия светотехнического решения можно определить как осуществление выдающегося замысла в замкнутых технических условиях рамках. Поэтому выбор оборудования (вернее – его основных характеристик) и определение условий освещения светотехнику лучше сделать до осуществления светового решения. Так, если дать художнику готовую картину, а затем поставить задачу выбора исходных красок, позволяющих её реализовать, это приведёт к ужасно громоздкому решению многопараметрической задачи. В итоге эта задача не только будет решена грубо, но и позволит выбор широкого перечня производителей и даже типов красок в зависимости от выбранной точности итогового решения. Однако обычно художнику необходимо три исходных цвета для решения практически любой выдающейся картины, и различие этих цветов определяет её общую гамму. Согласитесь, это другая задача? С точки зрения светотехника можно сказать: «Дайте мне заданный перечень световых приборов, и я построю выдающееся решение на их основе, настолько, насколько позволяют параметры приборов в соотношении к объекту освещения и его окружению.» В процессе решения этой задачи определения соотношений и необходимы диалоги со специалистами разных направлений и пользователями проекта.

Чтобы в качестве языка диалога использовать простой математический (в большинстве геометрический), отметим, что светодизайнер, должен быть мастером света и тени, а также цвета и оттенков. Математически, такие задачи хорошо решаются в рамках лучевой теории. Построение световых лучей позволяет определить области света и тени, определить размытость и уровни переходов, а также решить задачи смешения световых пучков разной цветности. Сейчас, в рамках лучевой теории диффузного светового поля, существует совершенная математическая модель, которая на очень высоком и тонком уровне позволяет решить поставленные задачи, принимая в расчёт многократные отражения, пропускание и рассеивание.

Здесь стоит отметить, что ранее, техническая эстетика, и наука, в основном, решали достаточно грубые задачи производства, в отличие от искусства, которое базируясь на тонкости и высоте чувств, осуществляло и продолжает осуществлять соответствующие высокие решения. Но теперь, наука возросла настолько, что не только позволяет, но требует высоко точных, тонких и сложных, комплексных решений. В таком отношении, наука в настоящее время – это настоящее искусство! А соответственно, эти понятия уже мало отличаются. Современный технический дизайн уже не груб, но подразумевает сочетание тонких функциональных форм, согласованных с природными особенностями окружения, и учитывает эргономику использования, ощущение которой зачастую и определяет восприятие формы, которая, в этом случае, выражает: безопасность, надёжность, удобство и тактильность. Отметим, что все эти формы, в большинстве своём строятся на основе программ параметрического трёхмерного моделирования, например *BS Solidworks*, а значит представляют собой набор кривых обусловленных математическими функциональными соотношениями, по сути – математическую модель. То же самое относится и к световому дизайну, где модель определяется в рамках лучевой теории диффузного светового поля.

Имеет смысл отметить переход от числовых величин, определяющих количественные характеристики освещения, идущие от мощности и энергии, к величинам, определяющим зрительное восприятие, которое получается в результате сложного преобразования изображения, зачастую в рамках особенностей конкретного наблюдателя. Определение такого перехода является следующей задачей светотехника и светодизайнера, чтобы в диалоге связать визуализацию, реализацию проекта освещения и набор математических данных, и кривых количественных характеристик. Эта задача также позволяет математическое решение, естественно, с некоторой точностью, в результате обобщения статистики психофизиологических экспериментов, а также ряда физических и химических свойств и математических методов.

В заключении можно сказать, что, определив глобальные отправные точки в профессиональной области, дальнейшая подготовка, расширение и углубление направлений, определяет лишь глубину под-

готовки специалиста и во многом является его личной прерогативой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Филл Ш., Филл П. История дизайна. / перевод с англ. С. Бавина. -М.: Издательство Колибри, «Азбука-Аттикус», 2014.– 512 с.



Щепетков Н.И.,
доктор архитектуры, профессор кафедры Архитектурной физики МАРХИ

Перспективы, перспективы... Есть ли они у светодизайна?

*Переправа, переправа!
Берег левый, берег правый...
А. Твардовский.*

Может, светодизайн в своих перспективах сам разберётся, без гадалок? Как говорят, «кривая вывезет». Уж очень он независимо развивается в нашей практике в последнее десятилетие – быстро, почти молча и практически бесконтрольно от общественного мнения. Неизвестно, кто «правит бал», кроме городской администрации и чиновников, которые едва ли компетентны в вопросах его качества, но не количества и стоимости. Если включить в его сферу и праздничные шоу, особенно в столице, число, масштабы и финансовые, неведомые публике и вероятно астрономические (из бюджета или частного капитала?) затраты на которые все растут, надо ожидать, что эффект от них по естественной причине привыкания публики скоро девальвируется. Мы всё же не в Древнем Риме, где свободный плебс требовал «хлеба и зрелищ», а рабы не имели голоса. Разве что туристы будут довольны. Первые сигналы в Москве от жителей были в 2012 и 2018 гг. в связи с «перебором» цветодинамического света, используемого эмпирически, наугад, без разумных обоснований в архитектурном освещении фасадов зданий в центральной части города и в ландшафтном декоративном освещении, в частности, Бульварного кольца и Воробьёвых гор. Даже обычно игнорирующие мнение специалистов и горожан чиновники соответствующих ведомств были вынуждены принять меры к ограничению светоцветовой какофонии, которая ожидаемых ими положительных эмоций у москвичей не вызвала, совсем наоборот. Цветной, да ещё динамический свет в масштабе городских ансамблей – «дело тонкое», науке почти неизвестное, а потому требует тщательной подготовки и экспериментальной проверки прежде, чем широко использовать его. А кто этим займётся, кто спонсирует не коммерческие, а комплексные, систематические и далеко не простые научные исследования?

И всё же надо надеяться, что «вода камень точит», и очередная научная дискуссия (спасибо за неё жур-

налу «Светотехника» и авторам первых статей С. Сизому и Д. Макарову [1], а также другим участникам), как и предыдущие за последние годы [2–4], внесли свою лепту в прояснение и развитие проблемы. Первый автор изложил свою версию эволюции отечественного светодизайна, второй отразил, похоже, менеджерский взгляд на рождающуюся профессию. Стоит обратить внимание С. Сизого на мелкие неточности в его версии: «современное состояние... современного светодизайна» – это круто; не И. Тейхмюллер предложил термин «световая архитектура», а П. Ширбарт в 1906 г. [5]; не стоило архитектора Ж.М. Вержбицкого превращать в Вержбицкого, а светотехника Р. Келли в архитектора; «яркость цветовых контрастов» – некая тавтология, ибо яркость – один из параметров цвета; «миллион оттенков цветного света» – чудовищный и безответственный рекламный перебор, ибо глаз не способен воспринимать такое количество (как говорят учёные – не более 130 тысяч оттенков цвета); среди пяти органов чувств человека (рис. 6) не указан самый древний и очень важный в архитектуре и дизайне среды – вестибулярный аппарат (а не вкус) и т.д.

Размышления Д. Макарова о профессии светодизайнера для меня случайно соотнеслись с выполненным в ноябре 2017 г. экспертным заключением на проект профессионального стандарта «Специалист по световому дизайну и проектированию инновационных осветительных установок», в разработке которого шесть уважаемых организаций, часть из них не особо или совсем не «засветились» в этой области теоретически (по публикациям) или практически. Проект произвёл на меня удручающее впечатление, и я отреагировал как мог – по содержанию почти отрицательно, предложив в его корректуре свою альтернативную версию.

Во-первых, слова «архитектура», «архитектурная среда» и даже «светодизайнер» в тексте стандарта отсутствуют, хотя светодизайн – это всего-навсего образная составляющая архитектуры при искусственном свете, её неотъемлемая современная часть. Он зародился, существует и развивается в лоне архитектуры, в экстерьере и интерьере, а любая ОУ – часть материальной и инженерной структуры архитектурного, инженерного или ландшафтного объекта. Принципиально неверно вырывать, вычленять светодизайн из архитектуры как созданной человеком вместе с искусственным освещением антропогенной среды.

Во-вторых, вместо очевидных, но, увы, не указанных в стандарте базовых профессий (специальностей) для подготовки будущих светодизайнеров в вузах – архитектор, дизайнер архитектурной среды, светотехник, электрик – перечислены какие-то экзотические «графические и мультимедийные дизайнеры, инженеры в оптотехнике, наноэлектронике, фотонике» и других малоподходящих для нашей цели областях. Полный бред.

В-третьих, весь стандарт пронизан исключительно духом инженерии, техники, информатики, в то время как нужно воспринимать светодизайн как новый вид искусства, «отпочковавшийся», подобно дизайну, от

архитектуры, но не потерявший с ней теснейшей родственной, органической связи. И архитектурно-художественная подготовка светодизайнеров должна быть доминирующей, а светотехническая – сопутствующей, но не менее фундаментальной, на основе компьютерных технологий проектирования. Этот баланс необходимо уточнять в учебных программах в пределах учебных часов и практик.

Мне, к сожалению, неизвестна дальнейшая судьба стандарта. А от него может зависеть судьба новой профессии. При таком стандарте она незавидна. Это – отражение существующей ситуации, когда судьба светодизайна не в руках профессионалов.

Пессимизм усиливается при воспоминании о двух столичных «фундаментальных» (по объёму и стоимости, но не содержанию) трудах (более 500 страниц в каждом) двух уважаемых организаций (КБ «Стрелка» и ГлавАПУ МКА) в 2016–2017 гг., не блеснувших, по крайней мере в открытую, своими практическими работами или научными публикациями в области городского светодизайна [6,7].

По существующим довольно немногочисленным публикациям иногда создаётся впечатление, что мы друг друга агитируем о важности светодизайна, его смыслах, целях, задачах, объектах и в какой-то степени о его предмете, методиках проектирования и исследований и т.д., как учит нас системная наука при написании диссертаций и научных отчётов. Все эти мнения, если они конструктивные и творческие, когда-то могут пригодиться и «улягутся» в той или иной степени в теорию светодизайна. Но для практики уже сейчас важно (а важно ли на самом деле ничего не читающим и зарабатывающим на этом деле подрядчикам – большой вопрос!) иметь конкретные рекомендации не только по элементарным нормируемым параметрам освещения, но, например, и по выбору обоснованных градиентов яркости для эффективного выражения визуальной статики или динамики монумента или стеновой тектонической системы, а также для определения чрезмерной степени пятнистости, зрительно «разваливающей» целостность стены при локальном её освещении и т.д. Это важные светокомпозиционные параметры, которые можно выразить светотехническими параметрами. В частности, насколько достоверны по зрительной оценке одинаковые нормы яркости [8] при заливающим и локальном освещении фасада? Ведь никто этого не проверял.

Теперь стало доступным определение в натуре средней яркости фасада или его фрагмента в любых выбранных границах с помощью цифрового яркомера при любом приёме освещения. Это была бы хорошая светотехническая диссертация – статистически определить адекватность восприятия равномерно и пятнисто освещённой плоскости и криволинейной, тем более, пластически сложной поверхности для уточнения нормативных требований. То же и с градиентом яркости. Да мало ли ещё невыясненных вопросов! С цветным светом вообще тьма. Получив научно обоснованные ответы, мы бы очень помогли практике.

Полвека парадоксом нашей светотехнической практики было, да отчасти и сейчас остаётся, нормирование параметров, которые нечем проверить, т.е. измерить в натуре. Яркость дорожного полотна нормируется с 1969 г., а работающие яркомеры в единичных экземплярах в единичных городах РФ появились лишь в XXI в. В пешеходных зонах нормируется полуцилиндрическая освещённость, а соответствующих насадок для люксметра нет – отечественные производители считают, что на них нет спроса. Норма повисает в воздухе без поддержки. К чему такие фикции?

Самой серьёзной остаётся задача перевода расчётных величин яркости в натурные, о чём определённо сказали авторы замечательной монографии ещё в 1973 г. [9]. Проектные цветные визуализации освещаемого объекта – на экране монитора и особенно распечатанные на принтере – имеют два неискоренимых дефекта: они плоскостные (несмотря на иллюзии 3D технологий), и диапазон яркостей на них несопоставимо уже, чем в натуре. Оценивая проектное изображение, мы имеем дело со светлотной композицией, а в натуре – с яркостью первичных ИС (нередко в десятки тысяч кд/м²) и вторичных, имеющих в темноте сотые и тысячные доли кд/м². Глаз вынужден постоянно переадаптироваться к этим условиям. Изучением взаимосвязи яркости и светлоты в разных условиях зрительной адаптации занимались во второй половине XX в. В.В. Мешков, Н.М. Гусев, И.Л. Тохадзе, Г.Г. Котик, В.В. Воронов, А.Б. Матвеев и др., а также ряд зарубежных учёных (*Bodman. H., Hopkinson R.G., Padgham C.A., Rodman H.F., Waldram J.M.* и др.). Фундаментальная задача так и осталась нерешённой, а исследования, по крайней мере в РФ, прекратились. Этим могли бы совместно заниматься крупные фирмы светотехнического оборудования, имеющие экспериментальную базу, и вузы, обладающие неисчерпаемым потенциалом респондентов. Многие существовавшие в советское время лаборатории при кафедрах строительной физики и светотехники в ряде вузов и НИИ закрылись или радикально «обескровлены». В МАРХИ учебная лаборатория кафедры строительной, ныне архитектурной, физики при Н.М. Гусеве и Н.В. Оболенском периодически подпитывалась оборудованием из НИИСФ, ВНИИТЭ и заводов – производителей измерительных и ОП, экспериментальные камеры и установки создавались руками аспирантов (В.В. Воронов, Н.И. Щепетков, Ю.Р. Яремчук), но позже всё это в 1990–2000-е годы пришло в негодность. С 2007 г. мы пытаемся на новой технической основе воссоздать учебно-лабораторную базу, благо скромные помещения есть, но нет финансирования. Пользуясь случаем, выражаю благодарность фирмам, в разные годы бесплатно предоставившим кафедре некоторые образцы современных ОП и ИС, которые мы демонстрируем студентам: «Philips Lighting», «ERCO», «SIMES», «Thorn», «IntiLED», «Точка опоры». К сожалению, акты благотворительности, основанные на личных контактах, не регулярны, а хотелось бы иметь постоянные приязненные и взаимопользные связи.

На новых лабораторных установках уже проведены научные эксперименты по светодизайну, закончившиеся успешной защитой кандидатских диссертаций (А.Г. Батова, Г.С. Матовников). В процессе сотрудничества в учебной и НИР студентов и преподавателей кафедра «Дизайн архитектурной среды» МАРХИ (зав. кафедрой А.В. Ефимов) с нашим участием начала серию экспериментов с цветным светом на полихромных макетах. К сожалению, недостаёт цветоизмерительного оборудования для полноценной оценки результатов.

Дефицит финансовых и технических средств – ничто по сравнению с регрессивными изменениями последних лет в учебном процессе. Кафедра, одна из старейших в МАРХИ [10], где читается три курса на дневном и вечернем факультетах (климатология, акустика, светотехника), сокращена до 2,4 единиц ППС. Нет ни одной целой ставки преподавателя, включая кафедра (всего 5–7 человек в разных семестрах). Дефицит учебных аудиторий в институте привёл к объединению студенческих групп до 3–4 при проведении практических занятий (оттого и сокращение учебной нагрузки и штатов). При таком одновременном количестве студентов в аудитории никакого лабораторного оборудования не хватает, и мы вынуждены отменить лабораторные работы. Ясно, что ухудшилась усвояемость учебного материала. Студенческая наука в этой области лишилась экспериментальной базы. Что будет дальше – неизвестно. Или все светодизайнеры так

и останутся самоучками, по крайней мере, в архитектурно-художественном разделе профессии.

А вы говорите «перспективы, перспективы...»!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Сизый С. Современное состояние и перспектива развития современного светодизайна. Д. Макаров. Световой дизайн. Современное состояние. Светотехника, 2018, № 3. С. 72–78 и 78–82.
3. Дискуссия «О нормировании искусственного освещения». Светотехника, № 3. С. 63–64.
4. Нилов Е.Е., Степанов В.Н. Дизайн освещения: трудности перевода и критерии оценки. Светотехника. 2016, № 2. С. 62.
5. Дискуссия на тему «Школа отечественного светодизайна – стратегии тактики». Светотехника, 2015, № 4–5.
6. Neumann D. Architecture of the Night. Munich – Berlin – London. New York, Prestel. 2002.
7. Щенетков Н.И. К выходу очередного пособия Москомархитектуры по комплексному благоустройству и освещению Москвы. Светотехника, 2016, № 3. С. 73–75.
8. Щенетков Н.И. Освещение улиц Москвы в новых стандартах. [http://www.marhi.ru/AMIT/2016/ukvart16/PDF/AMIT2016-4\(37\)](http://www.marhi.ru/AMIT/2016/ukvart16/PDF/AMIT2016-4(37))
9. Свод правил СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23–05–95*. М. 2016.
10. Гусев Н.М., Макаревич В.Г. Световая архитектура. М., Стройиздат. 1973.
11. Журавлёва И.Е., Щенетков Н.И. О светотехническом образовании архитекторов (из истории кафедры «Архитектурная физика» МАРХИ). Светотехника, 2010, № 3. С. 45–50.

Химики из МГУ и МИФИ превратили полиэтилен в «квантовый» материал

Учёные из МГУ и МИФИ превратили полиэтилен в «квантовый» материал, поглощающий ультрафиолет и преобразующий его в видимый свет. Он повысит КПД солнечных батарей, защитит от ультрафиолета и станет основой футуристических дисплеев и систем записи данных, пишут учёные в статье, опубликованной в журнале «*Polymer International*» (2018. – Vol. 67, Iss. 9. – P. 1275–1281).

«Полученный нами композитный материал обладает, с одной стороны, флуоресцентными свойствами квантовых точек, а с другой – механическими свойствами полиэтилена. Он прозрачен в видимой области спектра, устойчив к высокой температуре и при этом сохраняет оптические свойства при механических нагрузках», – рассказывает Валерий Шибаяев, химик из МГУ имени М.В. Ломоносова.

Квантовые точки представляют собой небольшие конструкции из кусочков полупроводника, внутри которых существует потенциальная яма. Благодаря этому подобные объекты могут вести себя как своеобразные искусственные «атомы», способные поглощать и излучать электромагнитные волны.

Подобные структуры сегодня активно используются в медицине и промышленности для изготовления различных светящихся «красок» для органов, дисплеев телевизоров и мониторов, в качестве основы светодиодов и лазеров и для множества других целей.



Шибаяев и его коллеги нашли новое применение для квантовых точек, устранив их главный недостаток – высокую хрупкость и невозможность создания прочного материала на их основе, способного «самостоятельно» сопротивляться различным механическим нагрузкам.

Изучая свойства органических веществ, используемых в качестве «оболочки» квантовых точек, учёные заметили, что последние могут хорошо соединяться с одиночными звеньями в нитях полиэтилена и многих других полимеров.

Проверив эту теорию на «заготовках» полимера PDMA (полидиметилакриламид), одного из «кузенов» оргстекла, команда Шибаяева испытала, можно ли заставить квантовые точки проникать в поры, присутствующие в листах из полиэтилена или полипропилена, и соединяться с их нитями.

Как оказалось, сделать это действительно можно, растворяя наночастицы в органическом растворителе и вымачивая в этом растворе полимерные листы. Когда учёные удалили растворитель и закрепили квантовые точки внутри полиэтилена с помощью другого полимера, они получили прозрачный «умный материал», состоящий примерно на пятую часть из подобных структур.

Первые опыты с этим «квантовым полиэтиленом» показали, что он умеет поглощать ультрафиолетовое излучение и превращать его в синее. Это позволяет использовать его для повышения КПД солнечных батарей и защиты от ультрафиолета, а другие типы квантовых точек, встроенные в полимерные листы, можно применять для создания источников света, для записи информации различных футуристических дисплеев и других гаджетов, а также для записи информации.

scientificrussia.ru/
06.09.2018

Международный военно-технический форум «АРМИЯ-2018»

Международный военно-технический форум «АРМИЯ-2018» проведён в Подмоскowie в районе Голицыно-Кубинка в 20-х числах августа этого года. Форум-экспозиция прошёл уже в четвёртый раз, начав свою ежегодную деятельность летом 2015 г., и собрал на своих стендах сотни организаций и предприятий как из армейской и промышленной сферы, так и из сферы бизнеса, экологии, медицины и других структур народного хозяйства.

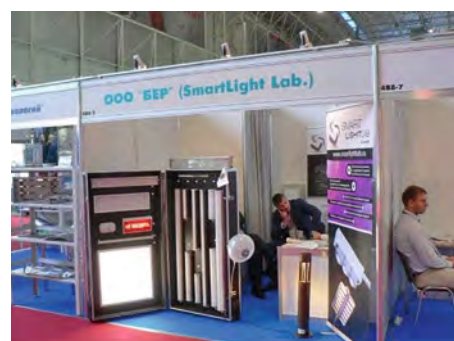
Площадь выставочного комплекса составляет несколько гектар и по размерам и оформлению может конкурировать с другими экспозиционными центрами страны.

Экспозиционный парк ЦВК «Патриот» разместил в зале D своего суперпавильона помимо множества других экспонентов несколько стендов светотехнических компаний, а именно, МСК «БЛ ГРУПП», Ардатовского СТЗ, ИЦ «Электролуч», Московского Прожекторного завода, ЗАО «МНПО «ЭНЕРГОСПЕЦТЕХНИКА», ООО «Canon Ru», компании «SMART LIGHTLAB», ООО «ВЭЛАН» и ПК «АНДИ Групп». На стендах была представлена информация

о светотехнических изделиях светосигнального и осветительного назначения, включая мачтовые, транспортные и интерьерные установки, а также лазерную и оплотехнику для различных сфер применения, включая армейскую медицину. Новичок на выставке – компания «АНДИ Групп», как и другие компании, приведённая на выставку компанией «ПРОМЛАЙТ-ЭЛЕКТРО», сменила свою специализацию с испанских регуляторов мощности «REASTAT» для светильников с ДНаТ (2010–2011 гг.) на российские интерьерные светильники с СД, работающие на переотражении света от потолка (в ущерб энергоэффективности, но на пользу здоровью людей, находящихся в помещении).

Международный характер форума-экспозиции в зале D подтверждается наличием стендов Китая, Турции и других стран, но к светотехнике они прямого отношения не имеют.

Итак, «АРМИЯ-2018» ещё раз показала, что без света жизни нет на свете: ни на «гражданке», ни в армии.



Первое заседание секции «Освещение музеев»

19 сентября 2018 г. в Москве во ВНИСИ состоялось первое заседание секции НТС «Светотехника», работа которой будет сосредоточена на проблемах освещения музеев, реставрационных мастерских и центров хранения музейных предметов.

Секция «Освещение музеев» была создана в апреле 2018 года во время научно-технической конференции «Свет в музее», прошедшей в Государственном Эрмитаже. Возглавил секцию заместитель директора Эрмитажа А.В. Богданов, в её состав вошли специалисты-светотехники и представители музеев России, в том числе Эрмитажа, Исторического музея, Третьяковской галереи и других.

Участники заседания заслушали и обсудили серию докладов, представленных специалистами ООО «ВНИСИ» и ФГБНИУ «ГОСНИИР», которые рассказали о работах по первому этапу НИР по заказу Министерства культуры РФ «Проведение анализа актуальных исследований и нормативных документов в целях разработки стандарта на музейное освещение». Участники секции признали, что заслушанные доклады в полной мере отражают современные представления о музейном освещении и могут служить основой для проведения дальнейших работ по нормированию музейного освещения

с учётом внедрения в него светодиодов, а также предложили рассмотреть результаты следующего этапа работ на очередном заседании в рамках выставки *Interlight Moscow powered by light+building*.

На заседании было также отмечено необходимость разработки специального издания для представителей музейного сообщества, содержащего в себе основные термины и понятия области освещения музеев и основ светотехники.

Базовые знания и понимание светотехники необходимы сотрудникам музеев, отвечающих за климатическую среду музеев и сохранность экспонатов. Это подчёркивали в своих докладах многие участники заседания. Так, по словам представителя Минкультуры РФ Н.В. Чечель, одной из задач, стоящих сегодня перед секцией, является организация обучающих мероприятий для музейных работников по освещению, например, в рамках выставки «Интермузей». Идею проведения таких «светотехнических ликбезов» поддержал и председатель секции А.В. Богданов, и другие участники заседания.

Протокол заседания секции будет опубликован на сайте НТС «Светотехника» в ближайшее время. Следующая встреча секции состоится в ноябре 2018 г.

LED Forum в рамках выставки Interlight пройдёт в Москве при поддержке Международной комиссии по освещению

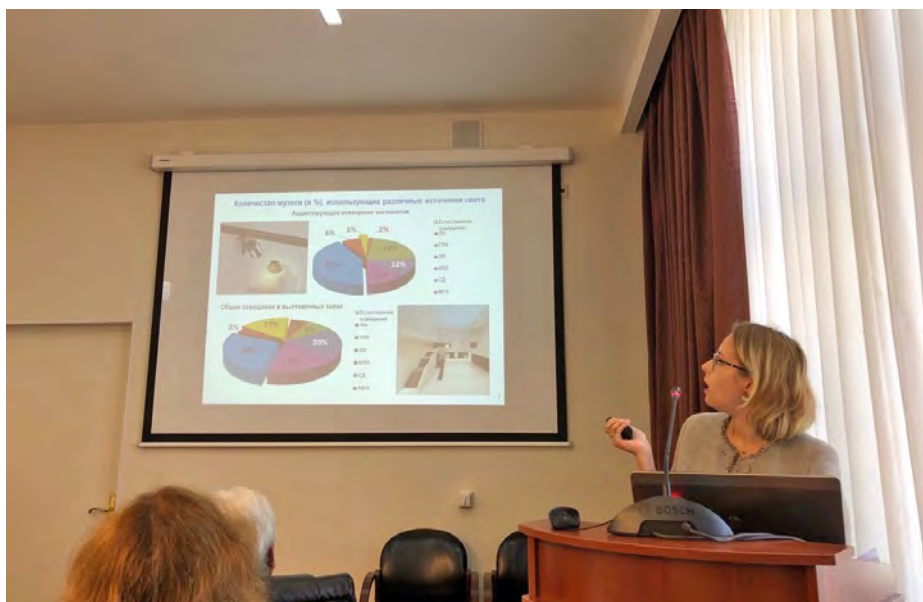
6 и 7 ноября 2018 года в ЦВК «Экспоцентр» в рамках выставки *Interlight Moscow powered by Light + Building* состоится 12-й международный *LED Forum* – крупнейшая в России и СНГ бизнес-конференция о возможностях СД технологий.

В этом году *LED Forum* пройдёт при поддержке и участии представителей Международной комиссии по освещению (МКО). Специальная сессия с участием ведущих представителей Международной комиссии по освещению (CIE) в качестве спикеров будет посвящена вопросам выхода производителей на зарубежные рынки и требованиям к сертификации товара.

Впервые в рамках форума состоится и сессия «Свет в учреждениях культуры: музеи, галереи, выставочные площадки», посвящённая применению современного освещения в музейной и выставочной деятельности. Среди участников мероприятия – ведущие музеи России. Откроет сессию Н.В. Чечель, заместитель директора департамента музеев Министерства культуры Российской Федерации. В качестве докладчиков выступят представители Государственного исторического музея, Государственной Третьяковской галереи, ГМИИ им. Пушкина, Русского музея и других крупнейших учреждений культуры. Модератор сессии – руководитель секции музейного освещения НТС «Светотехника», заместитель генерального директора Государственного Эрмитажа А.В. Богданов.

В рамках сессии «Свет: наружная реклама и ритейл» представители отрасли обсудят новые возможности для рынка, которые появились благодаря удешевлению использования СД технологий для наружной рекламы, активное развитие *digital signage* и роль светодиодов в развитии торговых центров.

Тема применения облучательных установок в теплицах, активно обсуждаемая уже несколько лет подряд на *LED*, в этом году получит новое развитие в рамках сессии «Свет в агропромышленном комплексе: теплицы», которая пройдёт при поддержке Ассоциации «Теплицы России». Помимо выступления ведущих агрохозяйств о результатах пилотных проектов с СД, участники Форума услышат доклад специалистов ВНИСИ об исследованиях в области тепличного освещения.



О Своде правил СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»

Свод правил СП 256.1325800.2016 разработан Ассоциацией «Росэлектромонтаж» и введён в действие 2 марта 2017 года [1].

В введении к СП 256.1325800.2016 отмечается, что «Свод Правил разработан с учётом положений СП 31–

110–2003 «Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий» [2].

В соответствии со статьёй 2 Федерального закона от 27 декабря 2002 года № 184-ФЗ «О техническом регулировании» Свод правил

СП 256.1325800.2016 применяется на добровольной основе в целях соблюдения требований технических регламентов.

В таблице приведены выдержки из Свода правил СП 256.1325800.2016 и комментарии к ним.

1	<p>1 Область применения Пункт 1.1 В пункте 1.1 указано, что Свод правил устанавливает правила проектирования и монтажа электроустановок напряжением до 1000 В переменного тока, 1500 В постоянного тока и высоковольтных электроустановок более 1000 В, но не выше 35 кВ переменного тока. Комментарий: Требования к электроустановкам 1500 В постоянного тока и высоковольтным электроустановкам отсутствуют, что подтверждено в введении к Своду правил.</p>
2	<p>Пункт 1.2 В пункте 1.2 указано, что Свод правил не распространяется на проектирование лечебно-профилактических учреждений. Комментарий: В тексте Свода правил приведены требования к проектированию электрооборудования медицинских организаций (лечебных учреждений), не совпадающие с существующими нормативными требованиями. Из Свода правил эти требования необходимо исключить. При проектировании электрооборудования медицинских организаций необходимо выполнять требования: – ГОСТ Р 50571.28–2006 (МЭК 60364–7–710:2002) «Электроустановки зданий. Часть 7–710. Требования к специальным установкам. Электроустановки медицинских помещений» [3], – Свод правил СП 158.13330.2014 «Здания и помещения медицинских организаций. Правила проектирования» [4], ГОСТ Р 55710–2013 «Освещение внутри зданий. Нормы и методы измерений» [5], – Свод правил СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» (частично) [6], Информация для проектировщиков приведена в статье «Искусственное освещение медицинских учреждений», опубликованной в журнале «Светотехника» № 4 2016 год [7].</p>
3	<p>4 Общие положения Пункт 4.4 В общественных зданиях рекомендуется предусматривать отдельные помещения для хранения и ремонта светильников и электрооборудования (при числе светильников 300 и более). Комментарий: Целесообразность устройства отдельного помещения должна решаться заказчиком в задании на проектировании независимо от количества устанавливаемых светильников.</p>
4	<p>5 Искусственное освещение 5.1 Системы и виды освещения Пункт 5.1.1 Рабочие чертежи искусственного освещения помещений зданий и сооружений должны оформлять по ГОСТ 21.608. Комментарий: – ГОСТ 21.608–2014 «Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации внутреннего электрического освещения» [8] был выпущен в 1984 году, в редакции 2014 года практически не претерпел изменений и не соответствует современным требованиям к проектированию осветительных установок, – отсутствуют требования к оформлению чертежей искусственного освещения в стадии «проектная документация». Пункт 5.1.2 Комментарий: Резервное освещение следует предусматривать в помещениях, требования к которым указаны в пункте 7.109 Свода правил СП 52.13330.2011 [6], в том числе в электрощитовых, станциях пожаротушения, диспетчерских, пожарных постах, тепловых пунктах вне зависимости от нахождения в них дежурного персонала. Из перечня помещений, указанных в пункте 5.1.2, необходимо исключить помещения, для которых не требуется резервное освещение. Пункты 5.1.1, 5.1.3–5.1.6 Комментарий: При проектировании освещения внутри зданий взамен данных, указанных в пунктах 5.1.1, 5.1.3–5.1.6, необходимо руководствоваться обязательными требованиями Свода правил СП 52.13330.2011, в том числе требованиями к аварийному, дежурному и охранному освещению [6].</p>

Требования к выполнению аварийного освещения, которыми следует руководствоваться, приведены также в следующих нормативных документах:

- Свод правил СП 3.13130.2009 «Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности». Раздел 5. Требования пожарной безопасности к световому оповещению и управлению эвакуацией людей» (светотехническая и электротехническая части) [9].
- ГОСТ Р 55842–2013 (ИСО 30061:2007) «Освещение аварийное. Классификация и нормы» (светотехническая и электротехническая части) [10].
- ГОСТ Р 50571.5.56–2013 / МЭК 60364–5–56:2009 «Электроустановки низковольтные. Часть 5–56. Выбор и монтаж электрооборудования. Системы обеспечения безопасности». В его состав входит раздел 560.9 «Требования к аварийному освещению» (электротехническая часть) [11].
- ГОСТ Р 50571.4.42–2012 / МЭК 60364–4–42:2010 «Электроустановки низковольтные. Часть 4–42. Требования по обеспечению безопасности. Защита от тепловых воздействий» (светотехническая и электротехническая части) [12].
- ГОСТ Р 50571.29.2009 (МЭК 60364–5–55:2008) «Электрические установки зданий. Часть 5–55. Выбор и монтаж электрооборудования. Прочее оборудование» (электротехническая часть) [13].
- ГОСТ Р 50571.28–2006 (МЭК 60364–7–710:2002) Электроустановки зданий. Часть 7–710 Требования к специальным электроустановкам. Электроустановки медицинских помещений». В его состав входит раздел 710.556 «Обеспечение безопасности», в котором приведены требования к аварийному освещению (светотехническая и электротехническая части) [3].

Отмечается, что в жилых многоквартирных домах аварийное освещение следует предусматривать независимо от количества этажей.

Подробнее требования к аварийному освещению приведены в статье «Аварийное освещение. Нормативные документы», опубликованной в журнале «Светотехника» № 6 2016 год [14].

5.2 Показатели искусственного освещения помещений

Комментарий:

– Отмечается следующее: В постановлении Правительства Российской Федерации от 26.12.2004 года № 1521 утверждён перечень национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

В этот перечень в позиции 37 входит Свод правил СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение», разделы 1 (пункты 1.1, 1.2), 4–6, 7 (пункты 7.1–7.35, 7.37, 7.38, 7.40, 7.45–7.86, 7.101–7.122) и приложение К «Нормативные показатели освещения основных помещений общественных, жилых, вспомогательных зданий» [6].

Раздел 7 содержит пункты 7.104–7.114 аварийное освещение и 7.122 охранное и дежурное освещение.

В Своде правил СП 52.13330.2011 внутри зданий нормируется минимальная освещённость и объединённый показатель дискомфорта UGR.

– Для проектирования освещения целесообразно также применять ГОСТ Р 55710–2013 «Освещение внутри зданий. Нормы и методы измерений» [5].

Указанный ГОСТ выполнен на основе европейских норм EN12464–1:2002 Light and Lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places [15].

Обращается внимание на то, что в ГОСТ Р 55710–2013 нормируется средняя освещённость и объединённый показатель дискомфорта UGR.

Информация о содержании и качестве ГОСТ Р 55710–2013 приведена в статье «Искусственное освещение медицинских помещений» [7].

В СП 256.1325800.2016:

– **Таблица 5.1** «Показатели искусственного освещения помещений жилых зданий» приняты на основании таблицы 4.1 Свода правил СП 31–110–2003.

Комментарий:

В таблице 5.1:

– вместо требуемого объединённого показателя дискомфорта UGR нормируется показатель дискомфорта М, для определения значения которого у проектировщиков отсутствуют инженерные методы расчёта.

Обращается внимание на то, что при расчёте освещения в компьютерной программе DIALux показатель UGR определяется автоматически для каждого конкретного помещения и затем сравнивается проектировщиком с его нормативным значением, – в технических помещениях, в том числе в электрощитовых, освещённость составляет 20 лк.

В соответствии с позицией 89 «обязательного приложения К» Свода правил СП 52.13330.2011 уровень освещённости в электрощитовой должен быть равен 200 лк в зоне расположения электрооборудования,

– пропущены требования к освещённости шахт лифтов, которая в соответствии с пунктом 5.5.6.6 ГОСТ Р 53780–2010 «Лифты. Общие требования безопасности к устройству и установке» составляет 50 лк [16].

Таблица 5.2 «Показатели искусственного освещения основных помещений общественных зданий, а также сопутствующих им производственных помещений» приняты на основе приложения К Свода правил СП 52.13330.2011 [6].

Комментарий:

В таблице 5.2:

– отсутствуют требования к определению КЕО,

– внесены не согласованные со Сводом правил СП 52.13330.2011 изменения и дополнения, исключены отдельные позиции, что недопустимо,

– вместо требуемого объединённого показателя дискомфорта UGR нормируется показатель дискомфорта М, для определения значения которого у проектировщиков отсутствуют инженерные методы расчёта.

Вывод: Для расчёта показателей искусственного освещения внутри жилых и общественных зданий взамен данных таблиц 5.1 и 5.2 СП 256.1325800.2016 следует руководствоваться требованиями «обязательного приложения К» Свода Правил СП 52.13330.2011 [6].

Пункт 5.2.3

Коэффициент пульсации освещённости на рабочих поверхностях не должен превышать значений, приведённых в таблицах 5.1, 5.2.

Комментарий:

– у проектировщиков отсутствуют инженерные методы расчёта коэффициента пульсации освещённости,
– для обеспечения нормируемого коэффициента пульсации светильники с газоразрядными лампами, применяемые внутри зданий, необходимо комплектовать электронными пускорегулирующими аппаратами.

Материал по этому вопросу «О применении светильников с люминесцентными лампами и электронными ПРА» опубликован в журнале «Светотехника»

№ 3 2014 год [17]. Этим материалом, в котором приведена существующая область применения электронных ПРА, в том числе необходимых для светильников аварийного освещения, целесообразно пользоваться при проектировании осветительных установок.

Пункты 5.2.6, 5.2.7, 5.2.8

Комментарий:

Проектирование освещения зрелищных предприятий, конференц-залов и актовых залов следует выполнять в соответствии с действующими нормативными документами, указанными в задании на проектирование.

Требования главы 7.2 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) устарели [18].

Пункт 5.2.9

Контрольные точки, в которых необходимо обеспечивать нормируемую освещённость, следует принимать по ГОСТ Р 54944.

Комментарий:

В программе DIALux освещённость в помещениях определяется автоматически и полученные значения сравниваются проектировщиком с нормативными, поэтому дополнительное определение контрольных точек по ГОСТ Р 54944–2012 «Здания и сооружения. Методы измерения освещённости» [19] не требуется.

5.3 Источники света

Пункт 5.3.2

Комментарий:

Следует исключить применение ламп ДРЛ с улучшенной цветопередачей.

Пункт 5.3.6

Комментарий:

4 Следует исключить применение ламп накаливания в электрощитовых, машинных помещениях лифтов, нормируемая освещённость в которых составляет 200 лк. Для этой цели, а также в других технических помещениях необходимо применять люминесцентные и светодиодные светильники.

Пункт 5.3.7

Для общего освещения учреждений дошкольного, школьного и профессионально-технического образования, а также в основных функциональных помещениях лечебно-профилактических учреждений следует применять люминесцентные (включая компактные) лампы и лампы накаливания, в том числе галогенные. Применение светодиодных источников света в указанных помещениях не допускается.

Комментарий:

В письме Роспотребнадзора от 01.10.2012 года № 01/11157–12–32 «Об организации санитарного надзора за использованием энергосберегающих источников света», разрешающего применение светодиодного освещения в жилых и общественных зданиях, указывается следующее [20]:

С целью определения возможности применения светодиодного освещения и светодиодных светильников НИИ гигиены и охраны здоровья детей и подростков Учреждения РАМН ФГБУ «Научный центр здоровья детей» РАМН при участии сотрудников ГП «Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН» и Научно-исследовательского института строительной физики Российской Академии Архитектуры и строительных наук были проведены исследования психофизиологического воздействия светодиодного освещения и светодиодных светильников на организм человека.

Проведённые исследования показали возможность применения светодиодного освещения и светодиодных светильников в жилых и общественных зданиях.

В связи с этим, органы управления образованием по субъектам Российской Федерации, юридические лица и индивидуальные предприниматели, образовательные и детские оздоровительные организации, проектные организации должны быть уведомлены о возможности обеспечения гигиенических норм освещённости, установленных СанПиН 2.4.2.2821–10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях», СанПиН 2.4.3.1186–03 «Санитарно-эпидемиологические требования к организации учебно-производственного процесса в образовательных учреждениях начального профессионального образования» и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий», в учреждениях общего и начального профессионального образования, а также в детских оздоровительных учреждениях, путём применения светодиодных источников света и осветительных приборов на их основе, при соблюдении ряда условий.

При использовании в системах общего освещения в помещениях общественных зданий и в учебном процессе светильники со светодиодами должны соответствовать ряду качественных и количественных показателей освещения.

4	<p>5.4 Выбор и расположение светильников Таблица 5.3 Классификация помещений и зон Комментарий: Для классификации помещений и зон проектировщики совместно с технологами должны применять требования действующих нормативных документов, исключив в дальнейшем нестыковки, имеющиеся в таблице. Так, душевые отнесены одновременно к влажным и одновременно к особо сырым помещениям, а насосные – к влажным и сырым помещениям, что недопустимо.</p> <p>Таблица 5.4 Минимально допустимая степень защиты светильников Комментарий: Указанную таблицу и примечания к ней, рассчитанные на применение выпускаемых ранее светильников, следует исключить. Для определения степени защиты светильников проектировщики совместно с технологами должны применять требования действующих нормативных документов.</p> <p>Пункты 5.4.4–5.4.7 Комментарий: Требования этих пунктов устарели. В программе DIALux и других компьютерных программах выполняются светотехнические проекты высокого качества с применением современных светильников, обеспечением количественных и качественных характеристик освещения.</p> <p>Пункт 5.4.12 Комментарий: При проектировании освещения плавательных бассейнов необходимо выполнять требования действующих отечественных и зарубежных нормативных документов.</p> <p>Пункты 5.4.13–5.4.20, 5.4.22–5.4.24 Комментарий: – содержание пунктов повторяет в основном требования свода правил СП 31–110–2003, – пункт 5.4.17 дополнен разрешением на установку светильников в лоджиях и балконах жилых зданий, – пункт 5.4.21 текст «Электроснабжение домиков садоводческих товариществ должно соответствовать ГОСТ Р 50571.7.705» следует исключить, так как в указанном ГОСТ отсутствуют требования к электроснабжению. Для летних домиков на участках садоводческих товариществ удельные расчётные нагрузки для расчёта сетей электроснабжения следует принимать по таблице 7.1 свода правил СП 256.1325800.2016. – в дополнение к пункту 5.4.23 в соответствии с требованием пункта 2.12.15 «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» в здании необходимо предусматривать помещение для хранения отработанных люминесцентных и других газоразрядных ламп, содержащих ртуть. Эти лампы следует в дальнейшем направлять для дезактивации [21].</p>
5	<p>6 Электроснабжение Пункт 6.1 Категории электроприемников Категории электроприемников по надёжности электроснабжения жилых и общественных зданий отражены в таблице 6.1. Комментарий: – содержание таблицы 6.1 повторяет требования таблицы 5.1 свода правил СП 31–110–2003 [2]. В таблице 6.1: – не указаны категории надёжности электроснабжения аварийного освещения общественных зданий, диспетчеризации, автоматизированных систем учёта, контроля и управления, лифтов для пожарных подразделений, – не указаны категории надёжности электроснабжения других общественных зданий (помещений), перечисленных в своде правил СП 118.13330.2012 (СНиП 31–06–2009) «Общественные здания и сооружения» [22], – не указаны категории надёжности противопожарных устройств и охранной сигнализации предприятий бытового обслуживания, – из таблицы 6.1 следует исключить требования категории надёжности электроприемников лечебно-профилактических учреждений. Эти требования приведены в ГОСТ Р 50571.28–2006 [3]. Материал «Категории надёжности электроснабжения многоквартирных жилых и общественных зданий» с комментариями опубликован в журнале «Светотехника» № 3 2015 год [23]. В этом материале приведены нормативные разрешения на электроснабжение электроприемников 1-ой категории при наличии одной питающей линии 10 (6) кВ. Вывод: Требуется конкретизация требований к категории надёжности электроснабжения электроприемников жилых и общественных зданий.</p> <p>Пункты 6.2–6.13 раздела электроснабжения Комментарий: Содержание пунктов повторяет без изменений требования свода правил СП 31–110–2003.</p>
6	<p>7 Расчётные электрические нагрузки 7.1 Нагрузки жилых зданий Комментарий: – содержание пунктов 7.1.1–7.1.12 повторяет требования раздела «Нагрузки жилых зданий» свода правил СП 31–110–2003, – в пояснениях к таблице 7.3 вместо «Р_{кв} – нагрузка электроприемников квартир повышенной комфортности» следует читать «Р_{кв} – нагрузка электроприемников квартиры повышенной комфортности», – в пункте 7.1.7 вместо слов «по таблице 6.4» следует читать «по таблице 7.4»,</p>

6	<p>– в пункте 7.1.12: целесообразно уточнить значение коэффициента мощности лифтов, выпускаемых в настоящее время, вместо пункта 7.2.19 указать пункт 7.2.18, – целесообразно уточнить, проектируются ли в настоящее время общежития коридорного типа, требования к определению расчётных нагрузок которых были указаны в 1989 году в ВСН 59–88 / Госгражданстрой «Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования» [24], – необходимо указать требования к электрическим нагрузкам коттеджей.</p> <p>7.2 Нагрузки общественных зданий <i>Комментарий:</i> – содержание пунктов 7.2.1–7.2.20 повторяет требования раздела «Нагрузки общественных» зданий» свода правил СП 31–110–2003, – в пункте 7.2.4 установленную мощность розетки Рур вместо 0,06 кВт целесообразно принять равной 0,1 кВт, – в таблицу 7.8 целесообразно включить коэффициенты спроса для персональных компьютеров, устанавливаемых в офисах, – в позиции 6 таблицы 7.8 вместо номера таблицы 6.4 указать 7.4, – в пункте 7.2.8 расчётную нагрузку $P_{рс}$ питающей линии посудомоечных машин и остального технологического оборудования предприятий общественного питания целесообразно определять как сумму указанных мощностей, исключив коэффициент 0,65, – в пункте 7.2.9: в формуле по определению суммарной расчётной нагрузки питающих линий и силовых вводов предприятий общественного питания целесообразно исключить понижающий коэффициент 0,6, применяемый только для сантехнического оборудования предприятий общественного питания и не применяемый для других категорий общественных зданий, следует исключить текст «по формуле 11», – в пункте 7.2.18 после слов «силовых сетей» следует указать «силовых и осветительных сетей», – в таблице 7.12: целесообразно уточнить значение коэффициента мощности для лифтов, исключить значения коэффициента мощности для ламп ДРЛ и применение светильников с люминесцентными лампами с некомпенсированными ПРА, указать значения коэффициентов мощности светодиодных светильников, – целесообразно уточнить данные таблицы 7.14 «Укрупнённые удельные электрические нагрузки», опубликованные в СП 31–110–2003 в 2004 году. Целесообразно вернуться к теме «Нагрузки общественных зданий». Через 34 года данные таблиц 6, 11, 12, 13 нагрузок общественных зданий, указанные в «Инструкции по проектированию электрооборудования общественных зданий массового строительства» СН 543–82 [25], опубликованы практически без изменений в своде правил СП 256.1325800.2016.</p> <p>7.3 Компенсация реактивной нагрузки <i>Комментарий:</i> – содержание пунктов 7.3.1–7.3.2 повторяет требования раздела «Компенсация реактивной мощности» свода правил СП 31–110–2003, – целесообразно из пункта 7.3.1 исключить дополнение, касающееся синусоидальной формы напряжения сети и не относящееся к требованиям раздела 7.3.</p>
7	<p>8. Схемы электрических сетей <i>Комментарий:</i> – содержание пунктов 8.1–8.11 с дополнениями повторяет данные раздела «Схемы электрических сетей» свода правил СП 31–110–2003. Необходимо указать требования к выполнению схемы панели противопожарных устройств ППУ здания. Материал «Панель противопожарных устройств здания» опубликован в журнале «Светотехника» № 3/2016 год [26], – из пункта 8.8 исключить слово «оптические». Содержание свода правил СП 256.1325800.2016 дополнено пунктами 8.12.1–8.12.12, в которых приведены требования к аварийному освещению зданий. Эти требования не соответствуют нормативным документам. Содержание пунктов 8.13–8.23 с дополнениями повторяет данные раздела «Схемы электрических сетей» свода правил СП 31–110–2003, при этом обращается внимание на то, что: – не разрешается подключать питание домофонов и огней светового ограждения к панели противопожарных устройств ППУ здания, для этой цели в ГРЩ предусматривается АВР для электроприемников, не относящихся к противопожарным устройствам, в том числе для индивидуального теплового пункта, – при определении потери напряжения внутри здания взамен текста в пункте 8.23 следует руководствоваться таблицей G.52.1 ГОСТ Р 50571.5.52–2011 / МЭК 60364–5–52:2002 «Электроустановки низковольтные. Часть 5–52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки» [27], с разъяснением, полученным 27 апреля 2015 года от ответственного секретаря Технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электрические установки зданий» Г.Д. Дасько и технического директора Московского института энергобезопасности и энергосбережения А.А. Шалыгина «За источник питания в контексте ГОСТ Р 50571.5.52–2011 следует принимать распределительный щит (щиток), непосредственно питающий приёмник электрической энергии». Это разъяснение опубликовано также в журнале «Новости Электротехники» № 6/2014 год, страница 52 [28].</p>
8	<p>9 Силовые распределительные сети <i>Комментарий:</i> Содержание пунктов 9.1–9.8 повторяет данные раздела «Схемы электрических сетей» свода правил СП 31–110–2003.</p>

9	<p>10. Групповые сети Содержание пунктов 10.1–10.13 с дополнениями повторяет данные раздела «Схемы электрических сетей» Свода правил СП 31–110–2003.</p> <p>Комментарий:</p> <ul style="list-style-type: none"> – пункт 10.3: с учётом пусковых токов требуется уточнение количества светодиодных модулей, отдельных светодиодов, подключаемых на одну фазу, – пункт 10.4: применение устройств дифференциального тока (УДТ) не соответствует нормативным требованиям, и эти требования следует исключить, – пункт 10.6: питание эвакуационного освещения и целиком аварийного освещения следует выполнять от панели противопожарных устройств ППУ здания, – пункт 10.8: не допускается прокладывать сети рабочего и аварийного освещения в одном коробе, на одном лотке, – пункт 10.10: <p>Ниже, без указания источника информации, приводится текст пункта 10.10 Свода правил СП 256.1325800.2016: «Групповая линия аварийного освещения, защищённая устройством защиты от сверхтока, должна содержать не более 20 светильников с суммарной нагрузкой не более 60 % от номинальной нагрузки устройства защиты».</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ниже приводятся данные из нормативных документов, касающиеся разъяснения требований пункта 10.10: – Пункт 560.9.2 ГОСТ Р 50571.5.56–2013 / МЭК 60364–5–56:2009 Электроустановки низковольтные. Часть 5–56. Выбор и монтаж электрооборудования. Системы обеспечения безопасности: «От одной цепи, защищённой устройством защиты от сверхтока, могут быть запитаны не более 20 светильников с нагрузкой не более чем 60 % от номинальной» [11]. – Пункт 556.7.8 ГОСТ Р 50571.29–2009 (МЭК 60364–5–55:2008) «Электрические установки зданий. Часть 5–55. Выбор и монтаж электрооборудования. Прочее оборудование» [13], которым следует руководствоваться при проектировании взамен пункта 10.10 Свода правил СП 256.1325800.2016: «Не более 20 светильников аварийного освещения с общей нагрузкой 6 А могут быть запитаны от одной цепи, защищённой одним устройством защиты от сверхтока. <p>Примечание – Требования не являются обязательными, если применяются автономные устройства с аккумуляторными батареями согласно 556.6.7 настоящего стандарта».</p> <ul style="list-style-type: none"> – Для дальнейшего применения следует внимательно прочитать требования пункта 556.6.7 ГОСТ Р 50571.29–2009 [13]. – пункт 10.13: применение устройств дифференциального тока (УДТ) не соответствует нормативным требованиям, данные пункта 10.13 следует исключить.
10	<p>11. Управление освещением Комментарий: Содержание пунктов 11.1–11.16 с дополнениями повторяет данные раздела «Управление освещением» Свода правил СП 31–110–2003.</p> <ul style="list-style-type: none"> – пункт 11.10: на вводах в распределительные пункты и групповые щитки не следует применять автоматические выключатели (см. пункт 8.20), пункт 8.3 указан ошибочно, – пункт 11.11: не следует выполнять управление аварийным освещением с распределительных пунктов и групповых щитков. <p>В соответствии с требованием пункта 560.9.13 ГОСТ Р 50571.5.56–2013 «Электроустановки низковольтные. Часть 5–56. Выбор и монтаж электрооборудования. Системы обеспечения безопасности» [11] коммутационную аппаратуру и устройства управления аварийным освещением следует размещать в отдельных (и добавим) огнестойких помещениях.</p> <ul style="list-style-type: none"> – пункт 11.12, касающийся освещения медицинских организаций, следует исключить из текста Свода правил СП 256.1325800.2016.
11	<p>12 Защита внутренних электрических сетей напряжением до 1000 В и выбор сечений проводников Комментарий: Содержание пунктов 12.1–12.7 с дополнениями повторяет данные раздела «Защита внутренних электрических сетей напряжением до 1000 В и выбор сечений проводников» Свода правил СП 31–110–2003.</p> <ul style="list-style-type: none"> – пункт 12.3: в качестве вводных аппаратов щитков не следует применять автоматические выключатели и устройства защитного отключения со встроенной защитой (см. пункт 8.20 СП 256.1325800.2016), – пункт 12.5: выбор аппаратов защиты следует выполнять в соответствии с таблицей 7.1, в которой удельная расчётная электрическая нагрузка электроприемников квартир составляет 4,5 кВт для зданий с газовыми плитами и 10 кВт для зданий с электрическими плитами, – пункт 12.7: необходимо исключить применение светильников с разрядными лампами и некомпенсированными ПРА. <p>В разделе 12 не указаны основные требования ГОСТ Р 50571.5.52–2011 [27] по выбору сечений проводов. Отмечается, что допустимые токовые нагрузки кабелей и изолированных проводов, указанные в приложении В ГОСТ Р 50571.5.52–2011 для выбора сечений, заменяют токовые нагрузки кабелей и изолированных проводов напряжением до 1 кВ переменного тока, предусмотренные главой 1.3 Правил устройства электроустановок шестого издания.</p> <p>Исключение составляют:</p> <ul style="list-style-type: none"> – кабели с бумажной пропитанной маслосканифольной и нестекающей массой изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, допустимые токовые нагрузки которых следует выбирать по ГОСТ 18410–73 «Кабели силовые с бумажной пропитанной изоляцией» [29], – кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, прокладываемые в земле, допустимые токовые нагрузки которых следует принимать по межгосударственному стандарту ГОСТ 31996–2012 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ» [30] или если иное не установлено в технических условиях на кабели конкретных марок.
12	<p>13 Токи короткого замыкания Комментарий: Содержание пунктов 13.1–13.4 с дополнениями повторяет данные раздела «Токи короткого замыкания» Свода правил СП 31–110–2003.</p>



6–7 ноября 2018

ЦВК «Экспоцентр»
Москва

Международная конференция о возможностях применения LED-технологий



Агропромышленный комплекс: теплицы



Городские объекты и Smart City



Учреждения культуры: музеи и выставки



Наружная реклама и ритейл

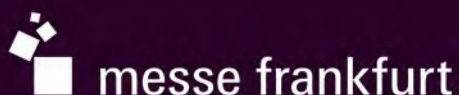
Ключевые темы:

- Изменения в отрасли благодаря LED-технологиям
- Новые возможности применения светодиодов
- Нормы и стандарты освещения в отрасли

По вопросам участия:

Елена Бежук
+ 7 495 649 87 75 (доб. 161)

www.ledforum-moscow.ru



В рамках выставки:

interlight

MOSCOW

powered by light + building

interlight

MOSCOW

powered by light + building

Международная выставка светотехники,
электротехники, LED-технологий и компонентов

6–9 ноября 2018

ЦВК «Экспоцентр»
Москва



Светотехника



Компоненты | **NEW!**



Электротехника



Электрические лампы



LED-технологии



Автоматизация зданий /
Умный дом

Получите бесплатный билет на сайте
www.interlight-moscow.ru



messe frankfurt



СветоСервис
ГРУППА КОМПАНИЙ



ООО «Светосервис-Подмосковье» :
инновационные решения в освещении для столицы и регионов

Полный спектр услуг в области

- Проектирования
- Монтажа
- Обслуживания
- Управления Системами Функционального, архитектурного и ландшафтного освещения



ООО «Светосервис - Подмосковье»
129626, Москва,
1-й Рижский пер., 6



svetoservis.ru



+7 (495) 786-85-82



«LED Industry Kit Gen. 2» - освещение производственных помещений

Компания Vossloh-Schwabe постоянно совершенствует свою продукцию, расширяя её потребительские свойства и области применения. Как пример - второе поколение сборных светодиодных модулей «LED Industry Kit Gen. 2», предназначенных для освещения производственных помещений, складов, спортивных сооружений. Новые модули состоят из нескольких компонентов:

Светодиодная плата с контактными зажимами:

- рабочий ток: 350, 500, 700, 1050 мА;
- максимальная световая отдача: 184 лм/Вт;
- цветовая температура: 3000, 4000, 5000 К.

Прозрачная оптика из поликарбоната:

- высокая эффективность: до 92%;
- стойкость к удару: IK08/5 Дж;
- степень защиты: IP65 (с силиконовым уплотнением).

Радиатор алюминиевый анодированный для платы:

- отверстия для установки платы и оптики под самонарезающие винты.

Алюминиевый анодированный бокс для блока питания:

- пластиковые боковые крышки;
- уплотнительные прокладки под крышки;
- степень защиты: IP65 (в собранном состоянии).

БОЛЬШОЙ СРОК СЛУЖБЫ:

> 54000 часов (L90/B10)

МОЖНО ВСТРОИТЬ БЛОК ПИТАНИЯ

5 ЛЕТ ГАРАНТИИ

ТОЧНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЦВЕТА:

3 SDCM

ТРИ ВИДА ОПТИКИ

