

# СВЕТО 3·2020 ТЕХНИКА





АО «Кадошкинский электротехнический завод»

## ФИТООБЛУЧАТЕЛИ МАРКИ **GALAD** — ОСНОВА БОГАТОГО УРОЖАЯ



### СВЕТОДИОДНЫЕ СВЕТИЛЬНИКИ ДЛЯ ТЕПЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

- Передовые исследования
- Технические инновации
- Индивидуальный подход
- Простота эксплуатации

БОЛЕЕ **300 УСПЕШНЫХ ПРОЕКТОВ** ТЕПЛИЧНОГО  
ОСВЕЩЕНИЯ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ



431900, Республика Мордовия,  
п. Кадошкино,  
ул. Заводская, 1



ketz@moris.ru  
galad.ru



(83448) 2-31-21,  
2-39-75, 2-32-40,  
2-34-53



# СЛАВА УЧАСТНИКАМ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ

Наш народ отмечает семьдесят пятую годовщину исторической победы над гитлеровским фашизмом в Великой Отечественной войне.

Свой вклад в разгром нацистской Германии внесли и светотехники, мужественно сражавшиеся на фронтах Отечественной войны и самоотверженно трудившиеся в тылу.

С первых дней Великой Отечественной войны наши коллеги по профессии вступили в ряды Армии и Военно-Морского флота, в Народное ополчение, с оружием в руках защищая свободу и независимость нашего государства.

Сегодня мы низко склоняем головы перед светлой памятью погибших на фронте товарищей. Свои жизни за Родину отдали: Б.Ю. АЗАРХ, Ю.Е. АНТУЛАЕВ, Ф.М. БОЛОТИН, А.А. БОРОДИН, А.И. ГЕРАСИМОВИЧ, Б.И. ГОЛУБЕВ, П.Л. ДАВИДСОН, А.Д. ДЕШИН, П.С. КОЧЕВАНСКИЙ, М.И. ЛИПКИН, А.В. МОММА, Н.В. ПЛОТНИКОВ, А.А. ПОПОВ и многие другие. Мы никогда не забудем и погибших в суровые годы блокады Ленинграда С.М. ДЕМЧЕНКО, В.А. ЗЕЛЕНКОВА, Е.Н. ЯКОВЛЕВА.

В пехоте, авиации и артиллерии, на флоте, в инженерных войсках и войсках ПВО све-

тотехники прошли по смертельно опасным дорогам второй мировой войны. Они познали и тяжёлую горечь отступления, и великую радость победы. Их славный путь пролёг от Москвы до Берлина, от Сталинграда до Кенигсберга. Они освобождали Будапешт, Варшаву, Прагу.

Большое число светотехников трудилось в тылу, отдавая все свои силы и знания делу победы над врагом.

Среди ветеранов-светотехников, принимавших активное участие в общественной жизни и работающих в различных организациях, нельзя не назвать имена Г.И. АШКЕНАЗИ, В.В. БУРСКОГО, Г.Б. БУХМАНА, А.Л. ВАССЕРМАНА, М.М. ТУТОВОРА, Н.Н. КИРЯЕВА, И.А. КУЛАКОВА, В.С. ЛИТВИНОВА, А.И. РЫМОВА, В.В. ТРЕМБАЧА, В.В. ФЁДОРОВА, М.И. ФУТЕНФИРОВА, В.М. ЦАРЬКОВА, В.И. ДЕМЧЕВА, Т.К. ГЛАЗУНОВА, И.А. КУЛАКОВА, А.С. ЗУСМАНА и других ветеранов.

Поздравляя читателей нашего журнала с днём 75-летия Победы, редакционная коллегия и редакция выражают глубокую благодарность ветеранам-светотехникам, внёсшим своими воинскими подвигами вклад в историческую победу в Великой Отечественной войне.

1945  
2020



**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

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

**УЧРЕДИТЕЛИ:**

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

**РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА**

Генеральный директор  
**Н.С. Шерри**; sherri@bl-g.ru  
 Старший научный редактор  
**Е.И. Розовский**; rozovskiy@vniisi.ru

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

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

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

Научный редактор  
**С.Г. Ашурков**; ashurkov@l-e-journal.com

Научный редактор  
**А.Ю. Басов**; basov@bl-g.ru

Научный редактор  
**Т.В. Мешкова**; mtv@l-e-journal.com

Выпускающий редактор  
**П.А. Федорищев**; fpa@l-e-journal.com  
 Зав. редакцией

**М.И. Титаренко**; titarenko@l-e-journal.com  
 Стилист английской версии

**М.Д. Виноградова**  
 Секретарь редакции

**Е.А. Булгакова**; bulgakova@l-e-journal.com  
 Дизайнер-верстальщик

**А.М. Богданов**  
 Контент-менеджер

**Е.С. Серый**

**ИНОСТРАННЫЕ КОРРЕСПОНДЕНТЫ****Аргентина**

Пабло Икстайна (*Pablo R. Ixtaina*), Национальный технологический университет Ла-Платы;

**Франция**

Георг Циссис (*Geordes Zissis*), университет Тулузы;

**Индия**

Сасвати Мазумдар (*Saswati Mazumdar*), университет Джадавпур;

**Словения**

Грега Бизяк (*Grega Bizjak*), Люблянский университет;

**Турция**

– Тугче Казанасмаз (*Tugce Kazanasmaz*), Измирский технологический институт;  
 – Эрдал Шехирли (*Erdal 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 11.05.20. Подписано в печать 08.06.20  
 Формат 60×88 1/8. Печ.л. 10,00. Тираж 1200

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ 3·2020

В НОМЕРЕ

МАЙ • ИЮНЬ

## 75 ЛЕТ ПОБЕДЕ В ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЕ

- Слава** участникам Великой Отечественной войны..... 1
- Щепетков Н.И., Завгородская Т.Н.** Свет памяти в мемориальных ансамблях..... 4
- Айзенберг Ю.Б.** Воины-светотехники на передовой при штурме Берлина в апреле 1945 года..... 10
- Лесман Е.А.** Свет в Берлинской операции..... 11
- Федорищев П.А.** Ветераны Всесоюзного светотехнического института..... 13
- Снетков В.Ю., Лебедкова С.М.** Вклад в великую Победу преподавателей и сотрудников кафедры светотехники МЭИ..... 17
- Бизнес и инновации** .....9, 41, 50, 58, 63, 70, 77, 85
- Колонка** главного редактора..... 22
- Поповский Ю.Б., Щепетков Н.И.** Инсоляция и COVID-19: защита от аггрессора ..... 23
- Нарбони Р.** Освещение общественных пространств: новые тенденции и дальнейшее развитие..... 27
- Тихонов П.В.** Энергосберегающая система освещения на основе фотоэлектрических модулей ..... 38
- Гюрсой М.Е., Диндар Б., Гюль О.** Новая стратегия преобразования традиционного дорожного освещения в умное..... 44
- Сокмен К.Ф., Караташ О.Б.** Исследование зависимостей температуры p-n-переходов и световых потоков СД модулей нового поколения от различных параметров... 51
- Воронов В.В., Щепетков Н.И.** О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера (Часть III. Результаты и выводы) ..... 60
- Ершов С.В., Жданов Д.Д., Волобой А.Г., Дерябин Н.Б.** Метод квазизеркальных элементов для снижения стохастического шума при моделировании освещённости..... 64
- Баг М., Мазумдар С., Рэй К.К.** Дешёвый датчик освещённости для систем управления совмещённым освещением..... 71
- Гурылева А.В., Хорохоров А.М., Кобозев В.С.** Методы многоканальной съёмки для гиперспектрометров с высоким спектральным и пространственным разрешением ..... 78
- Алатас Б., Бингол Х.** Сравнительная оценка основанных на законах распространения света интеллектуальных поисковых и оптимизационных алгоритмов ..... 86
- ## НОВОСТИ МКО
- Международная** комиссия по освещению выпустила официальное заявление по использованию УФ излучения для снижения риска передачи COVID-19 ..... 26
- ## ХРОНИКА
- Айзенберг Ю.Б.** Всемирный День Света..... 93
- Зиничева А.С., Качалина М.Д.** Онлайн семинар Американского светотехнического общества (IES) на тему «Бактерицидное УФ облучение во время коронавируса COVID-19»..... 94
- ## СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
- Международные** выставки и конференции в 2020 г. (III квартал) ..... 63
- ## ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
- Светлые** решения для умного города от МСК БЛ Групп ..... 42
- Гарантия** высокого качества жизни жителей города «Светосервис Сочи»..... 59
- Ультрафиолетовые** облучатели ЛЗСИ ..... 96
- Фитооблучатели** производства Кадошкинского электротехнического завода..... 2 с. обл.
- Oroga Engineering:** Качество, надёжность, оперативность..... 3 с. обл.
- Подписка** на журнал «Светотехника» ..... 4 с. обл.

# Свет памяти в мемориальных ансамблях

Н.И. ШЕПЕТКОВ, Т.Н. ЗАВГОРОДСКАЯ

Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва  
E-mail: n\_shchepetkov@inbox.ru

## Аннотация

К 75-летию юбилею Победы в Великой Отечественной войне готовится вся Россия, хотя намеченным на государственном уровне мемориально-праздничным мероприятиям мешают глобальная, сравнимая с мировой войной, напасть – пандемия коронавируса. Она, как и война, когда-нибудь закончится, а память о юбилее должна и будет жить. Поэтому тема статьи актуальна: свет памяти и память (*memory*) в свете – вечного огня и художественно – сакрального освещения (*Tribute in Light*, как было в Нью-Йорке в 2001 г.). Рассмотрены проблемы (а их немало) архитектурного освещения мемориальных ансамблей и памятников в разных городах РФ. Приведены положительные и отрицательные примеры светодизайнерских решений. Отмечен острый недостаток информации по современному состоянию в этой области.

**Ключевые слова:** светодизайн, мемориальные ансамбли и памятники, война, память, свет.

Память о самой страшной для России войне – Великой Отечественной – сохраняется не только в умах людей и в литературных, живописных, музыкальных, театральных, кинематографических и телевизионных произведениях, но и в скульптурно-архитектурных мемориалах и монументах, количество которых с годами умножается. С некоторых пор эти объекты в образно-эмоциональном смысле начинают «проживать» не одну, традиционно дневную, а две жизни – ещё и рукотворную вечернюю при искусственном, специально создаваемом освещении. И нередко образы этой второй жизни – более впечатляющие, чем первой, поскольку объект становится гигантской театральной сценой с драматическими эффектами света. По крайней мере, такова основная цель светодизайнерских решений, которые осуществляются, к сожалению, пока ещё не на всех объектах или эффект от реализации

которых по разным причинам не стопроцентно достиг высокой цели из-за сомнительного по качеству проекта или плохой эксплуатации ОУ.

Идея выразить драматизм темы мемориала не только в традиционной скульптурно-пространственной композиции днём нивелируется глобальным, «всеобъемлющим» светом неба и солнца, равнодушно и безразлично падающим на все элементы. Хорошо, если авторы – скульптор и архитектор – подумали об ориентации доминантных объектов, композиционно-планировочных осей и основных направлений восприятия по отношению к солнцу (вспомним памятник А.С. Пушкину в Москве, потерявший часть опекушинского поэтического драматизма при перестановке его на новое место с разворотом на 180 градусов). Но в тёмное время суток возможности управлять вниманием зрителя и создавать оригинальные световые образы осуществляются электрическим светом, все параметры которого, а следовательно, эмоциональные реакции посетителей мемориала можно спрогнозировать и рассчитать по задуманному сценарию. Посмотрите на дневной и ночной виды монумента «Разорванное кольцо» в память о прорыве блокады Ленинграда: первый в сравнении со вторым выглядит бездушным, второй наполнен эмоцией, внимание вечернего зрителя сознательно и уверенно направлено светом на содержательные элементы, окружение не оказывает отвлекающего действия, а убедительно и к месту драматизирует ситуацию (рис. 1). В связи с появлением и развитием светодиодных ОУ и программируемых систем управления возможности кинетического светорегулирования по всем параметрам становятся всё более широкими. Однако практика использует их кое-где пока что только во временных, разовых шоу по праздникам. Символическое выражение идеи или духа мемориального объекта было гениально найдено сто лет назад в форме вечного огня: живое пламя, как пылающее сердце горьковского Данко, освещает нам дорогу памяти. Впервые огонь



Рис. 1. Дневной и ночной виды монумента «Разорванное кольцо» в память о прорыве блокады Ленинграда





Рис. 2. Могила Неизвестного солдата в Александровском саду

был зажжён в 1923 г. на могиле Неизвестного солдата 1-й мировой войны у Триумфальной арки на площади Звезды (ныне Шарля де Голля) в Париже. В СССР – на Марсовом поле у памятника «Борцам революции» в Ленинграде в 1957 г., на могиле Неизвестного солдата Великой Отечественной у Кремлёвской стены в Александровском саду в Москве в 1967 г. С тех пор в сотнях больших и малых городов России и бывших республик СССР вечный огонь как крошечная по размеру, но композиционно и содержательно ключевая, трепетная, нематериальная доминанта светит днём и ночью у подножия единичных памятников и в фокусе масштабных мемориальных ансамблей, на братских кладбищах и могилах павших, в местах памятных событий, подвигов героев и жертв фашизма. Вечный огонь всегда придаёт любому памятнику всем понятный, очевидный сакральный смысл. Роль материальной доминанты выполняют в этих случаях скульптурные объекты – обелиски, фигуры, стелы, арки, пирамиды и т.п. Чтобы сохранить их доминантную роль в ансамбле в темноте, они должны быть соответственно освещены. Эта очевидная функция всё ещё завоевывает своё законное эстетическое право на реализацию.

Традиция специального, адресного, символично-художественного освещения мемориальных объектов зародилась на первой в СССР могиле Неизвестного солдата в Александровском саду (авторский коллектив – архитекторы Д.П. Бурдин, В.А. Климов, Ю.Б. Рабаев, скульптор

Н.В. Томский). Архитектор В.Г. Макаревич (МАРХИ) разработал проект архитектурного освещения этой минималистической по сегодняшним понятиям ландшафтной композиции, обусловленной историческим контекстом, главным световым элементом которого, кроме вечного огня, была мемориально-сдержанная подсветка фоновой Кремлёвской стены с контражурными траурно голубыми елями перед ней, а сверху мажорно «парило» ярко освещённое (по проекту ВНИСИ) здание Арсенала (рис. 2).

В те годы подобная же идея прорабатывалась на самом грандиозном в СССР мемориале «Героям Сталинградской битвы» на Мамаевом кургане в Волгограде, открытым в 1967 г. С 1965 г. в лаборатории архитектурного освещения ВНИСИ (Н.В. Горбачёв, П.С. Евдокишкин, В.М. Царьков) велась разработка проекта освещения, реализованного в 1976 г. [1]. В мастерской руководителя авторского коллектива скульптора Е.В. Вучетича на моделях основных скульптур с помощью линзовых прожекторов и зеркальных ламп отработывались приёмы их освещения с целью выбора правильного направления заливающего света для наиболее эффектной презентации в ночное время, для уточнения месторасположения ОП на местности и экспериментального определения уровней освещённости для доминантной скульптуры «Родина-мать» на вершине господствующего над городом Мамаева кургана, чтобы она была видна вечером на расстоянии до 10 км из растянувшегося на десятки километров по Волге города, из приволжских и заволжских степей (общая высота памятника и холма над Волгой – около 190 м). Надо отметить, что это наилучший, после натурального, способ светомоделирования по сравнению с другими, в т.ч. компьютерными, тогда ещё неизвестными.

Кроме доминанты композиционно-планировочная структура мемориала включает иерархизированную систему тематических скульптурных композиций и архитектурных сооружений, эшелонированных в пространстве и на рельефе по ходу осмотра его посетителями. Светотехнические возможности у авторов в те годы, по сравнению с современными, были весьма ограниченными – прожекторы с ЛН мощностью до 3000 Вт. Поэтому установленная мощность ОУ только главного монумента составляла 240 кВт, а общая – 480 кВт!

Высокое энергопотребление, малый срок службы, эксплуатационные издержки, прогресс в производстве более



Рис. 3. Мемориал «Героям Сталинградской битвы» на Мамаевом кургане в Волгограде



Рис. 4. Брестская крепость

эффективных разрядных ИС и новые социально-эстетические запросы обусловили периодические реконструкции ОУ мемориала с сопровождающим пересмотром технических и художественных характеристик освещения. В 80-е годы в световом ансамбле была проведена замена прожекторов С-60, ПФС, ПЗС с ЛН и ПКН на ПГЦ с МГЛ. К 60-й годовщине Сталинградской битвы в ООО «Промсвет» был выполнен очередной проект реконструкции ОУ, в результате количество ОП и прожекторных багарей сократилось, при этом был использован разноспектральный свет МГЛ и НЛВД, что создало эмоциональный, хотя и стационарный эффект вполне уместных здесь «сполохов пожара» на скульптурах. Мощность ОУ доминантной скульптуры сократилась более чем в 10 раз – до 18,8 кВт, а общая мощ-

важной художественно-идеологической области искусства и культуры. Последний тематически информативный номер журнала [1] был издан 35 лет назад, а после – почти полное отсутствие публикаций. Почему специалисты не делятся своими идеями и результатами? Разве мемориальные объекты не освещаются? Или проектирование освещения – лишь способ заработать без всякой огласки? А как функционируют ранее осуществлённые ОУ? Сведения найти сложно, даже интернет безмолвствует. Например, готовится к открытию новый крупный мемориал под Ржевом, а авторы его – архитектор К. Фомин и скульптор А. Коробцов, по их словам, не знают, кто выполнил презентованный в интернете проект его освещения! Как это возможно без согласования с ними? (рис. 12).



Рис. 5. Монумент «Родина-Мать» в Киеве

ность – до 26,7 кВт [2] (рис. 3).

В 2017 г. началась капитальная реставрация главной скульптуры «Родина-мать» с очередным обновлением ОУ к 75-летию Победы. Несмотря на это, с 2016 г. в дни 8 и 9 мая на Мамаевом кургане проводится грандиозное вечернее шоу «Свет великой Победы» для тысяч собирающихся на него зрителей. Юбилейные новшества будут реализованы до выхода в свет данного номера журнала, и в наших планах подробнее ознакомиться с ними в натуре (если не перестанет преследовать рок коронавируса) и затем поделиться своими изысканиями. Кстати, категорически не хватает сведений о светодизайне в этой

Оригинально освещённая в 80-е годы Брестская крепость [1] сегодня не демонстрирует на вечерних экскурсиях свои трагические образы из-за недостатка финансирования. Не известно, освещается ли Курган Славы Советской Армии под Минском [1] и Хатынь [3], мемориал «Героям–панфиловцам» в Алма-Ате и Красной Армии-освободителю Риги от фашистских захватчиков [4], Родины – Матери в Киеве и Картлис Деда в Тбилиси и т.д. (хотя сегодня это уже за граница) (рис. 4–6).

Проектирование мемориальных объектов разной степени монументальности началось в СССР среди архитекторов и скульпторов ещё до окончания войны, так велика



Рис. 6. Картлис Деда («Мать Грузии») в Тбилиси



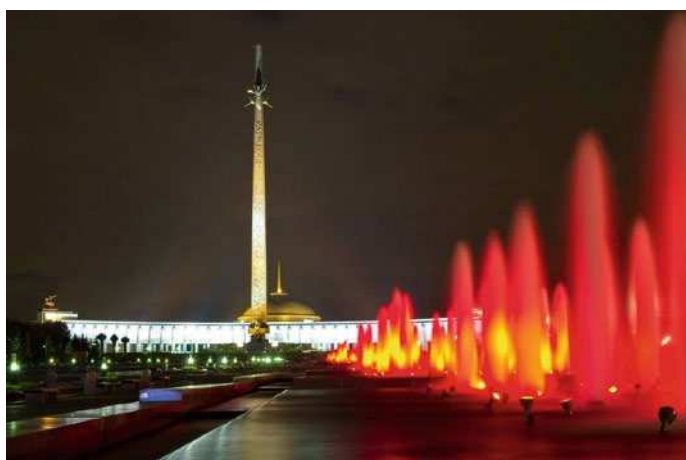


Рис. 7. Парк Победы на Поклонной горе в Москве



Рис. 9. Мемориал «Героям-панфиловцам»

была вера в победу и благодарность воинам-освободителям. На протяжении 75 лет созданы десятки достаточно крупных и выразительных ансамблей, многие из них отмечены государственными премиями: парк Победы на Поклонной горе, разъезд Дубосеково и Пояс Славы в Подмосковье, мемориалы в Новороссийске и Севастополе, Магнитогорске и Ленинграде [5], Мурманске и Саратове, на Прохоровском поле [6] и т.д. Все освещены по индивидуальным сценариям с разной степенью художественного совершенства (рис. 7–11).

Более крупномасштабным в социальном плане решением государственных органов СССР и РФ об увековечении памяти многомиллионных жертв Великой Отечественной войны, чем локальные тематические памятники, было присвоение почётного звания «Города-героя» или «Города воинской славы» как высшей степени отличия за массовый героизм и мужество их защитников: указами Президиума ВС СССР в 1965–1985 гг. Брестская крепость и 12



Рис. 10. Монумент защитникам Заполярья в Мурманске («Алёша»)



Рис. 8. Монументальный памятник «Героическим защитникам Ленинграда»

городов СССР стали городами-героями, а указами президента РФ в 2006–2009 гг. 45 больших и малых городов России получили новое звание воинской славы. Возможно, этот список не закрыт, пока живут в памяти уже немногочисленных живых фронтовиков и тружеников тыла, а также поколений благодарных потомков воспоминания о бессмертном подвиге и тяжёлых жертвах, постигших каждую семью, пока продолжаются архивные открытия историков и результаты работы поисковых групп энтузиастов-волонтеров, советов ветеранов и других неравнодушных к этой незабываемо-скорбной теме граждан. Остаётся в её рамках найти адекватные способы достойного отражения исторических событий и фактов.

В основе каждого монумента лежит конкретное событие, судьба персонажа или многих людей, повлиявших на ход военных батальев или отразивших её ужасы. Главным создателем его традиционно является скульптор, а соавтором – архитектор, сомасштабно вписывающий скульптурные и архитектурно-благоустроительные формы в реальный пространственный контекст. Редки случаи, когда авторы на стадии творческих поисков вспоминают об архитектурном освещении и вовремя приглашают светодизайнера. Когда объёмно-пространственное решение, рассматриваемое обычно в условиях дневного освещения, и смета утверждены, у приглашённого светодизайнера сильно «связаны руки»: авторы хотят, чтоб монумент, особенно если он портретный, был освещён сверху (как днём), чтобы элементы ОУ не «мозолили» глаза – при том, что ОП уже невозможно встроить в материальные структуры – и вечером не слепили зрителей, чтобы система освещения была чуть ли не бесплатной и даже «пойди туда, не знаю куда, но принеси то...», что надо. Многие из этого нереально. Светодизайнер, чтобы творить, должен не только познакомиться с объектом в материале, (макеты, презентационные изображения), но и знать объектную «мифологию» авторов, отражаемую обычно в виде некоего сценария, т.е. прогнозирования реакции зрителей при движении в пространстве и времени (пояснительная записка, защита проекта с озвучиванием идей, беседы с авторами и т.п.).

Он, как автономный творец (хотя светодизайнерское решение придётся согласовывать с авторами проекта), должен сочинить свой сценарий освещения, учитывающий в какой-то степени пожелания авторов, но, что гораздо важнее, предложить оригинальную образную интер-



Рис. 11. Мемориал «Тыл – фронту» в Магнитогорске

претацию авторских идей, базирующуюся как на свойствах материально-пространственного решения объекта, так и на особенностях темновой адаптации зрителей в процессе движения и восприятия в ночной зоне монумента. Сопричастное авторство светодизайнера с лихвой обеспечено возможностями современного ИО – лишь бы он ими владел – создавать световую композицию с необходимым для задуманного образа распределением яркостей и цветностей на объектах, их градиентов, выбором яркостных и цветовых контрастов, многорежимной кинетикой освещения, масштабной и ритмичной светомодулировкой пространства и т.д. Эти, к сожалению, не всем подвластные по их компетенции задачи обеспечиваются выбором наиболее подходящих и эффективных средств и приёмов освещения.

Анализируя доступные вечерние натурные снимки ряда мемориалов (хотя снимкам в принципе нельзя стопроцентно верить по ряду известных специалистам причин, но за неимением собственной фото-информации и наблюдений, увы, приходится), можно обнаружить общие закономерности решения световой композиции:

- Самый трудноуловимый визуальный диалог «светопространство и светоформы» формируется стихийно, ибо в теории и практике внимание обычно уделяется художественной трактовке светоформ, а светопространство создаётся на основе примитивных норм утилитарного освещения. В натуре практически отсутствует масштабноритмическая светомодулировка ночного пространства, обеспечивающая восприятие его глубинности и сомасштабности пешеходу.

Формирующие светопространство «каталожные» уличные ОП по дизайну в лучшем случае нейтральны архитектуре мемориала, хотя в мире есть примеры их персонального, штучного, адресного дизайна.

- Хотя существуют нормы архитектурного освещения [8], пусть и несовершенные, никто не знает реальных яркостей объектов в отдельности и в их иерархии (доминанта, акцентны, фоновые объекты), как и яркостных контрастов и градиентов, от которых зависят основные зрительные (художественные) оценки. Редкие случаи наличия в публикациях некоторых величин [1] – это исключения из правила или не проверенные натурными измерениями расчётные показатели. Замечание особо актуально для определения величины яркостной адаптации в разных точках наблюдения.

- Ещё безнадёжнее научные данные о цветности излучения, цветовых контрастах, градиентах и адаптации – этим никто не занимается.

- Как и днём, в ясные и пасмурные дни зимой и летом, ночной образ мемориального объекта как бы «мимикрирует», и не только под воздействием разных погодных условий, но и от качества эксплуатации ОУ. Он, как правило, с течением времени теряет свою первозданную целостность и выразительность. Погодная «мимикрия» при соответствующей фантазии могла бы стать элементом световой программируемой кинетики освещения.

Тем не менее, в существующих светокомпозиционных решениях встречаются оригинальные приёмы, обеспечивающие творческую «изюминку» световому образу всего мемориала или его важного элемента. В обширном световом ансамбле Поклонной горы это, безусловно, 1418 красных фонтанных струй в пяти бассейнах на центральной аллее, по числу кровавых дней и годов войны [7] (рис. 7). В монументальном памятнике «Героическим защитникам Ленинграда» [5] использован оригинальный приём «стелющегося» света: концентрированные лучи прожекторов, радиально скользящие по мощению овальной площади в сторону центрального обелиска, создают вокруг него «нимб» в виде световых «ресниц». Жаль, что визуально они не фокусируются в свет, пламенеющий по высоте доминантного обелиска – ему явно не хватает яркости (рис. 8). Фигуры воинов в мемориале «Героям-панфиловцам» в Дубосеково (рис. 9) освещены слишком примитивно: яркая полоса света на всех разноплановых фигурах механически проходит на уровне пояса, головы тонут в глубоких контрастных тенях. Монумент защитникам Заполярья в Мурманске («Алёша»), залитый светом ОП с НЛВД, весьма декоративно смотрится зимой на фоне холодного северного пейзажа (рис. 10). Спокойно освещённые фигуры рабочего и солдата («Тыл фронту») на горе в Магнитогорске монументально господствуют в световом силуэте города (рис. 11).

В заключение хочется поделиться двумя мечтами: чиновникам от культуры следует обратить внимание (желательно с финансированием) на социальную и эстетическую актуальность рассматриваемой темы, а творцы (скульпторы, архитекторы, светодизайнеры) должны де-



Рис. 12. Мемориал Советскому солдату под Ржевом



литься своими идеями и результатами в профессиональной прессе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Тематический журнал «Светотехника» к 40-летию Победы: 1985, № 5:
  - а) *Лысов Ф.М.* Освещение мемориального комплекса – памятника «Героям Сталинградской битвы» // Светотехника. – 1985. – № 5. – С. 8–10.
  - б) *Оболенский Н.В., Щепетков Н.И., Яремчук Ю.Р.* Архитектурное освещение ансамблей – монументов героям Великой Отечественной войны // Светотехника. – 1985. – № 5. – С. 2–5
  - в) *Эшттейн С.Н.* Освещение Кургана славы Советской армии // Светотехника. – 1985. – № 5. – С. 7–8
  - г) *Топуз В.Г.* Об архитектурно-художественном освещении мемориала «Аллея Славы – памятника Неизвестному матросу в Одессе» // Светотехника. – 1985. – № 5. – С. 11–12
  - д) *Лесман Е.А.* Освещение памятников Партизанской славы и лётчикам-защитникам Ленинградского неба // Светотехника. – 1985. – № 5. – С. 12–14.
2. *Александрова Е.М., Нечаев В.В., Степанов В.Н., Царьков В.М.* Реконструкция освещения мемориального комплекса «Мамаев курган» // Светотехника. – 2003. – № 4. – С. 23–26.
3. *Басалыга Н.Н., Эшттейн С.Н.* Освещение монумента Победы в Минске и мемориального комплекса «Хатынь» // Светотехника. – 1985. – № 4. – С. 4–5.
4. *Щепетков Н.И.* Световой дизайн города. М., «Архитектура-С». 2006. С. 66, 73 и 277.
5. *Лесман Е.А.* Освещение памятника героическим защитникам Ленинграда // Светотехника. – 1985. – № 1. – С. 2–4.
6. *Барцев А.А., Бурцева Н.Б., Черняк А.Ш.* Освещение Монумента Победы на Прохоровском поле // Светотехника. – 1996. – № 7. – С. 26–27.
7. *Горбачёва З.К., Дудкина Г.Д.* Освещение фонтанов ансамбля памятника Победы на Поклонной горе // Светотехника. – 1996. – № 9. – С. 2–3.
8. Свод правил СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. М. 2016.



**Щепетков Николай Иванович**, доктор архитектуры, профессор. Окончил в 1965 г. МАРХИ. Заведующий кафедрой «Архитектурная физика» МАРХИ (ГА). Лауреат Государственной премии РФ (за архитектурное освещение Москвы). Заслуженный деятель искусств РФ. Член-корр. РАЕН. Член редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»



**Завгородская Татьяна Николаевна**, магистр ландшафтной архитектуры, аспирант кафедры архитектурной физики МАРХИ. Окончила факультет ландшафтной архитектуры МАРХИ и магистратуру МГТУ им Баумана по специальности «Ландшафтная архитектура». Главный ландшафтный архитектор в компании ZA\_Garden&Light, преподаватель ландшафтного проектирования и вертикальной планировки в нескольких вузах

#### IES выпускает новый отчёт о бактерицидном УФ излучении и о том, как он может уменьшить распространение COVID-19

В ответ на пандемию COVID-19 и волну кажущихся противоречивыми заявлений и мнений о возможностях БУФ обеззараживания и степени его безопасности Североамериканское светотехническое общество (IES) опубликовало доклад своего Фотобиологического комитета, объясняющий БУФ обеззараживание и его потенциал для безопасного восстановления передачи коронавируса SARS-CoV-2, который вызывает коронавирусную инфекцию COVID-19. Авторы отчёта представили ответы на часто задаваемые вопросы о БУФ с учётом экспертных заключений от Центров по контролю и профилактике заболеваний США, Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США, Гарвардской медицинской школы и Школы медицины Икана Медицинского центра Маунт-Синай, а также от производственных и исследовательских организаций по обеззараживанию.

Написанный для защиты медицинских работников и пациентов, этот отчёт можно бесплатно скачать на сайте [www.ies.org/standards/committee-reports/](http://www.ies.org/standards/committee-reports/), с сопровождающим видео-учебником, поясняющим технологию БУФ обеззараживания, её применение и соображения по безопасности. «Цель – предоставить своевременную и объективную информацию о проверенной технологии, которая может снизить распространение этого крайне заразного вируса», – сказал директор IES по стандартам и исследованиям Брайан Лиебел.

Бактерицидное УФ излучение можно успешно и безопасно применять для обеззараживания воздуха в занятых людьми больничных помещениях, таких как залы ожидания, реанимационные отделения и операционные. В незанятых людьми помещениях с контролируемым доступом БУФ излучение может использоваться в качестве дополнительной меры для обеззараживания поверхностей помещений и снижения распространения инфекций, связанных с медицинским обслуживанием. БУФ излучение также применяется для обеззараживания некоторых средств индивидуальной защиты (СИЗ) при их ограниченном повторном использовании в условиях пандемии. В часто задаваемых вопросах подчёркивается необходимость правильного применения и контроля за производительностью и безопасностью БУФ излучения, а также важность обучения эксплуатации и технического обслуживанию БУФ облучательных систем. В докладе IES эти темы рассматриваются и признаётся, что в настоящее время БУФ обеззараживание получает дополнительное развитие, в том числе в плане тестирования эффективности и безопасности.

В докладе также содержится предупреждение о том, что носимые БУФ обеззараживающие «палочки» («wands») или прочие БУФ облучатели «для использования в жилых помещениях», будучи недостаточно сертифицированными, могут быть небезопасны и вряд ли обеспечат ожидаемую вирусную защиту.

«Руководство, включённое в этот отчёт, должно помогать медицинским специалистам и потребителям лучше разбираться в изделиях БУФ техники, а также содержит мнения по выбору и применению технологий БУФ обеззараживания», – сказал доктор Дэйвид Слайни, председатель Фотобиологического комитета IES. Отчёт утверждался в рамках столь же тщательного и строгого процесса, утверждённого ANSI, как и стандарты IES.

edisonreport.com  
17.04.2020



## Воины–светотехники на передовой при штурме Берлина в апреле 1945 года

Ниже приведены не результаты исторических исследований, а лишь воспоминания от встречи 1947 г. в школе № 312 г. Москвы с участником этих событий. Мы хотим лишь рассказать о событиях с участием советских светотехников–прожектористов.

9 мая после взятия Берлина и Рейхстага был подписан договор о капитуляции фашистской Германии. Так закончилась самая кровавая война в истории человечества. Наша страна сыграла решающую роль в победе над фашизмом и заплатила за эту победу страшную цену – миллионы погибших граждан и разрушенную экономику.

Одним из тяжелейших эпизодов в конце этой войны стало взятие Берлина нашими войсками, и именно этот последний акт привёл непосредственно к капитуляции.

Немецкое командование собрало все последние силы для создания мощного укрепления вокруг Берлина. Эти оборонительные укрепления были многократно мощнее, чем линия Мажино (во Франции) и линия Маннергейма (в Финляндии) – наиболее мощное укрепление XX века.

Перед сплошной линией дотов всё пространство полностью простреливалось чрезвычайно плотным огнём артиллерии и стрелкового оружия. Пехоте пройти это пространство до дотов было возможно только лишь ценой потерь от десятков до ста тысяч бойцов. И это в самые последние дни войны. Аналогичная ситуация складывалась и для танков, по которым фашисты могли бить артиллерийским огнём прямой наводкой.



Неожиданное решение в основном исключаящее эти потери было предложено одним из талантливых советских военных (к сожалению, фамилия этого героя нам неизвестна). Оно заключалось в том, чтобы в ночное время ослепить немецких солдат в этих укреплениях и вывести из строя на 3–5 минут благодаря созданию мощного слепящего эффекта, а это время использовать для перемещения от позиций наших войск (пехоты и танков) до дотов практически без потерь и уничтожения дотов вместе с фашистами.

Такой эффект можно было создать либо благодаря проведению мощных взрывов с большой яркостью в многочисленных местах вокруг укреплений, либо используя сверхмощные световые приборы с колоссальной концентрацией светового потока в направлении амбразур дотов и окопов противника. Был выбран вариант со световыми приборами, как более рациональный и не вредящий самим советским солдатам. Это и был путь, по которому пошло командование 1-го Белорусского фронта под руководством маршала Г.К. Жукова.

С трёх фронтов со стороны прорыва укрепления фашистов были собраны все имеющиеся мощные световые приборы, предназначенные для другой цели – поиска в небе фашистских самолётов. Это были зенитные прожекторы с зеркальными, параболическими отражателями диаметром 1,5 м и электрической дугой, рассчитанной на 800 ампер электрического тока. Эти 143 прожектора были расположены в одну линию вдоль и напротив немецких укреплений. В ночь на 16 апреля в четыре часа были одновременно включены все прожекторы, оси пучков света которых были направлены на амбразуры немецких дотов.

Этот эффект произвёл на немцев невероятное впечатление. Они были разбужены и ослеплены, ничего не видели перед собой, и именно этих минут было достаточно, чтобы мощные пехотные подразделения Советских войск и танки броском преодолели простреливаемое пространство до дотов, и забросали через амбразуры немцев гранатами, а танки били прямой наводкой по укреплениям.

Эта операция прошла для нас практически без потерь.

Таким образом, 75 лет тому назад даже при том уровне техники, который был у нас на вооружении,



мы смогли с помощью светотехнических средств – зенитных прожекторов блестяще решить эту задачу.

Это было первое в истории крупномасштабное применение наиболее мощных приборов того времени – зенитных прожекторов с дуговыми источниками света.

Остаётся надеяться, что неизвестный герой, выдвинувший эту идею, хорошо знал роль и возможность

слепающего эффекта, способ его создания и был светотехником или физиком–оптиком.

Светлая память о тех, кто погиб при взятии всего Берлина и, в частности, Рейхстага, при большом сопротивлении отборных частей фашистов.

**Ю.Б. Айзенберг, Шеф-редактор журнала «Светотехника», доктор техн. наук, профессор**

## Свет в Берлинской операции

9 мая 2020 года исполнилось 75 лет со дня победы Советского народа в Великой Отечественной войне 1941–1945 годов. Завершающей её фазой явилась Берлинская операция. Она началась 16 апреля и завершилась 8 мая 1945 года.

О штурме второй полосы обороны Берлина – ночной атаке Зееловских высот – широко известно по целому ряду мемуаров, документальных и художественных книг и кинофильмов, в которых описывается одно из последних крупных сражений Великой Отечественной войны, имевшего свои тактические особенности.

Первое боевое использование прожекторов относится к колониальным кампаниям: в 1906 году англичане применили их в Южной Африке при усмирении восставших зулусов.

В Первую мировую войну Российская империя, как и ряд других стран Европы, имела на вооружении зенитные прожекторы, применяемые для обнаружения аэропланов противника.

Одна из первых попыток применить прожекторы для психологического воздействия на врага была предпринята Русской армией в ночь на 10 (23) января 1916 года на Северном фронте в Лифляндии. Командир Гренадерского корпуса генерал от инфантерии Алексей Куропаткин отдал приказ произвести атаку на врага при поддержке прожекторов. К сожалению, в тот раз применение этих световых приборов оказалось неудачным: немцы не только не были ослеплены, более того, они обнаружили и обстреляли подползающих к их окопам русских пехотинцев в белых маскировочных халатах. Противнику огнём артиллерии удалось отключить прожекторы и обстрелять позиции солдат и офицеров Киевского и Таврического пехотных полков.

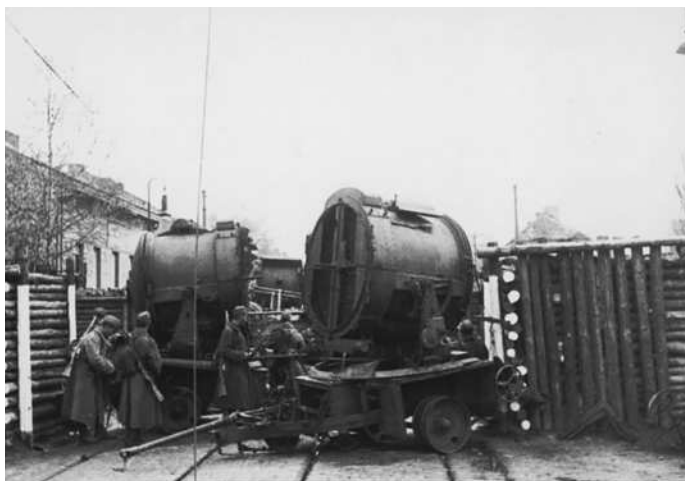
Во время Второй мировой войны тоже было немало случаев, когда наступающая сторона применяла прожекторы для ночного наземного боя. Так, 30 августа 1941 года этот приём успешно применили войска германского 52-го армейского корпуса генерала фон Бризена при захвате плацдарма на Днепре. В феврале 1944 года прожекторы привлекал для наступления командующий советским Ленинградским фронтом генерал армии Леонид Говоров, а в декаб-

ре 1944 года с «прожекторной атаки» начал прорыв в Арденнах командующий 5-й танковой армией вермахта генерал фон Мантёйфель.

К началу Великой Отечественной войны в нашей стране были разработаны и освоены серийно полутораметровые зенитные прожекторы. Они имели стеклянные параболические отражатели диаметром 150 см. Дальность их действия доходила в нормальных климатических условиях до 6–8 км, а в неблагоприятных до – 5–6 км, при обычной эксплуатации – 2–3 км. Прожекторы, использованные при штурме Зееловских высот были изготовлены на Московском прожекторном заводе.

В своих мемуарах командующий 1-м Белорусским фронтом Маршал Советского Союза Георгий Жуков писал, что идея ночной атаки главной полосы обороны противника в битве за Берлин с применением прожекторов пришла ему, офицерам и генералам штаба фронта в результате длительного и мучительного поиска эффективных способов прорыва сильной обороны смертельно раненного, но отчаянно сопротивляющегося врага: «Готовя операцию, все мы думали над тем, что ещё предпринять, чтобы больше ошеломить и подавить противника. Так родилась идея ночной атаки с применением прожекторов. Решено было обрушить наш удар за два часа до рассвета. Зенитные прожектора должны были внезапно осветить позиции противника и объекты атаки».





Подготовка к прожекторной атаке при штурме оборонительного вала, защищающего Берлин, началась на 1-м Белорусском фронте в феврале 1945 года. Было проведено тактическое учение с использованием прожекторов, после которого маршал Г.К. Жуков отдал приказ готовить такую атаку. В марте состоялось ещё два таких учения.

Накануне 16 апреля 143 зенитных прожектора 43-го зенитного прожекторного полка и двух зенитных прожекторных батальонов ПВО были размещены на позициях 3-й и 5-й ударных, 8-й гвардейской и 69-й армий, которым предстояло прорывать первую полосу обороны противника напротив Кюстринского плацдарма.

Прожекторы располагались на расстоянии 300–800 метров от переднего края противника и 150–200 метров друг от друга по всей 34-километровой полосе. Исключение составила четырёхкилометровая зона задымления севернее Цехина на стыке полос наступления 3-й и 5-й ударных армий.

Операция началась 16 апреля 1945 года в 5:20 (в 3:20 по местному времени) мощной артиллерийской подготовкой, сигналом атаки с одновременным включением прожекторов, лучи которых перемещались по азимуту в пределах угла 24 градуса с частотой 15–20 движений в минуту. Неожиданное включение прожекторов помогло нашим войскам в прорыве мощной системы обороны противника и обеспечении высоких темпов наступления пехоты и танков.

Гитлеровцы были действительно ошеломлены ослепляющим действием, невиданными, непонятными и страшными своей мощью лучами света. В своей книге «Воспоминания и размышления» Г.К. Жуков так описал ночное наступление: «В воздух взвилась тысяча разноцветных ракет. По этому сигналу вспыхнули 143 прожектора, расположенные через каждые 200 м. Более 100 миллиардов свечей освещали поле боя, ослепляя противника и выхватывая из темноты объекты атаки для наших танков и пехоты. Это была картина огромной впечатляющей силы, и, пожалуй, за всю жизнь я не помню подобного зрелища! Гитлеровские войска были потоплены в сплошном море огня и металла<sup>1</sup>».

Прожекторный эпизод битвы за Берлин быть оценён по-разному, но в целом – положительно. Большинство участников операции считают, что свет прожекторов ослеплял противника, освещал впереди лежащую местность, что дало возможность передвигаться вперёд и сравнительно быстро овладеть тремя траншеями противника. Хорошо отзываются о действиях прожекторов танкисты и самоходчики, которые, используя свет, двигались в условиях ночного боя не вслепую.

Показаниями пленных было установлено, что противник был введён в заблуждение – атаки ждал утром. Ночные действия наших войск с применением прожекторов внесли дезорганизацию. Немцы видели этот свет и считали, что русские применили какое-то совершенно новое оружие.

С другой стороны, некоторые раненые бойцы заявляли, что именно свет прожекторов дал возможность противнику сосредоточить свой огонь по местам скопления наших войск, чем объясняются такие большие потери. Маршал Советского Союза Василий Чуйков говорил, что после артиллерийской подготовки поле боя застилала стена дыма и пыли, и невозможно было даже понять, светят прожектора или нет. Он отмечал, что, если бы прожекторы поставили не напротив атакованных участков, они принесли бы больше пользы в плане обмана и ошеломления противника.

Ночная атака противника с помощью света прожекторов на главной полосе обороны отчаянно сопротивляющегося противника, оставила неизгладимый след в истории военного искусства Великой Отечественной войны.

Мы низко склоняем головы перед светлой памятью павших в боях защитников и жителей СССР, которые создали для нынешнего поколения мир и чистое небо над нашей страной!

**Ефим Лесман,**  
инженер-энергетик, корреспондент журнала  
«Светотехника» в Санкт-Петербурге

<sup>1</sup> Жуков Г.К. Воспоминания и размышления. М.: АПН, 1974. Т. 2, С. 340



# Ветераны Всесоюзного светотехнического института

Большой вклад в создание, становление и развитие ВНИСИ внесли светотехники, прошедшие суровое испытание Великой Отечественной войной. ВНИСИ помнит и чтит своих ветеранов – тех, кто жертвовал собой в те страшные годы ради мирной жизни и труда последующих поколений.

В архивах института хранится фотография 1980 года, на которой изображены участники встречи, посвящённой очередной годовщине Победы в Великой Отечественной войне (рис. 1). На груди каждого ветерана – боевые медали и ордена – «Отечественной

войны», «За отвагу», «Орден Красной звезды». Каждый из них пережил все тяготы и ужасы, связанные с войной, и о тех боевых победах мы будем помнить и рассказывать следующим поколениям. Сегодня, в год 75-й годовщины Победы, мы бы хотели вспомнить имена героев, которые прошли страшнейшую в мировой истории войну, вернулись с победой в разорённую и обескровленную врагом страну и приложили усилия к её восстановлению. Без преувеличения можно сказать, что и наш институт, и отечественная светотехническая отрасль стоит на том монолит-

ном основании, которое поставили вернувшиеся с войны победители, на их неуёмной жизненной и творческой энергии двигалась вся отрасль многие десятилетия, а плоды их трудов светят нам до сих пор.

Вклад «инженеров на передовой», обеспечивающих связь, бесперебойную работу техники, огромен. Среди них – будущий доктор наук, один из основоположников принципов нормирования светотехнических установок **Михаил Алексеевич Островский** (рис. 2), служивший офицером по радиосвязи в авиации Тихоокеанского флота. В период боевых действий



Рис. 1. Сотрудники ВНИСИ – ветераны Великой Отечественной войны (участники встречи ветеранов 30 апреля 1980 г.):

1 ряд – Буриков Л.М., Полонник Л.П., гость встречи Генерал-лейтенант авиации Шевчук В.М., Киселёв А.С., Шихман М.Ш., Глазунов Т.К., Пляскин П.В. (директор института), Акоюн А.А., Парджонян З.К.; 2 ряд – Белов В.В. (секретарь партбюро), Турунов А.С., Мальчиков А.С., Мухачев В.С., Фёдоров В.В., Демчев В.И., Журавлёв Е.И., Царьков В.М., Тэгай А.Ю., Сорокин О.Е., Черниговский М.П., Белов А.А., Запенин А.И. (председатель месткома); 3 ряд – Сдатчиков Г.М., Курашов Е.Ф. (секретарь комитета комсомола), Рымов А.И., Чернышёв В.П., Дьячков А.П., Грибов С.С., Фридрих Ю.Д., Хальнов Б.М., Ширяев С.Ф., Родин М.Д., Мерзликин А.И.; 4 ряд – Епифанов М.А., Кулаков И.А., Ярков Н.М., Лошаков М.Т., Гаврилов В.С., Фейтельсон А.А., Сергеев Г.П., Попржедзинский А.А.



Рис. 2. М.А. Островский

с японскими захватчиками М.А. Островский обеспечивал непрерывную радиосвязь с частями ВВС, флотом и армией. Во время отсутствия электролинейных средств связи он обеспечил радиосвязью с командным пунктом аэродромы Заисановка, Хуньчунь и Сейсин, организовал приём данных разведки от самолётов разведчиков на приёмном центре ВВС. Михаил Алексеевич был награждён медалью «За боевые заслуги», медалями «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» и «За победу над Японией».

Обеспечивал боевую готовность авиации и будущий исследователь, автор многих публикаций, кандидат наук **Абрам Соломонович Зусман**, а в годы войны – сержант технической службы истребительного авиационного корпуса 3 Воздушной армии. А.С. Зусман награждён Медалью «За боевые заслуги» и «За победу над Германией в Великой Отечественной войне».



Рис. 3. Н.В. Чернышова, к.т.н., зав. лабораторией ВНИСИ

1941–1945 гг.», Орденом Отечественной войны II степени.

Радиистом в авиации служила и будущая заведующая лабораторией ВНИСИ **Нина Васильевна Чернышова** (рис. 3), под чьим руководством в 60-е годы были разработаны осветительные приборы для подводной съёмки. Н.В. Чернышова награждена Медалью «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

С большой теплотой вспоминают во ВНИСИ и **Андрея Ивановича Рымова** (Рис. 4), внёсшего значительный вклад в развитие облучательной техники. В 60–70-х гг. кандидат технических наук Рымов возглавлял лабораторию, которая разрабатывала специальные облучающие устройства, имитирующие солнечное излучение, в числе которых – самый мощный в Европе имитатор солнечного излучения мощностью более 50 кВт... В годы войны гвардии сержант Рымов служил в 317 Гвардейском миномётном полку на должности командира радиоотделения. Андрей Иванович прошёл на легендарных «Катюшах» всю Белоруссию, Литву и Восточную Пруссию.

Больше пятидесяти лет проработал во ВНИСИ и внёс немалый вклад в методологию спортивного и архитектурного освещения **Владимир Михайлович Царьков** (Рис. 5), а 75 лет назад 28-летний старший инженер-лейтенант Царьков прошёл войну пулемётчиком в составе стрелковой дивизии, принимал участие в штурме Днепра, награждён медалью «За отвагу», Орденом Отечественной войны II степени.

Иначе сложилась военная судьба будущего разработчика целого ряда осветительных приборов **Владимира Ивановича Демчева** (Рис. 1, 2-й ряд). Он был призван в Москве в 1938 году, участвовал в Советско-Финляндской войне, после которой направлен на фронт Великой Отечественной войны. Лейтенант-техник В.И. Демчев

принимал участие в боях на Любаньском направлении, но в июне 1942 года вместе с частью попал в окружение противника и был захвачен в плен. Был освобождён в июле 1945 года.

Отдельно следует отметить вклад воинов, служивших в войсках противовоздушной обороны. Будущий сотрудник ВНИСИ, внёсший боль-



Рис. 4. А.И. Рымов

шой вклад в испытания осветительной техники, **Арнольд Артурович Фейтельсон** (рис. 6), в годы войны служил в звании капитана в войсках воздушного наблюдения, оповещения и связи ПВО, участвовал в целом ряде ключевых операций Великой Отечественной войны. Среди них – Берлинская наступательная операция, в исходе которой большую роль сыграли зенитно-прожекторные – «светотехнические» – части. А.А. Фейтельсон награждён Орденом Отечест-



Рис. 5. В.М. Царьков





Рис. 6. Капитан ВНОС ПВО А.А. Фейтельсон

венной войны I степени, Орденом Красной Звезды, Медалями «За боевые заслуги» и «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

Говоря о воинах-прожектористах, нельзя не вспомнить и **Владимира Петровича Чернышева**, будущего кандидата наук, разработчика целого ряда осветительных и светосигнальных приборов для освоения космоса. Владимир Петрович был призван на фронт в 1943 году и служил в зенитном артиллерийском полку. Окончив войну в звании инженера-лейтенанта, будущий кандидат наук В.П. Чернышев был награждён Орденом Отечественной войны II степени.

Прожектористом служил и будущий выдающийся фотометрист и колориметрист, кандидат технических наук **Давид Арно-**



Рис. 7. Младший лейтенант Д.А. Шкловер, 1942 год

**вич Шкловер** (рис. 7), которому ВНИСИ обязан многими успехами и достижениями в колориметрии и спектрометриии. Младший лейтенант Шкловер был призван 22 июня 1941 года и стоял на страже блокадного Ленинграда в зенитно-прожекторных частях противовоздушной обороны.

В Ленинграде застала война и будущего заместителя директора ВНИСИ **Мордуха Менделевича Новаковского** (рис. 8), а в 1941 году – молодого московского инженера-электрика, приехавшего туда в командировку.



Рис. 8. Партизан М.М. Новаковский

М.М. Новаковский пошёл добровольцем в партизанский отряд. Отряд «Боевой» под его командованием совершил немало подвигов против фашистских захватчиков. Самым заметным из них стала «Тюриковская операция» в феврале 1942 года, когда совместно с партизанами отряда «Вперёд!» была освобождена оккупированная фашистами деревня и уничтожено более 200 эсэсовцев, а 50 взяты в плен. После войны М.М. Новаковский издал воспоминания о партизанском прошлом в книге «На партизанских тропах».

Мы должны вспомнить и тех, кто вёл своих бойцов в бой, вдохновляя их на ратные подвиги личным примером, был заботливым и понимающим командиром. С благодарностью «внисёвцы» вспоминают и энергичного директора ин-



Рис. 9. Подполковник Т.К. Глазунов

ститута **Тихона Константиновича Глазунова** (рис. 9), под чьим руководством ВНИСИ стал головной исследовательской организацией в светотехнической подотрасли и главным научно-техническим центром по светотехнике в стране, обогатился Опытным заводом. А в годы войны Т.К. Глазунов не раз показал себя решительным и волевым командиром, увлекающим бойцов-артиллеристов и командиров на выполнение боевого приказа личным примером. Пройдя всю войну, будучи дважды раненным, будущий директор ВНИСИ был награждён Орденом Красной звезды, двумя Орденами Красного знамени, а также медалью «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», Медалью «За оборону Москвы», Медалью «За взятие Вены».

Будущий сотрудник ВНИСИ, разработчик специальной светотехники подполковник **Моисей Шулькович Шихман** был комиссаром стрелковой дивизии, заместителем командира по политработе. Всегда находясь с бойцами на передовой, он личным примером вдохновлял их на разгром врага, проявляя даже в самые сложные моменты боя мужество, смелость, находчивость. Осенью 1941 года, находясь на огневой позиции, был тяжело ранен в голову осколком мины, долгое время провёл в госпитале, после чего вернулся на фронт. В ходе одной из разведывательных операций в августе 1942 года его отряд был заброшен в глубокий



Рис. 10. В.С. Царапкин («Лейтенант продолжает бой», фото Э. Евзерихина, ТАСС)

тыл противника, где был окружён численно превосходящими силами. Смелой контратакой разведотряд смял кольцо фашистов, уничтожил врага и с ценными документами, боеприпасами и несколькими пленными немцами вернулся в часть. А это только один из многих эпизодов его военной биографии! М.Ш. Шихман был награждён целым рядом орденов – Орденом Красной Звезды, Орденом Отечественной войны I степени и двумя Орденами II степени, Орденом Красного Знамени, медалями «За боевые заслуги», «За освобождение Варшавы», «За освобождение Варшавы» и «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

Широко известна фотография «Лейтенант продолжает бой»

(рис. 10), сделанная военным корреспондентом ТАСС Эммануилом Евзерихиным. На ней – будущий заместитель директора ВНИСИ по гражданской обороне, профессиональный военный **Вячеслав Сергеевич Царапкин**. В годы войны лейтенант В.С. Царапкин командовал огневой батареей в составе 2-ой Корпусной артиллерийской Могилёвской бригады. Награждён Орденом Отечественной войны II степени, Орденом Красной Звезды, Медалями «За оборону Москвы», «За отвагу», «За взятие Кенигсберга», «За боевые заслуги», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

Учёные и инженеры, студенты и рабочие – все они год за годом, испытание за испытанием,

приближали победу над фашизмом: одни – сражаясь в рядах армии, флота и партизанского движения, другие – работая в тылу. Велик подвиг женщин-участниц войны – **Н.В. Чернышовой, М.С. Дубиковой, Г.В. Дагаевой, Л.П. Полонник**, которые наравне с мужчинами и защищали Родину в годы войны, и работали над строительством светотехнической отрасли.

К сожалению, формат статьи не позволяет в полной мере рассказать о всех подвигах и испытаниях, пережитых многими ветеранами Великой Отечественной войны, пришедшими в трудовой коллектив ВНИСИ, как не хватит и одной статьи на описание всех их трудовых и научных свершений. Коллектив ВНИСИ – и те, кому посчастливилось работать вместе с нашими ветеранами, и молодое поколение, которое знает о них из рассказов старших коллег, гордится их невероятным подвигом, помнит и чтит ветеранов от светотехники – первого заведующего лабораторией электроустановочного оборудования, автора многих статей и книг **Эдуарда Самойловича Розенталя, Владимира Владимировича Фёдорова**, внёсшего значительный вклад в создание и усовершенствование люминесцентных ламп, ведущего специалиста архитектурного освещения **Игоря Александровича Кулакова**, оптика **Алексея Семёновича Мальчикова**, заведующего материальным обеспечением **Михаила Тимофеевича Лошакова**, кадровика института **Сергея Фёдоровича Ширяева**, талантливого конструктора и лейтенанта **Рафаила Иосифовича Малята**, мастера **Георгия Петровича Сергеева**, электромонтажника **Александра Степановича Пашкова** и многих других наших коллег и товарищей.

**П.А. Федорищев**  
**ВНИСИ им. С.И. Вавилова**



# ВКЛАД В ВЕЛИКУЮ ПОБЕДУ

преподавателей и сотрудников кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

Многие преподаватели и сотрудники кафедры светотехники Московского энергетического института – наши дорогие учителя по профессии и по жизни – отдали свои силы, знания и умения, здоровье и молодость ПОБЕДЕ над врагом нашей Родины! Прежде всего, хочется назвать преподавателей кафедры, которые были на самом переднем крае войны с фашизмом: Владимира Викторовича Трембача (Рис. 1), Виктора Семёновича Литвинова (Рис. 2), Михаила Максимовича Гуторова (Рис. 3) и Михаила Михайловича Епанешникова (Рис. 4).

В.В. Трембач получил диплом о высшем образовании Электрофизического факультета МЭИ 26 июня 1941 года, а уже через полмесяца прошёл краткие курсы командного состава в составе сводного курсантского полка при Военно-инженерной академии имени В.В. Куйбышева в подмосковном Нахабине. Участвовал в героической обороне Москвы осенью и зимой 1941 года. Затем в составе инженерных войск Калининского, 2-го Прибалтийского и 1-го Белорусского фронтов



Рис. 1. В.В. Трембач в годы войны

прошёл путь от Москвы до Германии. Штурмовал немецкую столицу Берлин. За боевые заслуги был награждён тремя орденами и многими медалями. Свои военные воспоминания он умело художественно оформил и опубликовал в 2003 году издательстве МЭИ в виде Военного дневника. Читателю важно будет узнать, что в этом дневнике описан славный путь сапёрных частей Красной Армии и лично Владимира Викторовича через: Нахабино, Савёлов, Бологое, Торопец, Великие Луки, Новосокольники, Невель, затем госпиталь из-за ранения руки, небольшой отпуск, латвийский город Режица, вручение ордена Красной Звезды за Невельскую операцию (орден искал его почти год), г. Лида, рождение дочери в феврале 1945 года, Варшаву, Кутно, Влоцлавик, Торум, Быдгош, форсирование Одера, немецкие города Шнайдемюль, Вольденберг, Регенвальде, Штаргард, Руфен, Кюстрин, Эверсвальде и, наконец, Берлин!

В.С. Литвинов с отличием окончил среднюю школу Москвы в 1942 году. Ещё школьником принимал участие в строительстве оборонительных сооружений в Москве и Подмосковье. В июне 1943 года восемнадцатилетним юношей ушёл на фронт. В составе артиллерийского полка воевал под Орлом, освобождал от фашистов белорусские, западно-украинские, а затем польские города и деревни. Через Зееловские высоты наступал на Бранденбург и Берлин. Прошёл славный путь от рядового до лейтенанта, закончив войну на Эльбе. Неоднократно в составе полковой разведки готовил данные для успешных артобстрелов противника. Награждён орденами Сла-

вы, Красной Звезды и Отечественной войны, четырнадцатью медалями, в том числе медалью За отвагу. Его умелые действия были отмечены пятнадцатью благодарностями Верховного главнокомандующего Красной Армии.

М.М. Епанешников с самого начала войны находился в действующей армии. Михаил Михайлович воевал в составе войск противовоздушной обороны, защищал Москву и участвовал в освобождении Польши. Был награждён четырьмя правительственными наградами. Закончил войну в звании капитана и был демобилизован в 1945 году. Однако вспоминать о военных годах Михаил Михайлович не любил. К сожалению, именно поэтому мы мало знаем о его участии в Великой Отечественной войне.

М.М. Гуторов был призван в ряды Красной Армии в 1941 году и год проработал преподавателем Муромского военного училища связи. С 1942 года до конца войны был в действующей армии. Сначала в должности помощника начальника связи 11-ой Резервной армии Северо-Западного фронта. После Демянской наступательной операции в новгородской области и окружения там немецко-фашистского корпуса, армию перебросили на Брянский фронт и переименовали в 63-ю армию. За отличную организацию связи при взятии Орла капитан Гуторов М.М. был награждён орденом Красной Звезды. Перед боями у Могилёва его перевели в 50-ю армию на должность старшего помощника начальника связи армии. После успешного завершения нашими войсками Белорусской операции Михаил Максимович был награ-



Рис. 2. В.В. Литвинов

ждён орденом Отечественной войны, а за взятие Кенигсберга – ещё одним орденом Отечественной войны. После окончания войны с фашистской Германией армию перевели под Иркутск, где она встретила окончание Второй Мировой войны. Демобилизовался М.М. Гуторов в конце 1945 года в звании инженер-майора с должности заместителя начальника связи Восточно-Сибирского военного округа. Кроме трёх боевых орденов, он был награждён ещё пятью медалями.

Все четыре замечательных фронтовика обладали такими важными качествами, как преданность Родине, умение руководить людьми, блестящими техническими знаниями и организованностью. Именно поэтому, они быстро стали после Великой Отечественной войны ведущими преподавателями кафедры светотехники МЭИ, издали за годы работы в МЭИ многочисленные учебные и учебно-методические пособия, подготовили большое количество инженеров и кандидатов технических наук, вели успешные исследовательские работы, публиковали многие свои научные статьи в лучшем в стране научно-техническом журнале «Светотехника», все защитили сначала кандидатские, а затем и докторские диссертации, стали профессорами по должности и по научному

званию. Владимир Викторович Трёмбач был ведущим в стране специалистом в области световых приборов, руководителем отдела Оптико-электронных приборов нашей кафедры, активно и умело работал в общественных организациях факультета Электронной техники и кафедры. Виктор Семёнович Литвинов проявил себя, как замечательный преподаватель и учёный, подготовивший 37 кандидатов технических наук, был многолетним руководителем отдела источников света и заместителем заведующего кафедрой по научной работе. Михаил Михайлович Епанешников стал выдающимся педагогом и специалистом в области светотехнических установок, а также лучшим за всю историю кафедры светотехники заместителем заведующего кафедрой по учебной работе. Михаил Максимович Гуторов считается ведущим специалистом в области теоретической фотометрии, лучшим в истории МЭИ деканом факультета Электронной техники, впоследствии стал заведующим кафедрой светотехники, заслуженным деятелем науки и техники России. Успешная педагогическая, научная и организационная деятельность Михаила Максимовича и в мирное время



Рис. 3. М.М. Гуторов

была отмечена высокой правительственной наградой Родины – орденом Знак почёта, а также орденом ГДР За заслуги перед Отечеством.

Главным направлением светотехнической науки и техники во время войны было создание прожекторного оборудования для нашей армии. Речь, прежде всего, идёт о противовоздушной обороне, одним из элементов которой являлся зенитный прожектор. Осветительных и сигнальных прожекторов требовали также военный флот, пограничные и другие войска. Прожекторный цех одного электротехнического завода имени В.В. Куйбышева (впоследствии трансформаторного завода объединения Московский электроламповый завод – МЭЛЗ) и в количественном и в качественном смысле не смог бы обеспечить войска прожекторной техникой. Однако не до конца достроенный до войны завод «Прожектор», в руководство которого входил Александр Иванович Грибанов (впоследствии кандидат технических наук, доцент кафедры светотехники), смог исправить положение. Уже в начале войны на заводе разработали и наладили выпуск полутораметровых зенитных прожекторов. Для прожекторных подразделений появление во время войны такой техники можно сравнить с применением знаменитых танков Т-34. В то же время в лаборатории ВЭИ под руководством будущего профессора нашей кафедры Николая Алексеевича Карякина разрабатывались дуги высокой интенсивности. После успешного завершения этих работ зенитные прожекторы были снабжены стоамперными дуговыми лампами, с которыми по тактико-техническим данным они стали лучшими в мире. Прожекторы имели осевую силу света 800 Мкд, угол рассеяния 1,5 градуса и повышенную дальность



действия. Именно с помощью такого оборудования фашистские самолёты успешно сбивались, как на подступах к Москве, так и в самой столице. Новые прожекторные станции смогли обеспечить защиту Ленинграда, Горького и других городов страны. Уже упомянутый в этом материале В.В. Трёмбач вспоминал день 16 апреля 1945 года, когда «враг, занявший оборону на Одере после двухчасового артиллерийского обстрела, был ослеплён разящими световыми залпами и, доведённый до сумасшествия, в панике бежал до самых подступов к Берлину». Военными прожекторами были снабжены также корабли военно-морского флота и береговая охрана. Большая дальность действия прожекторов помогала осуществить эффективный поиск вражеских кораблей. Сотрудниками ВЭИ профессором Н.А. Карякиным, к.т.н. доцентом В.В. Кузнецовым и Н.Ю. Фридом были разработаны авиапосадочные световые маяки и осветительные прожекторы, которыми оборудовались взлётно-посадочные полосы и предполя, как стационарных, так и полевых военных аэродромов. Световые маяки обозначали трассы для тяжёлой бомбардировочной авиации стратегического назначения. Таким образом, во многом благодаря техническим решениям, предложенным Николаем Алексеевичем Карякиным, советские военные прожекторы превосходили по дальности действия лучшие мировые образцы. Заслуги Н.А. Карякина были высоко оценены – в 1946 году он был удостоен Государственной премией. В дальнейшем Николай Алексеевич стал выдающимся педагогом и учёным нашей кафедры. Под его руководством защитили кандидатские диссертации 20 аспирантов и соискателей, а некоторые из них стали впоследствии докторами техни-



Рис. 4. М.М. Епанешников

ческих наук. Он активно участвовал в общественной жизни: был депутатом Моссовета, неоднократно избирался в профсоюзный комитет МЭИ и работал в редакционном совете института. Его научно-педагогическая и общественная деятельность отмечена высокими правительственными наградами – орденами Ленина и Трудового Красного Знамени.

Многие другие преподаватели, которыми гордятся их последователи на кафедре и многочисленные ученики, также внесли весомый вклад в Победу, работая в тылу. Так будущий доктор технических наук и профессор кафедры светотехники Георгий Нико-

лаевич Рохлин ушёл добровольцем на войну, но был по болезни демобилизован. С 1942 по 1944 годы работал в г. Тбилиси в Академии наук Грузинской ССР по оборонной тематике. Он явился одним из главных инициаторов создания производства по регенерации перегоревших ламп накаливания, в которых Закавказье испытывало в тот период острую нехватку. Самоотверженная работа коллектива треста «Грузсельэлектро» под техническим руководством Рохлина Г.Н. привела к созданию нового по технологии для Закавказья цеха, начат выпуск регенерированных ламп накаливания. Позже аналогичные производства при его технической помощи и непосредственном участии были налажены при Закавказской железной дороге в Тбилиси и тресте Азнефтекомбинат в г. Баку. Вернувшись в конце 1944 года в Москву, Г.Н. Рохлин продолжал плановую работу в ВЭИ и трудился над кандидатской диссертацией по исследованию разрядов высокого и сверхвысокого давления, которую успешно защитил через полтора года. Впоследствии Георгий Николаевич долгое время рабо-



Рис. 5. Преподаватели и сотрудники кафедры светотехники МЭИ, 1940-е гг.

Рис. 6. Послевоенная фотография коллектива кафедры светотехники МЭИ



тал старшим научным сотрудником ВЭИ, затем начальником созданной им самой лаборатории ВНИСИ, а также профессором-совместителем на нашей кафедре. Со временем он превратился в крупнейшего в мире специалиста по разрядным и тепловым источникам света, автором настольной книги светотехников «Газоразрядные источники света». За свои научные заслуги он многократно получал благодарности, премии, почётные грамоты, наградные знаки (например, «Изобретатель СССР», «Ветеран труда», «ВДНХ»), правительственные медали «За доблестный труд в период Великой Отечественной войны 1941–1945 гг.» и «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина».

Впоследствии доктор технических наук и профессор Владимир Васильевич Мешков в 1941 году добровольцем ушёл в ополчение, но был отозван для работы в тылу. В июле 1942 года был назначен начальником светотехнического отдела МЭЛЗа. Это назначение не было случайным, т.к. примерно десять лет назад он был консультантом светотехни-

ческой лаборатории этого завода. Начиная с 1948 г. В.В. Мешков был многолетним заведующим кафедрой светотехники МЭИ. Именно при нём был расцвет учебной и научной деятельности кафедры, сформировалось ядро преподавателей, которые почти полвека определяли лицо кафедры. Он стал выдающимся учёным во многих направлениях науки и техники, автором книг Основы светотехники, ч. 1 и ч. 2 – лучшими учебными пособиями по светотехнике 20 века, непререкаемым светотехническим авторитетом: Заслуженным деятелем науки и техники России, кавалером высшей награды Родины – орденом Ленина, а также двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Знак Почёта и многими медалями.

Доцент кафедры светотехники Павел Иванович Черноусов участвовал ещё в Гражданской войне и закончил её командиром батальона Красной Армии. Уже тогда был награждён орденами Красного Знамени, а затем и Трудового Красного Знамени. Павел Иванович в 1936 году стал одним из первых аспирантов кафедры. Перед самой Великой Отечест-

венной войной он был назначен главным электротехником советского павильона Всемирной выставки в Нью-Йорке. К сожалению, нам неизвестно, на каких оборонных предприятиях работал П.И. Черноусов во время войны. Однако уже в 1945 году он, как специалист в звании полковника был направлен в Германию для отбора в рамках репараций электротехнического и светотехнического оборудования, необходимого для восстановления разрушенного войной хозяйства страны, в том числе оснащения МЭИ. Именно доцент кандидат технических наук П.И. Черноусов быстро стал после войны ведущим преподавателем кафедры, создателем лучшего для того времени и самого большого лабораторного практикума по фотометрии. Долгие годы этот практикум оставался самым современным по техническому оснащению и отличался высоким методическим уровнем.

Доцент кафедры светотехники Сергей Васильевич Батусов записывался добровольцем на фронт, но получил отказ на том основании, что как светотехник будет в своё время призван в свето-



маскировочные или прожекторные части. Кафедре светотехники было поручено включиться в работу по светомаскировке электростанций. Батусов С.В. и профессор нашей кафедры А.А. Труханов активно участвовали в конкретных мероприятиях по маскировке на Шатурской и Зуевской гидроэлектростанциях. Возвратившись из командировки в октябре 1941 года, С.В. Батусов вместе с немногими сотрудниками кафедры умело выполнил приказ о срочной эвакуации из столицы основного и ценного оборудования с тем, чтобы на новом месте проводить лабораторные работы по читаемым дисциплинам. Фотометрическая скамья, переносные фотометры, спектрометры и другие приборы были погружены на поезд и отправлены в Алма-Ату, а затем в Лениногорск (Восточный Казахстан). Сергей Васильевич стал председателем месткома лениногорского филиала МЭИ. Кафедра светотехники вошла в один из трёх факультетов филиала – электротехнический. Из светотехников в Лениногорске во время войны работали заведующий кафедрой Лев Давидович Белькинд, а также Сергей Васильевич Батусов, Алексей Петрович Иванов, Борис Фёдорович Фёдоров и Александр Ананьевич Труханов. С помощью студентов была быстро налажена светотехническая лаборатория. В начале декабря 1941 года, несмотря на тяжёлое положение на фронтах, в этом филиале МЭИ начались нормальные учебные занятия со студентами. Ещё через год был организован приём на первый курс для местной молодёжи, причём преимущественно на электротехнический факультет. Однако осенний семестр 1942/43 учебного года был последним для филиала МЭИ в эвакуации. В конце 1942 года вышло постановление правительства о воз-

вращении института в Москву. Уже с января следующего года МЭИ постепенно начинает входить в нормальный ритм и осуществлять учебный процесс уже в столице. В дальнейшем Сергей Васильевич Батусов стал доцентом кафедры светотехники, деканом вечернего отделения ЭТФ и, главное, замечательным светотехником – выдающимся специалистом в области светотехнических установок и, прежде всего, светосигнальной техники.

Несколько слов о женщинах-преподавателях и сотрудницах, многие годы работавших на нашей кафедре. Они также трудились не жалея сил, перенесли все ужасы войны и помогли возродить кафедру в послевоенные годы. Так, долгие годы на кафедре работали: старший преподаватель Крупенникова Лидия Ивановна (из первого послевоенного выпуска инженеров МЭИ), бесшумный на долгие годы секретарь кафедры Мишакова Анна Андреевна, ответственная за материально-техническое обеспечение Надежда Петровна Егорова. Все они участвовали в Великой Отечественной войне, кто – в ополчении, как А.А. Мишакова и Л.И. Крупенникова, кто – на трудовом фронте, как Н.П. Егорова. Все они защищали Москву в прифронтовых районах и в тылу. Анна Андреевна и Лидия Ивановна рыли окопы, устанавливали заграждения на подступах к Москве. А.А. Мишакова даже попала в окружение и была ранена. Л.И. Крупенникова потеряла здоровье в годы войны и всю жизнь боролась с последствиями тех страшных лет. Во время войны Надежда Петровна Егорова работала на заводе в две смены, а после – на строительных площадках по восстановлению разрушенного хозяйства страны. К сожалению, не все мужские и особенно женские имена ветеранов кафедры остались в нашей

памяти, но, может быть, читатели журнала по послевоенным фотографиям коллектива кафедры (рис. 5, 6) вспомнят своих родственников или знакомых и сообщат о них в редакцию журнала или на кафедру.

Очень важно отметить, что кафедра светотехники МЭИ в годы войны работала практически без перерывов. Выпуск инженеров-светотехников не прекращался, что сыграло важную роль в обеспечении инженерно-техническими кадрами разных организаций. Имеются в виду светотехнические заводы день ото дня набиравшие силы и увеличивавшие выпуск продукции, а также проектно-конструкторские бюро, выполнявшие военные заказы.

Во время страшной войны удалось сохранить коллектив и материально-техническую базу, поддерживать непрерывный учебный процесс на должном методическом и научном уровне. Свой вклад в общую победу над врагом внесли рабочие светотехнических заводов, бойцы прожекторных военных подразделений, инженеры, конструкторы, научные коллективы лабораторий и институтов, среди сотрудников которых были студенты и выпускники кафедры светотехники МЭИ предвоенных и военных лет.

В год 75-летия славной Победы над фашизмом мы с особым чувством вспомнили наш «Бессмертный полк» – преподавателей и сотрудников кафедры светотехники МЭИ военных лет. Обязательно ещё не один раз расскажем студенческой молодёжи о подвигах наших дорогих Учителей, Учёных и старших товарищей в военное время и об их достижениях в мирные дни.

**Снетков В.Ю., Лебедкова С.М.**  
**Кафедра светотехники**  
**НИУ «МЭИ»**

# Уважаемые читатели!



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

Наверное, прошедшие два месяца определяются словами «пандемия», «карантин», «коронавирус», которые по сути стали символами этого времени не только в нашей стране, но и во всём мире. Колонка этого месяца будет своего рода исповедью, но на тему не болезни, а светотехники. В конце апреля я почувствовал недомогание типа лёгкой простуды, однако запуганный СМИ решил вызвать врача. Отдам должное: я – «65+», и врач пришёл в день вызова. Постучал пальцем по груди, замерил кислород в крови и температуру – всё было в норме, – и произнёс, что настоящий диагноз возможен только после КТ, но реально на него я смогу попасть через 2–3 недели.

Понимая, что через это время мне может уже и не понадобится КТ, а дело происходит в Москве, я записался на КТ в платной клинике. 10 минут, «дышите – не дышите», и вот диагноз: двустороннее воспаление лёгких с 50 % поражения. Тут же предложили необходимые сделать необходимые анализы, и стало ясно: я болен именно «короной». Слава Богу, в этой же клинике я встретил и врача, который амбулаторно на дому вылечил меня и мою жену – в одной квартире быть и не заболеть невозможно.

На мне достаточно много различных обязательств, поэтому всем, с кем сотрудничая, я сообщил, что, видимо, недели две не смогу в должной мере их выполнять. Г.В. Боос сразу предложил мне бактерицидный светильник, который доставил мне домой. В первый месяц карантина я готовил обзор современной литературы по УФ дезинфекции для МСК «БЛ ГРУПП», потому экспериментальное знакомство с такого рода прибором меня очень заинтересовало. И эта лампа, сейчас я могу утверждать уверенно, сыграла важнейшую роль в моем выздоровлении.

Боюсь, что мои дальнейшие рассуждения покажутся медику или биологу предельно примитивными, но они выстраданы жизнью, беседами с врачами, чтением некоторой литературы, поэтому, как говорят в физике, в нулевом, дипольном приближении они, думаю, всё-таки верны. Вирусы, в отличие

от бактерий, не столько «пожирают» организм, как пытаются с ним жить вместе, они даже заинтересованы в жизни организма, где поселились. Однако при этом они убивают иммунитет органов, в которых поселились, открывая путь поражения для бактерий. В случае коронавируса поражается прежде всего лёгкие – пневмония. Поскольку от коронавируса вакцины нет, то победить его можно только укрепляя свой иммунитет, что при болезни сводится, по сути, к витаминотерапии. При этом важно, чтобы пока организм борется с вирусом, победить развившуюся пневмонию, для чего прописывается значительное (по моему восприятию) количество антибиотиков, убивающих бактерии.

Но поскольку мы окружены бактериями, то существует опасность подхватить любое другое заболевание. Вот здесь и оказал своё действие бактерицидный светильник: мы проводили дезинфекцию всех помещений квартиры дважды в день. Врач, навестивший нас дома, высоко оценил и лампу, и дезинфекцию. Использование светильника очень просто, и жена быстро освоила его и активно проводила дезинфекцию.

Случай со мной, несомненно, частный, но, кажется, он даёт основания для серьёзных выводов и обобщений. Многие сейчас считают, что данная пандемия порождена тем стилем жизни, который возник в мире, и к которому присоединилась Россия: мир стал единым, поездки и путешествия по всему земному шару стали не просто делом обычным, но и частью повседневности. При всех опасностях с точки зрения заражения такой способ жизни привлекателен со всех сторон и навряд ли мы от него откажемся. Представляется, что надёжным заслоном болезням здесь может стать дезинфекция общественных мест, где, несомненно, особое место занимает УФ-дезинфекция.

Впервые УФ-дезинфекция была проведена в 1938 году в детском госпитале в Пенсильвании, США. С тех пор это направление активно развивалось как у нас, так и в мире. С обзором состояния этого направления можно познакомиться в статье А.Л. Вассермана во втором номере нашего журнала за 2020 год. Однако УФ-дезинфекция продолжает развиваться, устраняя проблемы своего применения.

Всё это вновь нас возвращает к теме, что светотехника существенно шире, чем техника освещения. Ю.Б. Айзенберг определил две сферы светотехники: визуальная, связанная с освещением объектов, и не визуальная, связанная с различными технологическими

применениями. Очевидно, что область не визуального применения света будет со временем только возрастать. Однако методы расчёта, конструкции этих систем тесно связаны с системами визуального применения света, эти области нельзя разорвать. Они являются различными сторонами науки светотехники. Светотехника – область науки и техники, предметом которой является разработка способов генерации оптического излучения, и его пространственного перераспределения, а также преобразования в другие виды энергии и использования в различных целях.

Нельзя не отметить, что за последнее время быстро нарастают угрозы и вызовы человечеству, связанные с нехваткой питьевой воды, продуктов питания и энергии. Все эти три проблемы могут быть в значительной степени решены благодаря перспективам развития технологических применений оптического излучения.

Так обеспечение чистой питьевой водой из многочисленных загрязнённых рек и озёр достигается бактерицидной обработкой воды в специальных мощных дезинфекционных установках УФ излучения. Такие установки уже действуют в ряде городов мира, например, город Санкт-Петербург с 5 млн населением обеспечен одной такой действующей установкой – Северная водопроводная станция.

Значительное повышение степени удовлетворения потребностей населения в овощах, ягодах и фруктах обеспечивается при мощном развитии тепличного хозяйства с искусственным освещением.

Самый главный и самый сложный вопрос – это восполнение энергетических потребностей всех этих светотехнических установок. Здесь чрезвычайно важно сконцентрировать внимание и средства на развитии солнечной энергетики путём проведения исследований, конструкторских и других работ по повышению коэффициента полезного действия преобразования солнечного излучения в электроэнергию (с 10–15 % в настоящее время до 60–80 % в ближайшем будущем), а также благодаря развитию широкой сети солнечных электростанций по экваториальной зоне земного шара, развитие систем аккумулирования полученной энергии и эффективного её использования.

Всё это касается как раз проблем незрительного технологического использования оптического излучения. Таким образом очевидно, что жизнедеятельность человечества и его дальнейшее развитие невозможны без света.



# Инсоляция и COVID-19: защита от агрессора

Ю.Б. ПОПОВСКИЙ<sup>1\*</sup>, Н.И. ЩЕПЕТКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ИНСОЛЯЦИЯ», г. Москва

<sup>2</sup>Московский архитектурный институт (Государственная академия), г. Москва

\*E-mail: 01@insilation.pro

*Куда редко заглядывает солнце,  
туда часто приходит врач*

## Аннотация

В статье рассмотрено значение инсоляции как фактора профилактики и сдерживания инфекционных заболеваний и эпидемий. Помимо бактерицидного и вирулицидного санирующего эффекта солнечных лучей в авторах рассматриваются противоэпидемические возможности инсоляции как фактора микроклимата и психофизиологического регулятора защитных способностей человека, а также нормы инсоляции, как механизм регулирования плотности застройки. Инсоляция рассматривается авторами как универсальный природный противоэпидемический фактор, незаслуженно отеснённый в конце списка действенных инструментов для противодействия инфекции.

**Ключевые слова:** Инсоляция, коммунальная гигиена, нормы инсоляции, солнечный свет, психофизиология, противоэпидемические меры, профилактика, санитарно-эпидемиологическая безопасность, COVID-19.

Эффективное противодействие массовому распространению высококонтагиозных инфекций невозможно без согласованного использования всех доступных средств и мер – медико-профилактических и организационных. В фокусе общественного внимания находятся беспрецедентная мобилизация систем здравоохранения и масштабные ограничительно-карантинные меры. В данной статье рассмотрено значение инсоляции как универсального природного противоэпидемического фактора, незаслуженно отеснённого в конце списка действенных инструментов для противодействия инфекции. Инсоляцию и солнечный свет авторы рассматривают *не как средство лечения корона-вирусной инфекции* (эту возможность, в ответ на реплику Дональда Трампа, ВОЗ справедливо отнесла к «мифам»), а как средство снижения рисков рас-

пространения инфекции, подавления жизнеспособности вируса во внешней среде, поддержания защитных иммунных механизмов человека, влияющих на восприимчивость населения в целом, тяжесть протекания заболевания и время выздоровления, то есть как собственно санитарно-гигиенические и профилактические факторы, сдерживающие эпидемию COVID-19.

Со времени становления коммунальной гигиены как науки арсенал медиков и гигиенистов был многократно усилен доступными и эффективными антисептиками, средствами диагностики и лечения – аппаратными и фармакологическими, а также искусственными заменителями солнечного излучения – УФ-облучателями.

Смещение акцентов с природных средств защиты на технические, дезинфекционные и фармакологические, помимо высокой эффективности последних, объясняется ещё и тем, что природные факторы, в силу их общедоступности, не являются товаром и, не представляя коммерческого интереса, не имеют иных инструментов «продвижения» кроме здравого смысла, действующих норм и подвижничества немногих специалистов. Напротив, многие признанные и нормативно закреплённые факторы гигиенической безопасности искусственной среды обитания человека удорожают ведение городского хозяйства и снижают доходность строительства, с чем связано целенаправленное давление заинтересованных сторон (инвесторов и заказчиков строительства), в том числе через госструктуры, на санитарно-эпидемиологические нормативы, якобы утратившие актуальность в новой городской действительности.

Однако, как мы видим на примере эпидемии COVID-19, современный город и современный человек не стали менее уязвимы перед лицом новых инфекций, прежде всего вирусных.

Отсутствие эффективных средств профилактики и сдерживания эпидемии COVID-19 вынуждает решать проблему ограничительно-карантин-

ными мерами – наиболее болезненными для экономики, и в конечном счёте, для большей части населения. Но, если мы говорим о том, что в борьбе с эпидемией должны быть задействованы все возможные ресурсы, справедливо начать с наименее ресурсоёмких, общедоступных и, по существу, бесплатных природных факторов, не в последнюю очередь – с инсоляции.

Эффективность инсоляции как противоэпидемического ресурса кем-то может быть поставлена под сомнение с учётом того, что ни одна страна, независимо от степени обеспеченности прямым солнечным светом, не избежала вовлечённости в пандемию. Безусловно, решающими факторами распространения COVID-19 явилась интенсивность транспортных потоков, плотность населения и традиционно общественные формы труда и досуга. Однако, с момента прихода инфекции дальнейшее развитие эпидемического процесса регулируется всем комплексом противоэпидемических факторов, как целенаправленных, так и естественных или случайных. Касательно предмета настоящей статьи, очевидны следующие существенные особенности центров пандемии:

- география – на сегодняшний день заболеваемость COVID-19 на 1000 населения в разы выше в странах северного полушария, выходящих в настоящий период из сезонного солнечного дефицита;

- плотность населения – COVID-19 поражает прежде всего мегаполисы с высокой плотностью застройки – фактор, определяющий недостаточную обеспеченность городских пространств солнечным светом, особенно в условиях его сезонного дефицита.

Надо понимать, что гигиеническое значение инсоляции не ограничивается непосредственным санирующим эффектом коротковолновой части спектра солнечного света. Для сдерживания распространения инфекции не менее важна климатообразующая роль инсоляции, в том числе, формирование микроклимата помещений, зданий и территорий, а также то, что в российских нормах инсоляции до 2001 года отмечалось как «общеоздоровительный эффект». Рассмотрим каждую группу факторов отдельно.

## Санирующий эффект

Непосредственное противовирусное действие солнечной радиации,

и в первую очередь прямого солнечного света (инсоляции), применительно конкретно к вирусу *COVID-19*, связано с повреждением РНК-молекулы вируса, что делает невозможной его репликацию в клетке-хозяине. Степень устойчивости вируса *COVID-19* к солнечному свету по имеющимся на сегодняшний день материалам достоверно оценить нельзя. Но и при наличии результатов подобных исследований их практическая польза была бы невелика, поскольку фактическая инсоляция определяется постоянно меняющимися факторами: облачность, состояние атмосферы, высота стояния солнца, продолжительность солнечного сияния, а также положение экспонируемой поверхности и её фактура. Тем не менее, наличие в спектре солнечного света УФ-В-составляющей [1] гарантирует его инактивирующий вирус эффект, а учитывая продолжительность солнечного сияния в ясные дни (для Москвы даже зимой не менее 2 часов [2]), вирулицидный потенциал инсоляции может быть сопоставим с кратковременным облучением УФ бактерицидными установками, а в летние месяцы существенно превосходить его. При этом вирулицидный потенциал инсоляции проявляется повсеместно и динамически – в зависимости от даты и времени суток, определяющих положение солнца на небосводе. Инсолируются не только (и не столько) помещения и территории с нормируемым инсоляционным режимом, но также и все городские пространства – улично-дорожная сеть, парки, городской воздух, фасады домов, открытые солнечному свету, и все помещения, где инсоляция по нормам не требуется, но её saniрующей эффект также действителен и необходим.

Инсоляция городских пространств и фасадов обеспечивает также эффективность другого гигиенического фактора – естественной вентиляции и проветривания помещений.

### Климат и микроклимат

Из предварительных результатов исследований, имеющих в открытом доступе [3], следует, что оптимальными условиями для передачи вируса *COVID-19* является температура 5–9 °С при относительной влажности 35–50 %, его жизнеспособность во внешней среде снижается при повышении температуры и снижении влажности, а при 30 °С способность

вируса переносить инфекцию (вирулентность) падает до нуля. Поэтому saniрующим эффектом обладает не только коротковолновая УФ часть спектра солнечного света, но и инфракрасная. Попадание в помещение прямых солнечных лучей через двойное остекление повышает температуру облучаемой деревянной или пластиковой поверхности на 14–15 градусов, что при комнатной температуре 20–25 °С составит 35–40 °С – условия, нейтрализующие активность вируса. На открытых городских пространствах тепловой эффект инсоляции имеет те же значения (13–15 % в зависимости от высоты стояния солнца и состояния атмосферы), и в наиболее благоприятное для инфекции время межсезонья температура бетонных и асфальтовых покрытий поднимается с 1–10° до 14–15°<sup>1</sup>, что делает их неблагоприятной средой для выживания вируса *COVID-19* и способствует его инаktivации.

Одновременно с повышением температуры инсолируемых поверхностей в межсезонье происходит снижение относительной влажности, что также является фактором, сдерживающим инфекцию.

### Психофизиология. Иммунный статус

Помимо прямого физического и биохимического вирулицидного действия инсоляция прямо и косвенно участвует в регулировании ряда физиологических процессов на уровне организма отдельного человека, что также существенно влияет на ход эпидемического процесса в целом, определяя восприимчивость населения к инфекции, а также тяжесть течения заболевания, время выздоровления и восстановления. Этот комплекс факторов называется психофизиологическим действием. В этом случае значение имеет вся видимая часть спектра солнечного света, и речь идёт о совместном действии прямого и рассеянного солнечного света на сетчатку глаза с последующей передачей нервных импульсов по зрительному тракту к центрам гормональной регуляции организма. При попадании прямого солнечного света освещён-

ность в пределах светового пятна возрастает более чем в 30 раз. При световом пятне размером в 2,5–3,5 % от площади пола освещённость на горизонтальной поверхности в центре помещения только за счёт отражённого света (вне прямой видимости светового пятна) повышается в 2–2,5 раза на уровне 0,8 м над полом и в 3–3,5 раза на уровне пола. Световое пятно размером в 20 % от площади пола повышает те же значения в 4,5 и в 9 раз соответственно<sup>2</sup>. Учитывая, что физиологическая норма КЕО (коэффициент естественной освещённости) в помещении составляет 5–10 % (по рекомендациям ВОЗ), а норма освещённости, например, для жилых помещений – 0,5 %, современный городской житель живёт в условиях постоянного дефицита экологичного, бесплатного, неисчерпаемого дневного света. Повышение освещённости в несколько раз за счёт прямого солнечного света в солнечные дни частично или полностью устраняет этот дефицит.

Тема «свет и здоровье» неоднократно освещалась на страницах «Светотехники» [4] [5] [6] [7]. Поэтому в контексте данной статьи достаточно ограничиться простым перечислением «светозависимых» психофизиологических процессов.

Высокие уровни дневной освещённости обеспечивают исправную работу циркадных ритмов, отвечающих за нормальную гормональную регуляцию физиологических процессов в организме. Наиболее известным следствием сбоя циркадных ритмов является нарушение цикла сон-бодрствование, включая бессонницу, дневную сонливость, снижение работоспособности, апатию. Низкие уровни освещённости, не обеспечивающие необходимого светового контраста между днём и ночью – причина развития сезонного аффективного расстройства (САР) в осенне-зимний период, способствующего развитию депрессивных состояний, снижению стрессоустойчивости. Указанные негативные следствия недостаточного дневного освещения (а в условиях мегаполиса недостаточное естественное освещение недостижимо без участия прямого солнечного света) снижают иммунный статус организма, что проявляется в повышенной

<sup>1</sup> Данные о динамике освещённости в инсолируемом помещении – по собственным справочным замерам авторов, проводившимся 21 апреля 2020 г. в Москве

<sup>2</sup> Данные о динамике освещённости в инсолируемом помещении – по собственным справочным замерам авторов, проводившимся 21 апреля 2020 г. в Москве



восприимчивости к инфекции, слабым иммунным ответе и, соответственно, более тяжёлом течении болезни. Известен факт, подтверждённый рядом исследований XX века [8], что ранозаживление в хорошо инсолируемых палатах идёт заметно быстрее, чем в палатах, инсолируемых недостаточно, при том, что дезинфекционный и антисептический режим и в тех, и в других палатах одинаков.

Даже кратковременное участие прямого солнечного света в формировании световой среды, создавая дневные световые акценты, «подстраивает» внутренние часы организма, что повышает психоэмоциональный статус человека, способствует стрессоустойчивости, поддерживает эффективность всех защитных механизмов, включая иммунные.

### **Нормы инсоляции как регулятор плотности застройки и плотности населения**

При всей важности климатического фактора, иммунного статуса населения и качества систем здравоохранения следует признать, что основным фактором распространения *COVID-19* инфекции являются плотность населения и прямо связанные с ней нагрузка на общественный транспорт и центры общественного притяжения – культурные, торговые, спортивные. Здесь следует напомнить, что до сих пор почти единственным фактором сдерживания уплотнения застройки являются нормы инсоляции и естественного освещения, и динамика изменения этих норм демонстрирует череду весьма сомнительных с научной точки зрения конъюнктурных компромиссов между требованиями санитарно-эпидемиологической безопасности и интересами градостроительной отрасли. За полувековую историю нормирования инсоляции нормы сократились с 3–4 часов до полутора–двух [9], расчётные даты в центральной географической зоне, где проживает большая часть населения России, без какого-либо обоснования урезаны в 2017 г. на два месяца (ныне они хуже, чем в северной зоне), ликвидированы требования к инсоляции в летний период и недопустимость круглогодичного затенения фасадов и территорий. Перечисленные нормативные послабления переносят акцент с оздоравливающего фактора для человека (в ред. 1982 г.) на фактор, «оказывающий оздоравливающее

влияние на среду обитания человека» (в ред. 2001 г.), который, по существу, сводится к бактерицидному. Вероятно, логика общественного развития предполагает, что человек как вид за последние 50 лет достаточно изменился, чтобы отменить механизмы его самозащиты и саморегулирования, формировавшиеся миллионы лет. Но это не так. Уязвимость современного города для высококонтагиозных инфекций прямо пропорциональна плотности застройки – объёму неинсолируемых фасадов и территорий, и плотности населения – банальному числу рук на одну дверную ручку. В этом отношении весьма сомнительна тенденция строительства апартаментов – площадей, в большинстве случаев, используемых для проживания, но не обеспечивающих нормативные, в том числе санитарно-эпидемиологические, требования к жилым помещениям и не предусматривающие наличие социальной инфраструктуры, в том числе, в части обеспеченности междучреждениями.

Пандемия *COVID-19* ставит вопрос: так ли безопасен современный город, чтобы игнорировать проверенные эволюцией, жизнью и наукой природные факторы защиты человека и его искусственной среды обитания? [10]

### **Подводя итог**

Роль трансформируемого атмосферой солнечного света не менее важна в жизни человека. Нормы его, более широкомаштабного, по сравнению с инсоляцией, использования также эпизодически «кастрируются» двумя выпускающими их ведомствами – Минстроем и Минздравом РФ, хотя почему-то это не привлекает внимание общества. В последних редакциях норм естественного освещения расчётная точка для большинства помещений перенесена из глубины в центр при сохранении довольно скудной нормы КЕО. Очевидно, что освещённость в помещении становится существенно ниже, что потребует использования большую часть года дополнительного искусственного освещения, которое невозможно заменить дневной свет ни качественно, ни количественно.

Основы отечественных норм естественного освещения и инсоляции были заложены в тяжёлые послевоенные годы, когда, тем не менее, возвращение к мирной жизни не мыслилось

без комплексного решения вопросов безопасности и качества жизни в восстанавливаемых городах. Правительство планировало и субсидировало комплексные исследования в области санитарно-гигиенической безопасности среды, в частности, определения необходимых для полноценной жизни светоклиматических параметров. В программах исследований участвовали специализированные организации и учёные высокого уровня из различных областей знаний – светотехники, гигиены, архитектуры... На основе доказательной научной базы были разработаны и введены в действие первые санитарные нормы по естественному освещению и инсоляции. К сожалению, то авторское поколение самостоятельно мыслящих учёных с их профессионализмом и научным потенциалом ушло из жизни, институты и лаборатории с их вечно актуальной тематикой в области общественного здоровья исчезли или были перепрофилированы, а последовавшая генерация специалистов, ответственных за судьбу гигиены, как науки, представлена скорее чиновниками, чем известными учёными, что сделало возможными законодательные отступления и нормативные послабления под давлением интересов строительного бизнеса [9]. Например, невозможно понять мотивацию ухудшения норм инсоляции для центральной географической зоны РФ, принятого главным санитарным врачом А.Ю. Поповой без каких-либо научных исследований, обоснований, обсуждений в среде профессионалов и в обществе, скорее вопреки им, исключительно «по продвижению Клуба инвесторов Москвы». На открытое письмо в её адрес [10] Анна Юрьевна не ответила.

Остаётся добавить, что при встрече с подобными *COVID-19* инфекциями до начала производства в промышленных масштабах действенных вакцин и до внедрения достоверно эффективных методов лечения человечеству остаётся только два проверенных веками средства – запретительно-карантинные меры и солнечный свет. И чем больше в современном городе второго, тем менее строгими и деструктивными могут быть первые.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Оболенский Н.В. Архитектура и солнце. М. Стройиздат. 1988.

### Международная комиссия по освещению выпустила Официальное заявление об использовании ультрафиолетового излучения для борьбы с распространением COVID-19

Международное внимание к использованию ультрафиолетового излучения (УФИ) для снижения риска передачи COVID-19 велико и продолжает расти с каждым днём пандемии. По этой причине МКО опубликовала Официальное заявление<sup>1</sup>, которое следует из двух публикаций МКО, касающихся использования УФИ. Электронные издания этих публикаций были недавно открыты МКО для свободного использования, и за последние два месяца к ним обратились более 10000 раз!

Новое заявление МКО суммирует ключевые положения указанных публикаций и резюмирует самые последние знания в этой области, чтобы объяснить наиболее важные аспекты использования УФИ, в частности УФС (ультрафиолетовое излучение в диапазоне 100–280 нм) для влияния на распространение нового коронавируса.

Ключевые положения этого заявления:

- УФС чрезвычайно полезно для дезинфекции воздуха, поверхностей или воды. Тем не менее, МКО и ВОЗ предостерегают от использования УФ-дезинфицирующих ламп для дезинфекции рук или любых других участков кожи (ВОЗ, 2020)
- УФС может быть очень опасным для людей и животных и должно использоваться только в тщательно контролируе-

мых условиях с использованием правильно сконструированных приборов, гарантирующих соблюдение пределов воздействия, указанных в ICNIRP (2004) и IEC/CIE (2006). Тем не менее, вероятность возникновения рака кожи от воздействия устройств, излучающих только УФС, считается незначительной

- УФС может вызвать деградацию материалов, и это следует учитывать в случаях использования материалов, восприимчивых к УФ, таких, как пластмассы

- Дополнительные исследования вопросов безопасности новых источников УФС (особенно в отношении порогов безопасности во избежание фотокератита («солнечного ожога роговицы»)), крайне необходимы

- Для правильной оценки УФИ и оценки рисков его использования необходимо проведение соответствующих измерений УФИ

- Продукты УФС, предназначенные для рядовых потребителей, могут быть небезопасными или неэффективными для дезинфекции.

Полный текст официального заявления МКО доступен на сайте МКО, Российским национальным комитетом МКО сделан официальный перевод заявления на русский язык. Кроме того, МКО выпустила видео с пояснением важных положений заявления.

<sup>1</sup> Текст Официального заявления и его перевод на русский язык доступны на сайте МКО – <http://cie.co.at/publications>

2. Справочник эколого-климатических характеристик г. Москвы (по наблюдениям метеорологической обсерватории МГУ). Т. 1. М. Изд-во МГУ. 2003. С. 35–37.

3. URL: <https://iz.ru/986191/anna-urmantceva-mariia-nediuk/minusy-plusa-koronavirus-luchshe-vsego-rasprostranaietsia-pri-8-9degc/> (дата обращения: 22.04.2020).

4. Бойс П. Свет и здоровье // Светотехника. – 2006. – № 2. – С. 43–48.

5. Анисимов В.Н. Световой десинхронизм и здоровье // Светотехника. – 2019. – № 3. – С. 30–38.

6. Гаушер Чош. Жизнь пожилых людей: освещение, циркадные ритмы и деменция II // Светотехника. – 2019. – № 3. – С. 6–10.

7. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 4-е изд., Раздел пятнадцатый. Свет и здоровье. Незрительные функции света – М.: 2019. С. 809–813.

8. Саатов Х.И. К особенностям заживления ран в условиях воздействия на организм ионизирующей радиации и инсоляции: Дисс. канд. мед. наук: т. 1–2 / Самарк. мед. институт им. И.П. Павлова – 1967

9. Поповский Ю.Б. История санитарно-эпидемиологического нормирования инсоляции жилых помещений в СССР и Российской Федерации // Национальная Ассоциация Учёных. – 2015. – № 6–3 (11). – С. 27–30.

10. Шмаров И.А., Земцов В.А., Коркина Е.В. Инсоляция: практика нормирования и расчёта // Жилищное строительство. – 2016. – № 7. – С. 48–53.

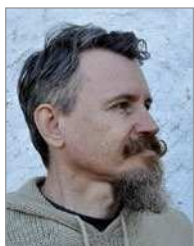
11. Щепетков Н.И. Открытое письмо Главному санитарному врачу РФ А.Ю. Поповой. // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 100.



**Щепетков Николай Иванович,**

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

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



**Поповский Юрий Богданович.**

Главный специалист ООО «ИНСОЛЯЦИЯ». Врач по специальности медико-профилактическое дело (окончил ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова в

2012). Архитектор (окончил МАРХИ в 1983 г.). Доцент кафедры Архитектурной физики МАРХИ



# Освещение общественных пространств: новые тенденции и дальнейшее развитие<sup>1</sup>

Р. НАРБОНИ

Студия *CONCEPTO*, Баньё, Франция  
E-mail: roger.narboni@concepto.fr

## Аннотация

Статья посвящена истории и перспективам развития наружного освещения общественных пространств с учётом новых возможностей, предоставляемых быстро развивающейся техникой, и тенденций в области архитектуры и архитектурного освещения, а также требований по защите окружающей среды.

**Ключевые слова:** ночная сцена, светодизайнер, ночной географ, тональность света, осветительная опора, осветительная мачта, подсветка деревьев, освещение ландшафта, СД, смартфон, «умная» осветительная опора, светопроекция (изображение), преобразование световых эффектов, светящееся место для отдыха, автономные источники света, флуоресценция, биолюминесценция, светящиеся материалы, власть над темной, светящийся город.

## 1. Зарождение и развитие освещения общественных пространств

В первые десятилетия после окончания Второй мировой войны освещение общественных пространств сводилось к освещению автомобильных дорог, позволяющему автомобилистам хорошо видеть в ночное время и замечать препятствия и пешеходов, т.к. в то время фары автомобилей работали очень плохо.

Первоначально, в средние века, это освещение, которое ещё не называли освещением общественных пространств, сводилось к освещению мест нахождения властей (замков), и лишь впоследствии оно распространилось на городские районы. Появление в конце 19 века газовых светильников и ламп накаливания, а затем и газоразрядных ламп, способствовало демократизации освещения общественных пространств, которое распространилось даже беднейшие городские районы. Позднее, примерно в 1970-х годах, оно охватило всю территорию городов и пригородные дороги.

Задолго до наступления эры автомобилизма и связанной с ней градостроительной деятельности, безопасность пешего передвижения в ночное время, защита собственности и людей привели к зарождению и последующему развитию освещения общественных пространств, и эти вопросы до сих пор поднимаются при всех общественных обсуждениях освещения городов, включая его создание и модернизацию.

Когда после окончания Второй мировой войны количество автомобилей в городах начало хотя и постепенно, но существенно возрастать, возникла необходимость обеспечения видимости для автомобилистов, что сильно повлияло на функциональную сторону проектирования устано-

вок для освещения общественных пространств, и это до сих пор заметно в большинстве городов мира и всё ещё остаётся одной из главных забот градостроителей, занимающихся развитием мегаполисов.

Эта потребность в функциональном освещении привела к появлению осветительных опор, устанавливаемых на краях дорог и находящихся на одинаковом, зависящем от высоты опор, расстоянии друг от друга. При этом расположение опор должно обеспечивать сакральную и абстрактную равномерность освещённости, хотя на практике оно задавалось инженерами-светотехниками. Эти принципы и доктрины сформировали весь дневной и ночной облик улиц и все современные пуантилистические ночные пейзажи городов. И только разнообразие тональности освещения, обусловленное успешным развитием источников света, привело к изменению этих «звёздных» ночных сцен.

Дороги, обрамлённые тротуарами или нет, освещались регулярно и непрерывно светильниками, установленными на опорах, высота которых была пропорциональна ширине дороги и которые располагались на краю проезжей части дороги (с одной или двух сторон). Если дорога была обрамлена деревьями, то иногда добавляли и осветительные установки для пешеходов (опоры для освещения тротуаров или светильники для пешеходов, установленные на половине высоты мачт и направленные в сторону тротуаров). В городах с плотной застройкой, в которых фасады домов образуют непрерывную линию или в которых очень узкие тротуары, светильники для освещения проезжей части закреплялись непосредственно на фасадах (с одной или двух сторон улицы) на высоте, также пропорциональной ширине дороги (рис. 1).

В качестве исключений, пешеходные зоны, парковые аллеи или набережные рек освещались с использованием имеющих меньшие размеры опор для освещения пешеходных пространств (обычно высотой от 3 до 5 м), расположенных столь же упорядоченно. Коррелированная цвето-



Рис. 1. Трамвайная линия, г. Гренобль, Франция (архитекторы: *Attica*; светодизайн: *Roger Narboni, CONCEPTO*)

<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского

вая температура освещения общественных пространств зависела от уровня технического развития ламп (лампы накаливания в 1879 г., ртутные газоразрядные лампы в 1931 г., люминесцентные трубчатые лампы в 1958 г., галогенные лампы накаливания в 1958 г., натриевые лампы высокого давления в 1962 г. и металлогалогенные лампы в 1964 г.), и очень долго технические специалисты не делали различия между освещением пешеходных пространств и освещением дорог.

После появления натриевых ламп высокого давления была разработана новая техническая доктрина, в основу которой были положены предполагаемые свойства ночного зрения (отличающегося от центрально-периферического зрения) и которая привела к внедрению оранжевого освещения дорог натриевыми лампами высокого давления и холодно-белого освещения тротуаров ртутными лампами, что должно было улучшить восприятие и контраст для водителей. В случае освещения общественных пространств Парижа эта доктрина превалировала вплоть до середины 1990-х годов.

И только ближе к концу 1980-х годов благодаря появлению первых натриевых ламп белого света (с коррелированной цветовой температурой 2500 К), а затем и металлогалогенных ламп с керамическими горелками (с коррелированной цветовой температурой 3000 К), освещение тротуаров и проезжих частей проспектов и улиц выиграло благодаря изменению тональности освещения от фасада к фасаду. С появлением в 2010-х годах мощных СД освещение общественных пространств претерпело поистине революционные изменения.

Уровень освещённости общественных пространств со временем неизменно возрастал вплоть до появления первых стандартов на освещение (европейские стандарты были опубликованы в 2005 г.). Первые газовые светильники для освещения общественных пространств освещали улицы с трудом, что было связано с оптической неэффективностью этих светильников. Во время реконструкции, проводившейся после окончания Второй мировой войны, равный 5 лк средний уровень освещённости на поверхности дороги мог удивить наблюдателей своей высокой интенсивностью. Несколькими десятилетиями позже и вплоть до введения европейских стандартов на освещение общественных пространств (за которыми благодаря усилиям основанной в 1913 г. Международной комиссии по освещению (МКО) последовали относительно аналогичные стандарты, принятые на других континентах) часто требовалось, чтобы любой проект освещения обеспечивал среднюю освещённость, равную от 30 до 35 лк на проезжей части и от 10 до 20 лк на тротуарах.

Это увеличение уровня освещённости в городах в первую очередь было, конечно, обусловлено техническим прогрессом в области источников света и оптических систем светильников, но при этом немалую роль сыграло и удовлетворение пожеланий жителей, которые всегда ошибочно полагали (под влиянием лобби светотехнической отрасли), что увеличение уровня освещённости приводит к уменьшению опасности для пешеходов в ночное время и увеличению безопасности дорожного движения. Этот демагогический подход никогда не принимал во внимание специфику нашего зрения в тёмное время суток (сумеречного и ночного), потребность ночного восприятия

в контрасте и времени, необходимом глазам для адаптации к изменениям освещения.

Европейские стандарты, принятые благодаря усилиям северо-европейских стран, предпочитающих более низкие, чем южно-европейские страны, уровни освещения в городах, к счастью помогли уменьшить уровни освещённости городских улиц, за что следует благодарить политику, направленную на уменьшение скорости движения автомобилей, и лучшему учёту потребностей ночных пользователей улиц и дорог, особенно во второй половине ночи (уровни освещения, рекомендованные в стандартах, фактически зависят от скорости и интенсивности движения транспорта, присутствия или отсутствия пользователей разных типов и световой среды).

С другой стороны, до недавнего времени (за редкими исключениями, инициированными в конце 1980-х – начале 1990-х годов во Франции благодаря появлению профессии светодизайнера – специалиста в области освещения городов) способы освещения общественных пространств мало изменились с момента зарождения этой области применения освещения. Осветительные приборы неизменно монтировались на фасадах или, что происходило реже, подвешивались между ними, а после появления газового, а затем и электрического освещения закреплялись на имеющих разную высоту опорах, установленных по краям проезжей части, что легко заметить, не только гуляя по любым городам мира, но и, к сожалению, во всех новых пригородах, находящихся как на стадии проектирования, так и на стадии строительства.

## 2. Первые попытки изменения освещения пешеходных пространств

Возможности в части проектирования освещения общественных пространств были ограничены представленными на рынке светильниками и лампами. Так называемые светильники для освещения дорог с соответствующими лампам оптическими системами особой формы были предназначены для освещения участков дорог, длина которых намного превышала их ширину. Долгое время эти же светильники, может быть меньших размеров и с лампами меньшей мощности (и излучающими свет другой тональности), использовались и для освещения пешеходных пространств. Постепенно появлялись оптические си-



Рис. 2. Улица *Cours des 50 Otages* в г. Нанте, Франция, 1991 г. (архитекторы: *Italo Rota* и *Bruno Fortier*; светодизайн: *Roger Narboni*, *CONCEPTO*; фотография: *Philippe Ruault*)





Рис. 3. Центр г. Ньора, Франция, 1992 г. (светодизайн: Roger Narboni, CONCEPTO)

стемы, конструкция которых больше подходила для освещения пешеходных пространств (прогрессивные оптические системы, как симметричные, так и асимметричные). Для обеспечения более комфортной световой среды для пешеходов во Франции в начале 1990-х годов для освещения пешеходных пространств начали использовать первые осветительные опоры со светильниками отражённого света и светящиеся столбы, которые существовали с 1950-х годов (рис. 2).

Через несколько лет прожекторы, изначально предназначенные для освещения памятников, были испытаны применительно к освещению больших пространств с преимущественным наличием пешеходов. Эти большие прожекторы также крепились к фасадам окружающих зданий (рис. 3). В середине 1990-х годов, когда появились новые оптические системы, предназначенные для металлогалогенных ламп, у светодизайнеров возникла идея размещать несколько архитектурных прожекторов на специальных мачтах высотой от 8 до 14 м, устанавливаемых на больших перестраиваемых площадях (в центре или по краям) для создания более объёмного и обволакивающего освещения, свободного от «сакральных» осевой упорядоченности и равномерности распределения освещённости. Подобное освещение позволило при помощи нескольких распределённых в пространстве небольших мачт обеспечить возможность наблюдения многочисленных вертикалей и днём, и ночью. Оно также обеспечило преимущества, обусловленные определённой модульностью (за счёт изменения на месте ориентации и расположения прожекторов в соответствии с требованиями тех или иных событий), хотя на практике после утверждения установок модификации или попытки модификации имели место очень редко.

Появление первых цветных металлогалогенных ламп и использование цветных светофильтров позволили провести первые испытания цветного освещения общественных пространств.

Позже освещение общественных пространств разнообразили за счёт включения осветительных приборов в объекты или скамейки (рис. 4), причём в то время использовались главным образом светильники наружного освещения, содержащие белые или цветные трубчатые люминесцент-



Рис. 4. Набережная в г. Ле-Сабль-д'Олон, Франция, 2008–2013 гг. (архитектор: Gerard Lancereau; архитекторы-ландшафтоустroители: Jacqueline Osty & Associates, светодизайн: Roger Narboni и Virginie Nicolas, CONCEPTO)

ные лампы. Утапливаемые в землю светильники с цветными СД или компактными люминесцентными лампами, которые появились в начале 1990-х годов, расширили возможности в части формирования ночного пространства, независимо от его размеров. Они использовались для формирования световых дорожек или для обозначения регулярных маршрутов (трамвайных линий, дорожек для велосипедистов или пешеходных дорожек).

Подсветка деревьев и выделение фонтанов также стали в то время важными элементами освещения. И наконец, следует упомянуть прогресс в области архитектурного освещения в части освещения фасадов окружающих общественных пространств домов в целях формирования освещённых вертикальных плоскостей, полностью включённых в освещаемую картину и обеспечивающих трёхмерное ночное восприятие освещённого пространства.

### 3. Освещение общественных пространств сегодня

В последние годы дизайн освещения общественных пространств претерпел радикальные изменения, хотя в мировом масштабе эти новые подходы остаются не очень востребованными. Развитие освещения общественных пространств обусловлено с одной стороны тем, что лица, стоящие во главе связанных со строительством или перестройкой проектов, под влиянием общественности или частных подрядчиков всё чаще пользуются услугами светодизайнеров на стадии тендеров, а с другой стороны – тем, что, во-первых, способы освоения ночных общественных пространств претерпели изменения в связи с новыми потребностями пользователей, и, во-вторых, революционное внедрение СД (к которым в настоящее время относятся 100 % используемых в проектах освещения источников света) стимулировало креативность светодизайнеров и появление новых подходов к освещению.

Эти новые подходы к освещению общественных пространств согласуются с новыми подходами к разработке проектов развития городов, которые постепенно адаптировались к преобразованию городов и которые во главу угла ставят не интересы автомобильного движения, а об-



Рис. 5. Портовый район, г. Пантен, Франция (архитекторы-ландшафтоустроители: *Jacqueline Osty & Associates*; светодизайн: *Roger Narboni, CONCEPTO*)

шествственный транспорт и мягкие варианты обеспечения мобильности (*soft mobility modes*) (так что светодизайнеры, к счастью, оказались свободными от заботы об обеспечении высоких уровней освещённости и равномерности, рекомендуемых для проезжих частей дорог). Добрая воля и возрастающая заинтересованность большого числа выборных должностных лиц в улучшении естественности городов, равно как и в более экологичных и биологически вариативных проектах развития, также влияют на новые проекты освещения городов.

Руководители проектов смогли откликнуться на эти новые потребности привлечением помимо обычных архитекторов-градостроителей ещё и архитекторов- и инженеров-ландшафтоустроителей и светодизайнеров (в ведении которых находится не только простое освещение общественных пространств, но и формирование их ночного облика), а также, в зависимости от проекта, экологов, дизайнеров, художников, социологов и зачастую даже философов и «ночных» географов (*night geographers*) (рис. 5).

В результате проектирование освещения общественных пространств стало более комплексным. При проектировании освещения общественных пространств следует, конечно, учитывать технические, нормативные, энергетические, экологические и бюджетные требования, обеспечивая при этом привлекательную и разнообразную световую среду и предлагая новые возможности для использования общественных пространств и их новое прочтение. Кроме того, освещение общественных пространств должно способствовать увеличению интерактивности пешеходов.

Так что обязанности светодизайнера постепенно изменялись, с тем чтобы обеспечить выполнение всех этих новых запросов, и освещение общественных пространств в настоящее время полностью обновилось.

### 3.1. Опоры со светодиодными светильниками для освещения пешеходных пространств

За последнее десятилетие дизайн опор для освещения пешеходных пространств чрезвычайно разнообразился благодаря многочисленным возможностям, предоставляемым СД в части увеличения как количества световых эффектов и специальных оптических систем, уменьшения энергопотребления и миниатюризации источников света,



Рис. 6. Парк *Vallée aux Loups*, г. Шатне-Малабри, Франция (архитекторы-ландшафтоустроители: *Jacqueline Osty & Associates*; светодизайн: *Roger Narboni, CONCEPTO*)

так и декоративных возможностей освещения. К сожалению, иногда наблюдаются перекосы, когда причудливый дизайн опор для освещения пешеходных пространств становится самоцелью, что неблагоприятно сказывается на создаваемой для пешеходов световой среде.

Тем не менее, новые модели осветительных опор, несущих светящиеся декоративные элементы, позволяют по-разному оживлять общественные пространства и предлагать пешеходам и горожанам более современные подходы к освещению городов и более разнообразное видение ночных пейзажей (рис. 6, 7).

### 3.2. «Умные» осветительные опоры

Желание свести к минимуму количество мачт, установленных в общественных пространствах, как и стремление обеспечить при помощи одной и той же мачты различные функциональные, декоративные, архитектурные, сигнальные возможности или потребности, связанные с освещением, привели к созданию цилиндрических модульных ос-



Рис. 7. Парк *Al Azaiba*, г. Маскат, Оман (архитекторы-ландшафтоустроители: *Jacqueline Osty & Associates*; светодизайн: *Roger Narboni, CONCEPTO*)





Рис. 8. Площадь *Epars*, г. Шартр, Франция (архитекторы: *Reichen & Robert*; архитекторы-ландшафтоустроители: *Jacqueline Osty & Associates*; светодизайн: *Roger Narboni, CONCEPTO*)

ветительных опор, позволивших реализовать выполнение этих разнообразных функций освещения на разной высоте от поверхности земли.

Кроме того, города предложили устанавливать на этих опорах громкоговорители, камеры видеонаблюдения, розетки для иллюминации и, по возможности, телевизионные системы и датчики, например, датчики присутствия.

В результате почти все изготовители светильников и опор разработали так называемые «умные» модульные осветительные опоры, послужившие первым шагом к созданию «умного» освещения. Они также предлагают гнезда для зарядки электрических приборов (например, смартфонов или взятых в уличных пунктах проката электрических велосипедов или самокатов).

Эти осветительные опоры, как «умные», так и нет, позволяют структурировать ночное пространство и обеспечить ряд световых эффектов и, тем самым, открывают возможности для формирования световых композиций.

### 3.3. Высокие осветительные мачты

В том же ключе было разработано освещение больших пространств, обеспечиваемое многочисленными направленными прожекторами для архитектурного освещения, расположенными на разной высоте на высоких мачтах. Эти мачты разрисованы, украшены светящимися нерегулярностями (*luminous faults*), двойными оболочками (*double skins*) и световой графикой (что стало возможным благодаря использованию СД), что делает их заметными издали для формирования ночного облика больших пешеходных площадей (рис. 8).

Учитывая стремление всё большего числа западных стран к минимизации светового загрязнения и сохранению разнообразия ночных форм жизни в городах, большинство выборных должностных лиц запрещают подсветку деревьев утопленными в землю светильниками (в конце 1990-х годов эта практика получила широкое распространение в некоторых французских и иностранных городах).

В настоящее время высокие осветительные мачты предоставляют светодизайнерам единственную возможность освещения деревьев сверху вниз, с тем чтобы не тревожить животный мир. Для этого используются специальные прожекторы с СД источниками света, спектры которых подо-



Рис. 9. Парк *Flaubert Garden*, г. Гренобль, Франция (архитекторы-ландшафтоустроители: *Jacqueline Osty & Associates*; светодизайн: *Roger Narboni, CONCEPTO*)

браны с учётом необходимости сохранения разнообразия ночных форм жизни (рис. 9).

### 3.4. Цветные источники света

Цветные СД и регулируемые белые СД обеспечили возможность цветного или подкрашенного освещения всё большего количества общественных пространств, даже несмотря на ограниченность предлагаемого производителями в последние годы ассортимента цветов. Производители стремятся к созданию гибридных СД генераторов света, скомпонованных в соответствии с потребностью в смеси различных цветов, способной удовлетворить творческие запросы светодизайнеров.

Цветное статическое или динамическое освещение общественных пространств получает всё большее одобрение со стороны горожан, даже несмотря на то, что некоторые жители всё ещё противятся этому из-за ностальгии по древнему оранжевому освещению, которое они считают более романтичным, тогда как на самом деле это освещение обедняет освещённое ночное пространство из-за своего чрезвычайно низкого индекса цветопередачи (рис. 10).

Цветное освещение способно трансформировать пространство, создать особую атмосферу, вынудить горожан



Рис. 10. Культурный центр *Garden*, г. Сен-Ло, Франция (архитекторы: *Urbanica*; светодизайн: *Virginie Nicolas, CONCEPTO*)



Рис. 11. Портовый район, г. Пантен, Франция (архитекторы-ландшафтоустроители: *Jacqueline Osty & Associates*; светодизайн: *Roger Narboni, CONCEPTO*)

остановиться и по-иному посмотреть на местность, сад или статую.

С другой стороны, взаимодействие с прохожими, предоставление пешеходам возможности выбора цвета и цветовой атмосферы всё ещё не рассматриваются и не поощряются техническими службами городов.

### 3.5. Проецирование изображений или видеозаписей

Проецирование неподвижных изображений или видеозаписей на поверхность земли, объекты, деревья или фасады всё чаще включается в проекты освещения определённых общественных пространств. Надёжность и прочность светодиодных светильников наружного освещения, способных с высоким качеством проецировать на землю реалистичные или сугубо иллюстративные слайды, обеспечивают возможность реализации этих новых подходов, хотя производителям надо ещё поработать, чтобы предложить маленькие прожекторы, которые можно будет незаметно закреплять на мачтах или ближайших фасадах.

Проецирование света формирует мир ясно различных знаков, символов и графических изображений, которые успешно дополняют само освещение. Проецируемые изображения будоражат память, так как они вызывают зрительные эмоции, окутывают зрителей и погружают их в поэтическую световую среду или напоминают им о культурных ценностях, которые сам свет воссоздать не в состоянии (рис. 11).

Проецируемые изображения позволяют также структурировать участки земли или фасады посредством выбора плотности и расположения этих изображений. И наконец, имеется возможность регулярно изменять проецируемые изображения, тем самым существенно изменяя формируемое ночное пространство (рис. 12).

### 3.6. Текстура земной поверхности и преобразование световых эффектов

В последнее время светодизайнеры продемонстрировали в разработанных ими проектах освещения общественных пространств стремление к неоднородности и контрастности, а также желание формировать текстуры и преобразовывать световые эффекты, создаваемые СД на земле



Рис. 12. «Интерлюдия», г. Валансьен, Франция (светодизайн: *Roger Narboni* и *Fanny Guerard, CONCEPTO*)

и окружающих стенах, используя для этого специально разработанные светофильтры или преломлятели.

Пуантилистическую совокупность СД в прожекторах или светильниках, которую производители стараются сгладить для получения однородного светового луча и равномерного распределения освещённости, преднамеренно используют для воссоздания на освещаемой поверхности сетки из более или менее размытых световых точек или формирования подобия текстуры, очерчивая в результате освещаемое общественное пространство и формируя более необычную ночную картину (рис. 13). В некоторых случаях преломлятель может устанавливаться прямо на месте для фокусирования и расфокусирования света с целью получения требуемого светового эффекта. При использовании в одном устройстве разных СД (с разной тональностью белого света или имеющих разные цвета) расфокусирование позволяет сформировать удивительные смешанные текстуры и цветные графические изображения (рис. 14).

### 3.7. Специальные или заказные изделия

Технические новинки не обязательно соответствуют творческим пожеланиям светодизайнеров, которые хотят осветить общественные пространства. Так что часто имен-



Рис. 13. Площадь *Saint-Charles Church square*, г. Лиль, Франция (архитекторы-ландшафтоустроители: *Atelier Jours*; светодизайн: *ON*)





Рис. 14. Кампус *Paris Saclay campus*, Франция (архитектор-ландшафтоустроитель: *Michel Desvigne*; светодизайн: *Roger Narboni* и *Fanny Guerard*, *CONCEPTO*)

но светодизайнеры в соответствии с разрабатываемым проектом будут требовать создания новых технических устройств или побуждать изготовителей к разработке инновационных подходов, которые приведут к пополнению каталогов разнообразными устройствами или аксессуарами. Крупномасштабные проекты также часто требуют разработки светодизайнерами специальных изделий и «изготовления на заказ» существующих устройств.

В то же время, включение освещения и создаваемых им эффектов в уличную мебель, наружные конструкции или детали ландшафта, спроектированные архитекторами, архитекторами-ландшафтоустроителями или дизайнерами, стало более систематическим, что в каком-то смысле увеличило арсенал используемых для создания освещения инструментов, которые доступны светодизайнерам, и, тем самым, расширило разнообразие ночных сцен, создава-



Рис. 16. *Shakespeare's New Place*, г. Стратфорд-на-Эйвоне, Великобритания (художественные соруководители и содизайнеры: *Timothy O'Brien RDI* и *Chris Wise RDI*; светодизайн: *Speirs + Major*; фотография: *James Newton*)



Рис. 15. Парк *Queen Elizabeth Olympic Park*, г. Лондон, Великобритания (архитекторы: *Speirs + Major*, *MAKE*; архитекторы-ландшафтоустроители: *James Corner Field Operations*; светодизайн: *Michael Grubb Studio* (генеральный светодизайнер); фотография: *James Newton*)

емых для общественных пространств. Кроме того, компьютерное управление СД источниками света и создание сложных динамических сценариев также являются в настоящее время неотъемлемой частью работы светодизайнеров при разработке оригинальных проектов освещения общественных пространств (рис. 15, 16).

### 3.8. Светящиеся места для отдыха

Идея создания светящихся мест для отдыха, обусловленная желанием воссоздать уютную и приветливую атмосферу помещений в наружных общественных пространствах, первоначально сводилась к размещению более или менее декоративных опор для освещения пешеходных пространств около скамеек, тем самым изменяя ночной облик небольших ограниченных участков (рис. 17).

В конце концов, дизайнеры разработали реальное, более сложное и структурированное воспроизведение жилой комнаты, которое было реализовано в ряде больших общественных пространств для удовлетворения прохожих или для предоставления им возможности устроить перерыв в их дневном или ночном путешествии. При этом свет используется для обозначения места отдыха в ночное время и для того, чтобы выделить его ночной облик на фоне освещения окружающего его общественного пространства (посредством использования световых эффектов, типов освещения или других цветов).

В последнее время были разработаны модульные и трёхмерные специальные конструкции, служащие как для целей освещения и создания световых эффектов, так и для защиты от погоды в дневное и ночное время, а также для предоставления целого ряда дополнительных услуг, таких как зарядка смартфонов и ноутбуков, прослушивание музыки, предоставление прохожим возможности изменения создаваемого светом настроения и так далее.

Это новое поколение светящихся мест для отдыха позволило также создавать виртуальные световые объёмы и очерчивать трёхмерные ночное пространство и световую среду (рис. 18). Это только начало формирования более сложных взаимосвязанных интерактивных светящихся пространств, которые должны быть сформированы в городах будущего.



Рис. 17. Площадь у центрального вокзала, г. Пуатье, Франция (архитекторы: *Antoine Grumbach & Associates*; светодизайн: *Roger Narboni* и *Virginie Nicolas, CONCEPTO*; фотография: *Xavier Boymond*)

#### 4. ... и завтра

На протяжении уже нескольких лет в большинстве густонаселённых городов мира принят новый подход к градостроительству, предусматривающий уменьшение выделенного автомобилям пространства и скорости движения транспорта в городах и перераспределение общественного пространства в пользу общественного транспорта, мягких вариантов обеспечения мобильности и пешеходов. Эти значительные изменения городов должны побудить нас к революционному изменению своих представлений об освещении общественных пространств в городах.

Так что все связанные с освещением лица обоснованно ожидают развития и становления так называемого «умного» освещения. Помимо осуществляемой в реальном масштабе времени адаптации освещения общественных пространств в части его уровня и тональности к потребностям и присутствию потребителей, ожидаемое дистанционное управление (*television management*) светильниками и наличие сведений об оборудовании и энергопотреблении, а также наличие в общественном пространстве плотной сети «якорей» умного освещения, постепенно начнут играть главную роль в цифровизации городов.

Осветительные опоры также станут частью информационной сети (транспортной, экологической, климатической, туристической), основанной на использовании датчиков, световых сигналов и удобных для пользователей интерфейсов.

В сочетании с приложениями для смартфонов, сеть общественного освещения позволит предложить новые цифровые услуги: звуковую информацию, видеоматериалы, карту города, туристическую или коммерческую информацию, температуру и качество воздуха, плотность движения транспорта, наличие поблизости парковочных мест.



Рис. 18. *Extimity*<sup>1</sup>: освещение мест для отдыха (владельцы авторских прав: *Roger Narboni & Technilum*)

<sup>1</sup> Это термин введён автором для обозначения мебели, предназначенной для создания интимной обстановки на открытом воздухе. – Прим. пер.

СД генераторы света, используемые в светильниках для освещения общественных пространств, уже сейчас позволяют изменять по желанию тональность излучаемого света, что в ближайшем будущем трансформируется в более систематическое и обязательное сохранение биологического разнообразия ночных форм жизни. Это потребует от застройщиков использования СД с особыми спектрами излучения, приспособленными к имеющейся или ожидаемой фауне и флоре застраиваемого участка.

#### 5. Более отдалённое будущее

##### 5.1. Ночной город, предназначенный исключительно для его жителей

Планируемое уменьшение количества легковых автомобилей, а в более далёкой перспективе и их полное отсутствие, а также постепенное исчезновение дорог для них, приведёт к изменению дизайна общественных пространств, в результате чего пешеходы получают в своё распоряжение участки между фасадами, которые уже не придётся разлиновывать находящимися на равном расстоянии друг от друга опорами для освещения уже не используемых проезжих частей дорог. В результате города постепенно снова окажутся предназначенными исключительно для своих жителей, как это было до изобретения автомобиля.

Опоры для освещения общественных пространств, которые уже будут ненужными, должны будут превратиться в наборы модульных осветительных конструкций, способных создавать нематериальные световые объёмы и имеющие самые разные размеры многообразные ночные пространства.

Для обеспечения этих грядущих морфологических изменений общественных пространств, придётся изобрести другое – многофункциональное – освещение городов. Новые осветительные установки позволят освещать города по-другому, не только обеспечивая возможность хорошо видеть и перемещаться, как это было с момента зарождения освещения общественных пространств, но и обозначая «соблазны», места для отдыха, проходы и расширения,





Рис. 19. Переносные фонари, велосипедная дорожка *Chengdu Jincheng Greenway*, провинция Сычуань, Китай (светодизайн: *CONCEPTO* и *Winlux lighting*; авторские права на компьютерную визуализацию: *Floriane Deleglise, CONCEPTO*)

которые наверняка нарушат упорядоченность и прямолинейность сети опор освещения общественных пространств прежних лет.

Удовлетворяющие потребностям пользователей пространства и световые объёмы, в которых будет предусмотрена защита от погоды, также должны проектироваться с упором на обеспечение благополучия горожан (антистрессовая среда, формируемая с учётом биологических ритмов и обеспечения светотерапии, хромотерапии и темновой терапии) и возможности ведения диалогов при встречах в общественных пространствах. Эти пространства и объёмы обеспечат появление привлекательных в ночное время мест, нематериальных объёмов, способных трансформировать и формировать окружающую световую среду и зрительно взаимодействовать с окружающим пространством, высвечивая и нарезая его для увеличения вариантов использования как его самого, так и связанных с ним услуг.

Прохожим будет предоставлена возможность свободно выбирать привлекательную для них световую атмосферу из предлагаемых сочетаний параметров (освещённости, цвета, их последовательности, типов освещения, пространственного распределения света, световых эффектов, объёмов и так далее).

В длительной перспективе это будет реальной демократизацией освещения общественных пространств, которая будет предложена потребителям для установления контроля за окружающей их в ночное время световой средой и, в конечном итоге, для освобождения их от зависимости от техников и операторов, которые всегда выбирали, исследовали и проектировали функциональные характеристики освещения всех городов мира без каких-либо возражений или обсуждений гражданами.

## 5.2. Автономные источники света

Подобно тому, как сегодня прогулки со смартфонами стали привычными для горожан во всём мире, причём тридцать лет назад этих вошедших сейчас в обиход изделий ещё не было и их повсеместное использование началось в конце 1990-х годов, ночные города в будущем постепенно изменятся благодаря использованию автономных переносных фонарей, которые позволят потребителям

управлять окружающей их ночной средой в соответствии со своими потребностями и пожеланиями.

Действительно, даже несмотря на то, что смартфоны уже снабжены фонарями, позволяющими хорошо видеть в ночное время при отсутствии света, обеспечиваемое ими освещение можно считать примитивным и не позволяющим сформировать настоящую световую среду (рис. 19). И налобные фонари, используемые для перемещения в темноте (особенно любителями бега трусцой и ночными туристами), также являются чрезвычайно простыми и недружественными, так как они ослепляют прохожих.

Создание автономных перезаряжаемых переносных источников света, их добровольное объединение в общую сеть позволит прохожим преобразовать коллективное световое пространство или даже освещать по мере необходимости архитектурные детали или части ландшафта. Эти автономные переносные фонари можно уподобить современным экономичным велосипедам, самокатам или электромобилям, которые могут быть временно арендованы кем угодно.

Освещение улиц уже не будет исключительно муниципальным – оно станет общей заботой и сможет работать только в присутствии потребителей.

## 5.3. Аксессуары и светящаяся одежда

Излучающая свет одежда и светящиеся аксессуары, встроенные, например, в обувь, роликовые коньки или скейтборды, которые появились благодаря совершенствованию, миниатюризации и автономности СД и аккумуляторов, подчёркивают индивидуальность одержимых новшествами горожан и предоставляют им первые шансы на ночную автономию (рис. 20).

Эти «доспехи» будут совершенствоваться, с тем чтобы снабдить любителей ночных прогулок светящимися ювелирными изделиями, украшениями и деталями одежды, делающими их заметными в тёмных общественных пространствах городов, парках или природных зонах с очень низкими уровнями освещения и генерирующими мягкий рассеянный свет для освещения их личного пространства (рис. 21).

Появившиеся в последнее время гражданские беспилотные летательные аппараты (дроны) с дистанционным управлением или программируемые, и первые попытки их использования в качестве носителей осветительных прибо-



Рис. 20. Персональные ореолы, 2053 г. Выставка «Освещение городов будущего» (куратор: *Roger Narboni*; авторские права на компьютерную визуализацию: *Noémie Riou, CONCEPTO*)

ров, позволяют предсказать будущее, в котором создание световой среды, освещение общественных пространств, ландшафтов и архитектурных достопримечательностей можно будет сделать трёхмерным, осуществляемым со всех сторон, а не только с земли или низких мачт. Эти новые летающие источники света быстро войдут в набор инструментов светодизайнеров (уже сегодня они позволяют создавать сценическое и ориентированное на конкретные события освещение) для расширения возможностей, предлагаемых людям, ведущим ночной образ жизни.

Так что легко себе представить, что в будущем первоначальная задача освещения общественных пространств, заключающаяся в обеспечении возможности видеть и быть увиденными, постепенно вступит в противоречие с представляемой горожанам свободой выбора того, где и как окружающее их пространство должно и может освещаться в ночное время.

Это революционное преобразование освещения городов в активное сможет проложить дорогу переоценке важности темноты для городов и экспериментам по её использованию.

#### 5.4. Фосфоресценция и биолюминесценция

Исследования в области фосфоресцирующих материалов, которые можно использовать в наземных композициях, перспективные исследования в области управляемого применения генетически изменённых биолюминесцентных бактерий, углублённое понимание биолюминесценции некоторых растений и животных предвещают новую революцию в области не потребляющего энергию освещения городов, которое автоматически найдёт своё применение в новых городских условиях.

Эти источники света будущего, свойства и потенциальные возможности которых сегодня даже нельзя себе представить, приведут к формированию новых ночных ландшафтов, природных или городских, полностью соответствующих как окружающей среде, так и новой необратимой тенденции к восстановлению природного состояния городов (рис. 22).

#### 5.5. Появление светящихся архитектурных сооружений

С момента зарождения в средние века освещения общественных пространств, эти пространства, то есть пустоты в структуре городов, всегда, а особенно вначале, освещались фонарями, закреплёнными на фасадах близлежащих зданий.

Рис. 21. Силуэт, 2053 г. Выставка «Освещение городов будущего» (куратор: Roger Narboni; авторские права на компьютерную визуализацию: Loeiza Cabaret, CONCEPTO)



Исторические или современные строения (окружающие пустоты «плотные» элементы городов) иногда освещаются, а иногда и украшаются огнями или светящимися вывесками и рекламой, но эти привязанные к зданиям осветительные установки почти никогда не участвуют в освещении общественных пространств, в том числе и близких к пешеходам нижних уровней городов. Освещение общественных пространств, а также предъявляемые к ним нормативные требования, оказываются никак не связанными с не подчиняющимся никаким правилам освещением окружающих эти общественные пространства строений.

Изменения морфологии городов, которые можно ожидать в будущем, формирование новых связей между частным и общественным секторами, изменение роли, которую в настоящее время играют фасады зданий, появление новых направлений в архитектуре, которые всё чаще будут включать в себя строения, расположенные в пределах общественных пространств, приведут к неизбежному исчезновению загромождающих улицы осветительных опор, на смену которым придут излучающие свет поверхности и светящиеся материалы, закреплённые на стенах или не-

Рис. 22. Биолюминесценция, 2053 г. Выставка «Освещение городов будущего» (куратор: Roger Narboni; авторские права на компьютерную визуализацию: Noémie Riou, CONCEPTO)







Рис. 23. Ориентированная на темноту инфраструктура г. Лилля, Франция (светодизайн: Roger Narboni, CONCEPTO; авторские права на компьютерную визуализацию: Loeiza Cabaret, CONCEPTO)

посредственно встроенные в фасады, конструкции, элементы инфраструктуры, полы и т.д. и предназначенные для освещения прилегающих общественных пространств, но при этом не обязательно занимающие эти пространства.

Строительные материалы, из которых изготавливаются наземные покрытия и фасады, будут светиться в ночное время, обеспечивая новое восприятие ночного пространства.

Появление светящихся материалов для полов и стен существенно изменит облик архитектурных сооружений. Связь между архитектурными сооружениями, городскими пространствами и освещением всегда рассматривалась только применительно к естественному освещению. Архитектурные сооружения больше не будут возводиться исключительно с учётом положения солнца (и возможного влияния естественного освещения), как это делается в настоящее время – их станут строить с учётом их потенциального участия в ночном освещении прилегающих общественных пространств, что приведёт к неизбежному переходу от освещённых городов к светящимся городам.

Эти находящиеся на стадии становления светящиеся города в конце концов изменят отношение горожан к общественным пространствам: горожане привыкнут к тесному общению со светящимся общественным транспортом и к пешеходам, одетым в светящиеся костюмы или несущим свои собственные источники света.

## 5.6. Возврат темноты и власть над ней

С начала 2010-х годов осуществлялась разработка новой стратегии освещения, совмещённая с изучением и созданием ориентированной на темноту инфраструктуры. При этом преследуются цели сокращения энергопотребления с одной стороны и уменьшения светового загрязнения и максимального сохранения разнообразия ночных форм жизни с другой стороны (рис. 23).

Именно поэтому зародились планы сохранения темноты, которые могут быть распространены на весь город или на большую территорию в дополнение к «зелёной» и «синей» инфраструктурам.

Этот субтрактивный, ориентированный на создание темноты, подход вначале ограничивался теоретическими исследованиями того, какую роль соотношение между

освещением общественных пространств и темнотой может и должно играть в городе. Основанием для проведения подобных исследований послужили требования жителей, ясно выраженные во время проведения семинаров и ночных маршей, высказываемые ими мнения о чрезмерности освещения городов и их стремление сохранить тёмные участки, особенно в больших природных зонах.

Формирование этой ориентированной на темноту инфраструктуры предусматривает отождествление и очерчивание в пространстве и во времени тёмных участков, связей между ними и их пересечений. После утверждения выборными представителями, полученные результаты можно будет использовать во всех проектах по развитию участков, расположенных в пределах больших природных зон или рядом с ними, с тем чтобы осуществить заветные мечты о защите привычного разнообразия ночных форм жизни от воздействия светового загрязнения.

Если темнота уже не будет постоянно отождествляться с иррациональным страхом или ощущением незащищённости, то можно создать новые сценарии градостроительства, соответствующие потребности в энергоэкономичности городов, глобальному стремлению к предотвращению климатических изменений и к уменьшению загрязнения воздуха. Эти сценарии приведут к возвращению ночей в города и изобретению новых способов освещения, которые с уважением относились бы к темноте.

Создание экологической сети (*environmental mesh*), зелёных поясов вокруг основных метрополий, сыграет главную роль в изменении ночных ландшафтов в городах и вокруг них. Постепенно расширятся тёмные зоны, содержащие в себе чётко очерченные островки света, образованные мегаполисами. Эти новые тёмные территории позволят глазам людей развить и вновь открыть возможности ночного зрения, что будет способствовать психологическому и физиологическому привыканию горожан к прогулкам тёмными ночами.

Постепенный отказ от систематического, непрерывного и повсеместного освещения общественных пространств откроет дорогу к познанию ночи и новым терапевтическим методам, основанным на удовольствии от пребывания и движения в полной темноте.

После окончательного изменения освещения общественных пространств, ночь, на которую всегда приходилось 50 % городского времени, окажется особой территорией, которую надо будет освоить для обеспечения лучшего соответствия изменениям как самих городов, так и образа жизни горожан, которые наверняка удивят нас в не столь отдалённом будущем.



**Роже Нарбони (Roger Narboni).** Всемирно известный французский светодизайнер, художник по свету и инженер-электронщик. Президент студии CONCEPTO, которая была основана в 1988 г. Разработал и претворил в жизнь более двухсот проектов освещения ландшафтов, городов, исторических памятников и архитектурных сооружений. В 1987 г. Р. Нарбони создал новое научное направление, получившее название «Световой урбанизм». С тех пор он реализовал во Франции и других странах более 140 мастер-планов освещения

# Энергосберегающая система освещения светодиодами с параллельным электропитанием от фотоэлектрических модулей и от электросети

П.В. ТИХОНОВ

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФНАЦ ВИМ), Москва  
E-mail: ptikhonov@inbox.ru

## Аннотация

Проанализировано современное состояние систем освещения светодиодами с параллельным электропитанием от фотоэлектрических модулей и от централизованной электросети. Представлен подход к реализации параллельной работы светильника со светодиодами от двух источников питания, который отличается простотой, низкой стоимостью и высокой надёжностью сравнительно с имеющимися решениями. На основе этого подхода разработаны четыре схемы, применимые сообразно задачам освещения и характеристикам фотоэлектрических модулей и потребителей электроэнергии. Первая и вторая схемы содержат минимальное количество преобразователей, но при их использовании необходимо учитывать ряд эксплуатационных ограничений. Третья схема содержит стандартные преобразователи и предполагает минимум разных ограничений, что делает её оптимальным решением для разрабатываемой системы освещения малой мощности. Четвёртая схема имеет высокую стоимость, из-за использования оборудования с автоматическим поиском точки максимальной мощности солнечных панелей в реальном времени (технология «ММРТ»), обеспечивает мак-

симально большую энергоэффективность систем освещения, но преимущества технологии «ММРТ» касаются только систем высокой мощности.

В качестве потребителей таких систем предпочтительней всего объекты, где освещение в основном требуется днём (торговые центры, подземные переходы, складские комплексы, птицефабрики и т.п.). Положительной стороной является повышение надёжности электроснабжения потребителей, поскольку питание светильников со светодиодами будет также происходить от дополнительного источника.

Предложенный подход ведёт к снижению расхода электросетевой энергии на освещение светодиодами, сбережению ископаемых источников энергии и, соответственно, экологизации окружающей среды.

**Ключевые слова:** солнечное излучение, фотоэлектрический модуль, микросеть постоянного тока, стабилизатор напряжения, стабилизатор тока, параллельная работа, освещение светодиодами.

## Введение

Сфера использования фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) непрерывно растёт. Широкому внедрению фотоэлектрических систем

в основном способствует снижение стоимости ФЭП [1–3] и рост тарифов на электроэнергию, вырабатываемую с использованием традиционных источников энергии. На развитие фотоэнергетики влияют и экологические проблемы [3, 4], и развитие энергоэффективной электроники и осветительных устройств на постоянном токе.

Использование фотоэлектрических модулей (ФЭМ) как источников электроэнергии позволяет подключать потребителей постоянного тока напрямую без помощи инвертора, создавая микросеть на постоянном токе. Данная концепция в мире актуальна, постоянно исследуется [5–7], и соответствующие технологии будут набирать популярность и повсеместно внедряться по мере снижения стоимости фотоэлектрической энергии.

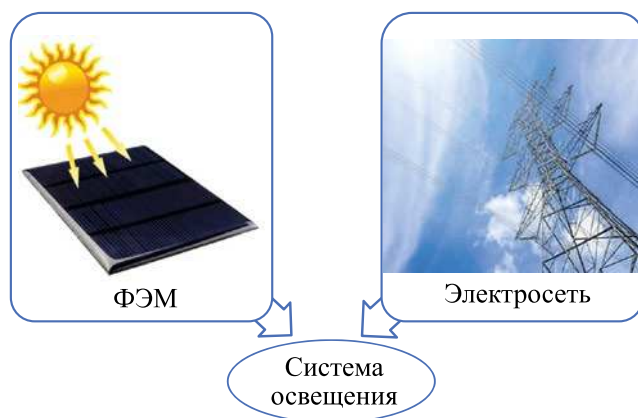
В наших домах и офисах множество устройств работает на постоянном токе. Значительная часть бытовых устройств, офисной техники и прочего электрооборудования, питаемая от сети переменного тока, работает на постоянном токе благодаря встроенным преобразователям энергии. Технически эти устройства способны напрямую работать на постоянном токе, но такую возможность производители не закладывают. В настоящее время редко встречаются устройства способные работать одновременно от сети переменного тока, и от сети постоянного тока, но при наблюдаемой тенденции таких устройств будет становиться всё больше. Важно, что с технической точки зрения это не приведёт к существенному усложнению устройств и их удорожанию. При этом они будут работать в смешанных сетях постоянного и переменного тока [8].

С учётом описанных выше обстоятельств и тенденций, фотоэлектрические системы, питающие нагрузку на постоянном токе, помогут снизить расходы потребителя на получаемую от электросетевых компаний электроэнергию. Одним из ярких примеров такого рода служит система освещения светильниками со светодиодами (СД) с параллельным электроснабжением от ФЭП и от электросети общего назначения (рис. 1).

## Методы

Возможны разные методы согласования параллельной работы системы освещения, запитанной ФЭМ и элек-

Рис. 1. Система освещения с параллельным электропитанием от двух источников





тросетью. К примеру, одна из разработок включает в себя суперконденсаторы и реле для переключения между источниками энергии [9]. При таком подходе большая нагрузка накладывается на реле – из-за частых переключений их рабочий цикл будет коротким и потребует частых замен элемента. Кроме того, переходные процессы, возникающие при резком и частом переключении, будут ухудшать качество электроэнергии. Другая разработка заключается в применении специального устройства управления («драйвера»), согласующего параллельную работу СД источников от сети и от ФЭМ посредством высокочастотного трансформатора [10]. Это устройство работает и как инвертор, выдавая излишнюю энергию в сеть. Однако качество выдаваемой им в сеть энергии не соответствует нормативам. У двух отмеченных выше систем есть один общий минус – их сложность и дороговизна.

В настоящей работе предлагается иной подход к организации параллельной работы СД источников, который существенно отличается от аналогичных решений простотой и меньшей стоимостью. Он заключается в согласовании двух параллельных источников питания по уровню напряжения (рис. 2).

При таком подключении важно, чтобы номинальное напряжение ФЭМ было выше выходного номинального напряжения сетевого блока питания AC-DC. Тогда вся энергия будет расходоваться на светильнике при достаточной выработке мощности ФЭМ. В моменты, когда выработки ФЭМ будет недостаточно для питания светильника, недостаток фотоэлектрической энергии будет компенсироваться сетевым блоком питания. Недостаток фотоэлектрической энергии приведёт к уменьшению напряжения на входе стабилизатора тока Стаб. I (рис. 2) светильника, и в этот момент сетевой блок питания стабилизирует напряжение на входе этого стабилизатора, компенсируя недостаток мощности. Стабилизатор тока в данной схеме необходим для стабилизации работы СД источника света. В случае если последний имеет встроенный стабилизатор тока, то в схеме его уже не будет.

Предложенная выше схема является основополагающей, на её основе разработано ещё несколько вариантов, в основном отличающихся преимущественно дополнительными элементами

Рис. 2. Схема принципиальная системы освещения с комбинированным электропитанием

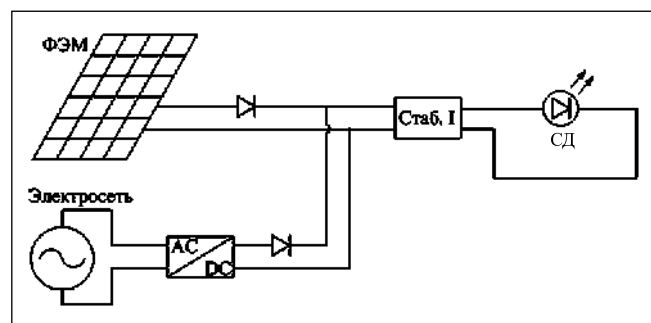
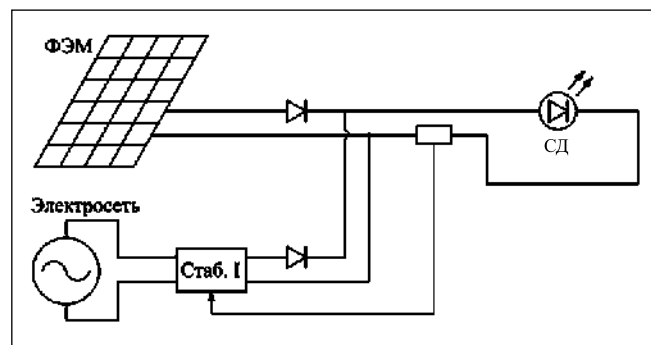


Рис. 3. Схема принципиальная системы освещения с комбинированным электропитанием и модернизированным сетевым стабилизатором тока



или модернизацией некоторых элементов. Один из вариантов представлен на рис. 3. Суть его – в разделении сетевого стабилизатора тока и его измерительного блока. При этом измерительный блок сетевого стабилизатора тока располагается на входе светильника после точки соединения двух источников энергии. Сетевой преобразователь, контролируя ток светильника, компенсирует недостающую мощность от ФЭМ (по мере необходимости).

Вариант максимально похож на стандартный для освещения светильниками с СД, работающими от электросети; отличия лишь в добавлении ещё одного источника энергии и изменении конструкции стабилизатора тока. Поэтому это один из самых бюджетных вариантов подключения ФЭМ к традиционной схеме питания светильников с СД.

В поиске компромиссов для светильников с СД небольшой мощности разработан вариант с широкими возможностями применения. Он заключается в использовании повышающих и понижающих преобразователей со стабилизаторами напряжения и тока (рис. 4). При этом в схеме для отбора энергии, вырабатываемой ФЭМ, применён обычный преобразователь-стабилизатор напряжения DC-DC.

Для систем освещения большой мощности необходимо использование технологии «слежения за точкой максимальной мощности» (*Maximum Power Point Tracking, MPPT*), схема

питания подобной системы отражена на рис. 5. Технология «MPPT» позволяет добиваться большего отвода мощности от ФЭМ. При этом существуют разного рода разработки «следящих» устройств (*MPPT-контроллеров*) для осветительных систем с СД [11, 12].

## Результаты

Представленные выше схемные варианты имеют свои преимущества и недостатки. Рассмотрим их подробнее.

Вариант с непосредственным параллельным подключением ФЭМ с сетевым блоком питания (рис. 2) имеет ряд недостатков, связанных с невозможностью обеспечения максимального отвода мощности от ФЭМ и необходимостью подбора выдаваемого им напряжения. Схема эффективна только при правильно подобранных характеристиках элементов.

Во втором варианте, с модернизированным стабилизатором тока (рис. 3), требуется минимальное количество элементов для функционирования системы. Но при этом, чтобы СД не перегорали, пиковая мощность ФЭМ не должна превышать рабочую мощность СД. Возможно применение также специального ограничителя по мощности выработки ФЭМ. Как и в предыдущем варианте схемы, важен подбор ФЭМ по напряжению – номинальное напряжение долж-

Рис. 4. Схема принципиальная системы освещения с комбинированным электропитанием и применением повышающего-понижающего преобразователя

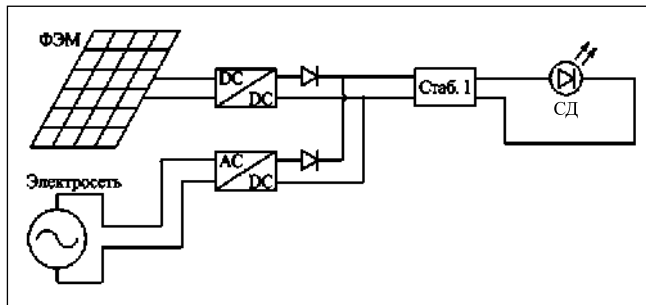
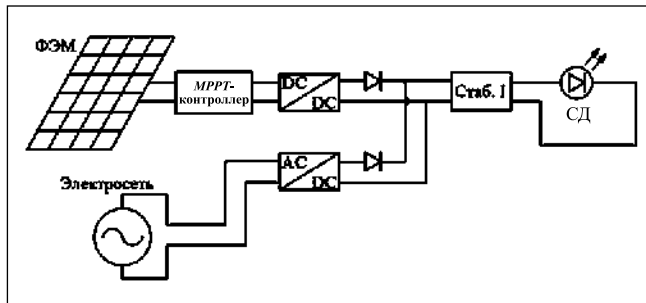


Рис. 5. Схема принципиальная системы освещения с комбинированным электропитанием и применением ММРТ-контроллера



но быть примерно равно рабочему напряжению на светильнике.

Сравнив два приведённых выше варианта, отметим, что первый из них предпочтительней при мощности ФЭМ, сопоставимой с мощностью светильника, а второй – при мощности ФЭМ, меньшей мощности светильника.

Третий вариант предпочтителен для осветительных систем небольшой мощности. Его преимущества в том, что благодаря применению стабилизаторов нет строгой необходимости в подборе напряжений ФЭМ и на нагрузке как в первых двух вариантах. Стабилизатор напряжения на выходе из ФЭМ работает в широком диапазоне входного напряжения и повышает отбор мощности от фотопреобразователей в сравнении с первыми двумя вариантами, а стабилизатор тока на входе светильника защищает СД в нём от перегорания. Дополнительное преимущество такой схемы – возможность создания микросети постоянного тока, в которую могут внедряться новые источники и потребители электроэнергии.

Последний схемный вариант, с применением технологии «ММРТ» (рис. 5), являясь самым энергоэффективным, из-за дороговизны требует добавочной оценки экономичности конкретного применения. Преимущества этой технологии в основном проявляются на системах освещения большой мощности. Для маломощных систем выгоднее повышать мощность фотоэлектрической части за счёт до-

полнительных фотопреобразователей, чем повышать её с помощью ММРТ-контроллера.

Для дальнейшего развития перспективен является вариант специально разработанного контроллера под параллельную работу с ФЭМ и электросетью, в котором будут интегрированы преобразователь напряжения DC-DC с технологией «ММРТ» и сетевой блок питания AC-DC.

Задачи по оптимальному подбору оборудования и сравнению разных вариантов схем целесообразнее решать с использованием специальных средств математического моделирования, типа «MATLAB-Simulink» и др. Поэтому в последующих исследованиях по данной тематике работа схем будет рассмотрена детально с использованием этих средств.

Особое внимание следует обратить на отсутствие аккумуляторной батареи в схемах питания, что позволяет разрабатывать конкурентоспособные по стоимости осветительные системы с СД, поскольку аккумуляторные батареи существенно повышали бы стоимость вырабатываемой энергии. И даже использование оптимальных на сегодня по стоимости цикла заряда-разряда литий-железо-фосфатных аккумуляторов существенного снижения себестоимости не даст. Однако же, например, в сетях аварийного освещения со светильниками с СД применение аккумуляторных батарей необходимо и оправдано. Возможны также случаи, в которых для достижения высоких характеристик целе-

сообразно применение аккумуляторных батарей небольшой ёмкости, но для этого необходимо решение оптимизационных задач с учётом определённых критериев. Однако, в любых случаях мощности аккумуляторных батарей в освещении сведутся к минимуму, что связано с их неспособностью конкурировать по себестоимости электроэнергии с непосредственно ФЭМ и электросетью.

## Заключение

Развитие ФЭП и осветительных установок со светильниками с СД приводит к большому количеству разработок на их основе, но большинство таких установок имеют автономный характер с аккумулярованием энергии в течение дня [13]. Для их удешевления необходимо сводить к минимуму ёмкости аккумуляторных батарей, а в качестве гарантированного источника питания использовать электросети общего назначения. Такой подход и внедряется в разрабатываемых светильниках с СД с параллельным электропитанием от ФЭМ и от электросети, что снижает потребление электроэнергии от сети общего назначения и потери на преобразование.

Кроме того, в сложных схемах питания зачастую заложен широкий функционал, но их дороговизна влечёт немало финансовых затрат. В этой связи важную роль играет создание простых решений, в чём-то ограниченных по функционалу, но решающих основные возложенные на них задачи с выигрышем для потребителя в цене и надёжности. Поэтому разработаны разные варианты рабочих схем питания, которые применимы в зависимости от стоящих задач и особенностей ФЭМ и потребителей электроэнергии.

При этом необходимо грамотно подходить к выбору нагрузки, наиболее оптимальными представляются здания с помещениями, где искусственное освещение требуется весь рабочий день. Как пример, отметим торговые центры, подземные переходы, складские комплексы и птицефабрики. Для таких ответственных потребителей немаловажную роль играет и надёжность электроснабжения, которую питание светильников с СД от двух или трёх источников энергии (в зависимости от категории электропитания потребителя) повышает.



Как отмечено выше, снижение цены на ФЭП за последние годы существенно повысило их конкурентоспособность относительно других видов источников энергии [1–3]. В этой связи в стране появляется большое количество солнечных электростанций, работающих непосредственно на электросеть [14]. На сегодня в некоторых регионах для предприятий себестоимость электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями, способна конкурировать с ценой энергии от электросети. Соответственно, в ряде случаев уже сегодня подобные системы электропитания позволяют снижать потребление энергии от электросети, помогая потребителю экономить на счетах за электроэнергию и внося свой вклад в повышение экологичности окружающей среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Market Outlook For Solar Power 2019–2023 / Aurélie Beauvais, Naomi Chevillard, Mariano Guillén Paredes, Máté Heisz, Raffaele Rossi, Michael Schmela. – Belgium, Brussels: SolarPower Europe, 2019. – 91 p. URL: <https://www.solarpowereurope.org> (дата обращения: 09.09.19).
2. Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien / Christoph Kost, Shivenes Shammugam, Verena Jülch, Huyen-Tran Nguyen, Thomas Schlegl. – Deutschland, Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2018. – 41 p. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de> (дата обращения: 09.09.19).
3. Renewables 2018 global status report / Hannah E. Murdock, Rana Adib [et al.] – France, Paris: REN21, 2018. – 324 p. – ISBN978–3–9818911–3–3 –URL: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/GSR\\_2018\\_Highlights\\_final.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/GSR_2018_Highlights_final.pdf) (дата обращения: 09.09.19).
4. Advancing the Global Renewable Energy Transition / Hannah E. Murdock, Rana Adib [et al.] – France, Paris: REN21, 2018. – 51 p. – ISBN978–3–9818911–2–6 –URL: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/GSR\\_2018\\_Highlights\\_final.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/GSR_2018_Highlights_final.pdf) (дата обращения: 09.09.19).
5. Wang B., Sechilariu M., Locment F. Intelligent DC microgrid with smart grid communications: control strategy consideration and design // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2012. – 3(4) – P. 2148–2156. DOI: 10.1109/TSG.2012.2217764.
6. Dragičević T., Lu X., Vasquez J.C., Guerrero J.M. DC Microgrids-Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. – 31(7). – P. 4876–4891. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2478859.
7. Dragičević T., Lu X., Vasquez J.C., Guerrero J.M. DC Microgrids-Part II: A Review of Power Architectures, Applications and Stand-

ardization Issues // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2016. – 31(5) – P. 3528–3549. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2464277.

8. Justo J.J., Mwasilu F., Lee J., Jung J.W. AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 24. – P. 387–405. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.067.

9. De Zoysa H.B.H., Guruge P.A., Kalingamudali S.R.D., Kularatna N., Kanishka G. Designing and Constructing a DC Microgrid with Uninterrupted Power Supply Capability and Optimizing its Energy Usage by Smart Controlling System // IEEE Industrial-Electronics-Society (IES) International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES). – New Zealand, Hamilton: IEEE. – 2018. – P. 351–356.

10. Ali A., Lange J., Elrayyah A., Sozer Y., De Abreu-Garcia J.A., Mpanda A.A. Hybrid Flyback LED Driver with Utility Grid and Renewable Energy Interface / 33rd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. – USA, TX, San Antonio: IEEE. – 2018. – P. 3377–3384.

11. Vieira J.A.B., Mota A.M. Implementation of a Stand-Alone Photovoltaic Lighting System with MPPT Battery Charging and LED Current Control // IEEE International Conference on Control Applications Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control. – Japan, Yokohama: IEEE. – 2010. – P. 185–190.

12. Shen C.L., Ko Y.X. Hybrid-input power supply with PFC (power factor corrector) and MPPT (maximum power point tracking) features for battery charging and HB-LED driving // Energy – Elsevier Ltd. – 2014. – Vol. 72 – P. 501–509. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.072.

13. Pandey A.K., Tyagi V.V., Selvaraj J.A.L., Rahim N.A., Tyagi S.K. Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications // Renewable & Sustainable Energy Reviews – Elsevier Ltd. – 2016. – Vol. 53 – P. 859–884. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.043.

14. Солнечные электростанции на территории России: реалии и перспективы // Альтернативная энергия: [сайт]. – 2019. URL: <https://altenergiya.ru/sun/solnechnye-elektrostantsii-v-rossii.html> (дата обращения: 09.09.19).



**Тихонов Павел Валентинович**, кандидат техн. наук. Окончил в 2008 г. Марийский государственный университет (МарГУ) по специальности «Электроснабжение». Старший науч-

ный сотрудник ФНАЦ ВИМ. Область научных интересов: системы энергоснабжения на основе фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и когенерационных фотоэлектрических тепловых модулей, микросети на базе ФЭМ

## Более трети электричества в мире поступает из возобновляемых источников

Более трети электричества в мире поступает из возобновляемых источников – это новый рекордный показатель. Об этом говорится в отчете аналитиков из организации *International Renewable Energy Agency*.

В период с 2018 по 2019 годы строительство новых мощностей возобновляемой энергии несколько замедлилось. Но так как разные страны построили меньше новой инфраструктуры для добычи ископаемого топлива, доля возобновляемых источников энергии в расширении энергетического потенциала возросла.

По данным аналитиков, 72 % всех введенных в эксплуатацию в 2019 г. источников энергии



были возобновляемыми. Большая часть этого роста пришлось на Азию – 54 % прироста мощности возобновляемых источников энергии. При этом в США и Европе за этот период закрылось больше электростанций, работающих на ископаемом топливе, чем открылось.

Исследователи отмечают, что хотя США и страны Европы закрывают угольные и нефтегазовые предприятия, это не лучший вариант для регионов, которым требуется больше энергии, чтобы гарантировать, что все люди смогут удовлетворять свои основные потребности. Например, Африка, самый бедный континент в мире, увеличила свои возобновляемые мощности в прошлом году всего на 4 %.

[nanonewsnet.ru/new](http://nanonewsnet.ru/new)  
09.04.2020



BL  
Group



Международная  
светотехническая  
корпорация



БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП



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



# СВЕТЛЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УМНОГО ГОРОДА



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

# Новая стратегия преобразования традиционного дорожного освещения в умное<sup>1</sup>

М.Е. ГЮРСОЙ, Б. ДИНДАР, О. ГЮЛЬ

Стамбульский технический университет, Стамбул, Турция

E-mail: mustafaeyyupgursoy@gmail.com, burakdindar@itu.edu.tr, gulomer@itu.edu.tr

## Аннотация

В последние годы наблюдалось быстрое увеличение количества исследований в области проектирования и применения умного дорожного освещения (УДО). Однако применение УДО всё ещё остаётся на стадии демонстрационных проектов и не получает достаточно широкого распространения. Основная причина этого заключается в том, что хотя стоимость светильников с СД и уменьшилась, при переводе существующего дорожного освещения на светильники с СД нельзя использовать существующие электроустановки и опоры. Капитальные затраты, связанные с модернизацией существующих электроустановок и опор, уменьшают заинтересованность в переходе на УДО. В данной работе был в первую очередь сконструирован новый светильник с СД, который может работать без изменения существующих электроустановок и опор. Затем в программе *Dialux* была создана контрольная дорога, применительно к которой было проведено сравнение осветительной установки с новыми светильниками и традиционной установкой дорожного освещения. Предложенный вариант дешёвого УДО может способствовать интенсификации перехода на УДО.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, светильник с СД, освещение, проектирование дорожного освещения, умное дорожное освещение.

## 1. Введение

В настоящее время коммуникационные возможности различных устройств увеличиваются по мере технического прогресса. В этой связи проводятся многочисленные исследования и разрабатываются разные концепции, одной из которых является

Индустрия 4.0 (*Industry 4.0*). В рамках Индустрии 4.0 стало возможным создание более быстрой сети объектов, получившей название Интернет вещей (*Internet of Things*), в которой физические объекты согласованы друг с другом или с более обширными системами [1]. Так что объекты, которыми ранее управляли люди, сейчас могут связываться друг с другом при помощи программного обеспечения и оборудования, включая алгоритмы, искусственный интеллект и беспроводные средства связи, которые и решают, как эта система работает.

Переменные, которые люди могут упустить по небрежности, эффективно учитываются, так как в Интернете вещей механизм принятия решений работает без участия людей [2]. Все эти технические разработки были внедрены и в дорожное освещение. В установках умного дорожного освещения (УДО) внешние параметры измеряются фотокамерами и датчиками. Для получения нужных данных результаты измерений обрабатываются при помощи алгоритмов [3]. Эти данные передаются в сеть при помощи беспроводных средств связи. Управление осуществляется в результате обработки данных в центральных узлах управления. Таким образом формируются установки УДО, не требующие участия людей и обеспечивающие значительное увеличение эффективности дорожного освещения.

Для преобразования существующих традиционных установок дорожного освещения в умные, необходимо дополнить существующие установки датчиками и сформировать коммуникационные сети, а также заменить существующие светильники на регулируемые. Натриевые лампы высокого давления (НЛВД), которые используются в традиционных установках дорожного освещения, регулировать трудно, а уровни их светорегулирования незначительны. Частое измене-

ние яркости НЛВД приводит к уменьшению их сроков службы. Время их включения и выключения также велико. СД лампы быстро переключаются из одного режима работы в другой, их яркости можно регулировать точно и с большой лёгкостью, а время их включения и выключения очень мало [4]. Кроме того, светильники с СД генерируют меньше гармоник, чем светильники с НЛВД [5]. Благодаря этим своим особенностям, в установках УДО СД являются более предпочтительными, чем НЛВД.

Традиционные установки дорожного освещения не обеспечивают освещение, отвечающее потребностям изменяющихся дорожных и погодных условий [6]. Многие важные для дорожного освещения параметры, такие как интенсивность и скорость дорожного движения, изменяются мгновенно. Так что как безопасность водителей и их комфорт, так и энергоэффективность осветительных установок вовсе не идеальные. Хорошо спроектированное дорожное освещение обеспечивает экономии энергии, времени, труда и затрат [7]. Капитальные затраты на УДО велики, что обусловлено потребностью в дополнительной оборудовании [8, 9]. Ещё одной важной причиной увеличения капитальных затрат является необходимость изменения используемых в существующих установках дорожного освещения шага между опорами и высоты опор, так как без этого светильники с СД не могут обеспечивать эффективное освещение. При изменении шага между опорами дорожного освещения необходимо заменить всю электрическую установку, а изменение высоты опор приводит к необходимости использования новых опор. Всё это существенно увеличивает стоимость УДО. Поэтому трудно ожидать широкого распространения УДО и их одобрения принимающими решения лицами, особенно в развивающихся странах, таких, как Турция, где капиталовложения осуществляются при дефиците ресурсов. В противовес капитальным затратам, можно ожидать уменьшения эксплуатационных расходов благодаря высокой энергоэффективности УДО. На энергоэффективность УДО влияют два основных фактора. Во-первых, это использование СД вместо НЛВД. СД имеют гораздо большую эффективность, чем НЛВД, которые используются в тради-

<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского



ционных установках дорожного освещения, так что установки с СД потребляют значительно меньше энергии. Во-вторых, при использовании светильников с СД можно обеспечить эффективное светорегулирование. Ещё одним важным следствием перехода на СД является уменьшение выбросов  $CO_2$ . В исследовании, проведенном в Саудовской Аравии, было показано, что если для выработки энергии, расходуемой на освещение, использовать нефть и нефтепродукты, то выбросы  $CO_2$  оказываются на 900 % больше, чем при использовании возобновляемых источников энергии [10].

Учитывая обеспечиваемые УДО преимущества, такие как уменьшение энергопотребления и выбросов  $CO_2$ , а также увеличение комфорта для водителей, можно прийти к выводу, что УДО следует быстро развивать. В данном исследовании предлагаются варианты уменьшения затрат, позволяющие ускорить переход на УДО, которое при этом реализуется посредством замены светильников с НЛВД на светильники с СД без изменения существующих электрических систем и опор. В результате уменьшаются капитальные затраты. С этой целью был разработан светильник с СД, предназначенный для установки на существующих опорах. Проведено исследование связи между геометрией опор и кривыми силы света разработанных светильников. В программе *Dialux* была создана контрольная дорога, применительно к которой и были проверены разработанные решения. Предложенное решение было сопоставлено с традиционным дорожным освещением и с ситуацией, в которой была реконструирована вся осветительная установка.

## 2. Умное дорожное освещение

Разработка УДО осуществляется с учётом двух важных условий. Первое условие состоит в том, что дорожное освещение должно удовлетворять рекомендациям и нормам, принятым и применяемым во всём мире. Второе условие предполагает обеспечение взаимосвязи между оборудованием, используемым в установках дорожного освещения. В данной работе проектирование дорожного освещения осуществляется с использованием рекомендаций Международной комиссии по освеще-

нию (МКО) и протокола беспроводной связи *Zigbee* [11, 12].

Согласно международным стандартам и рекомендациям, наиболее важным для УДО параметром является яркость поверхности дороги. В техническом отчёте МКО *CIE140–2000* подробно описаны все параметры, позволяющие обеспечить требуемую яркость [11]. В тех случаях, когда в результате светорегулирования имеет место изменение класса дороги по освещению, эти параметры должны быть приведены в соответствие с каждым из этих классов. В данной работе рассмотрение осуществляется применительно к классам дорог по освещению от *M1* до *M5*, и соответствующие им параметры учитываются для обеспечения успешного освещения этих дорог.

Ещё одним важнейшим элементом УДО является беспроводная связь, благодаря которой всей осветительной установкой можно управлять из одной точки. Такое осуществляемое из одной точки управление позволяет заменить контроль со стороны людей на полностью автономное управление при помощи компьютерных программ. Это позволяет рассчитать значения переменных для очень сложного дорожного освещения и обеспечить динамическое и эффективное освещение.

В УДО используется беспроводная сеть передачи данных, основанная на протоколе *Zigbee*, который позволяет сформировать быструю и простую сеть [12]. Протокол *Zigbee* обеспечивает связь на радиоволнах, которые распространяются в пространстве со скоростью света. Скорость распространения радиоволн следует учитывать, так как с ней связана задержка при расчёте скоростей движущихся по дороге транспортных средств.

## 3. Практические примеры

Перед тем, как сделать дорогу «умной» и разработать оптимальный проект, следует проанализировать ответы на ряд вопросов (какая должна быть топология сети; какова стратегия, которой осветительная установка будет следовать в случаях возможных отказов; как динамическое освещение повлияет на водителей; и др.) и провести испытания. В данной работе компьютерными средствами была создана контрольная дорога, позволившая установить, почему дорожное ос-

вещение следует сделать умным и какой метод формирования УДО будет наиболее удачным.

### 3.1. Создание контрольной дороги

Создание контрольной дороги осуществлялось в соответствии с требованиями к СД освещению, разработанными Турецкой корпорации по распределению электрической энергии (*TEDAS*) [13]. Контрольная дорога имела три полосы шириной 3,3 м каждая и длину 1000 м. При размещении опор вдоль этой дороги, первая опора располагалась на равном половине шага между опорами расстоянии от начала дороги. Количество опор определялось соответствующим образом.

Контрольная дорога создавалась применительно к трём разным сценариям. Первому сценарию соответствовало традиционное дорожное освещение. В рамках второго сценария осуществлялась только замена светильников с НЛВД, которые использовались в традиционной осветительной установке, на светильники с СД. В этом случае были изменены только светильники, тогда как остальные параметры, такие как шаг между опорами и высота опор, оставались такими же, как и в случае традиционного дорожного освещения. В рамках третьего сценария подбирались все параметры осветительной установки, такие как шаг между опорами, высота опор, светильники и т.д. В результате была создана установка УДО. Подробное описание этих сценариев приведено в табл. 1.

В третьем сценарии параметры выбирались таким образом, чтобы минимизировать энергопотребление. Сценарии можно с большой точностью сравнивать применительно к их энергоэффективности. Для всех сценариев при разных интенсивностях движения транспорта обеспечивались яркости дорожного покрытия, лежащие между значениями, соответствующими классам дорог по освещению от *M1* до *M5*.

### 3.2. Исследование влияния геометрии опор

Геометрия опор играет важную роль в дорожном освещении. Геометрия опор и распределение силы света непосредственно связаны друг с другом. Для получения хорошей осве-

Технические характеристики светильников и опор в различных сценариях

	Классическое дорожное освещение	Заменены только светильники	Полностью преобразованная осветительная установка
Мощность светильника, Вт	447	305	243
Световой поток светильника, лм	45866	45192	28862
Высота опоры, м	14	14	10
Шаг между опорами, м	40	40	35
Количество опор, шт.	25	25	29
Длина консоли, м	2,5	2,5	3
Угол наклона консоли, град.	0	0	0
Расположение опор	В один ряд, справа	В один ряд, справа	В один ряд, справа

тительной установки требуется либо определять геометрию опор, исходя из выбранного распределения силы света светильников, либо выбирать светильники с учётом конкретной геометрии опор.

Были проанализированы кривые силы света (КСС) предназначенных для дорожного освещения светильников с НЛВД, опубликованные многими производителями. В результате проведённого анализа было установлено, что распределения силы света светильников с НЛВД в плоскостях  $C$  и  $\gamma$  имеют круговую форму. У светильников с СД КСС не имеют определённой формы. Изменяя расположение линз и СД, можно изменить и КСС. Однако увеличение высоты опор приводит к тому, что для обеспечения равномерности распределения света КСС следует растянуть вдоль дороги. КСС светильника с СД, используемого во втором сценарии, приведены на рис. 1.

Геометрия опоры определяется её высотой, длиной и углом наклона кон-

соли и расстоянием от опоры до дороги. Связь между геометрией опор и кривыми распределения силы света светильников с НЛВД была исследована при помощи программы *Dialux*. При высоте опор 14 м и равном 0,5 м расстоянии от опоры до дороги, рассмотрение сочли возможным свести к трём случаям:

- Увеличение длины консоли с шагом 0,1 м при равном  $0^\circ$  угле наклона консоли.

- Увеличение угла наклона консоли с шагом  $0,1^\circ$  при равной 2,5 м длине консоли.

- Увеличение угла наклона и длины консоли в различных сочетаниях.

Применительно к этим трём случаям было установлено, что длина консоли должна составлять 3,5–6 м при угле наклона консоли  $0-10^\circ$  или же длина консоли должна составлять 2,5–3,5 м при угле наклона консоли  $5-15^\circ$ .

Так как у светильников с СД распределения силы света не одинаковые, то рассмотрение с использованием программы *Dialux* не позволяет определить стандартную геометрию опор, предназначенных для установки этих светильников. Поэтому при проектировании УДО подходящие светильники с СД можно выбирать применительно к геометрии опор, исполь-

зуемой в соответствующем проекте. Так что замена существующих светильников на светильники с СД может и обеспечить требуемое освещение, и сделать осветительную установку «умной» без изменения геометрии опор, используемой в традиционном дорожном освещении.

### 3.3. Стратегия управления и конструкция светильников для УДО

Зависимость между регулируемым световым потоком светильников с СД, предназначенных для УДО, и их энергопотреблением является приблизительно линейной (рис. 2). Поэтому в данной работе считается, что энергия, потребляемая СД, линейно зависит от уровня светорегулирования.

Для того, чтобы сделать освещение умным только за счёт замены светильников без изменения существующей системы осветительных опор, светильники должны быть снабжены датчиками и устройствами связи. При этом светильники смогут передавать сведения о реальных изменениях условий движения транспорта и погодных условий в виртуальную среду. В данной работе в рамках второго сценария светильники, исполь-

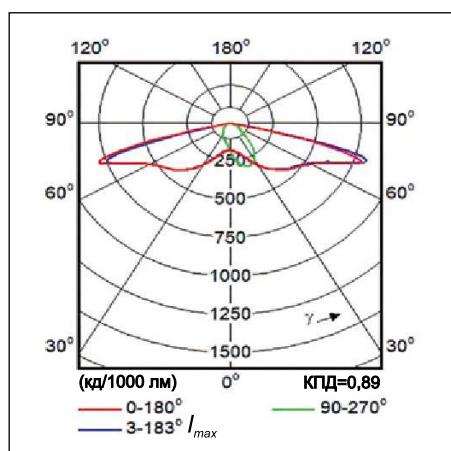
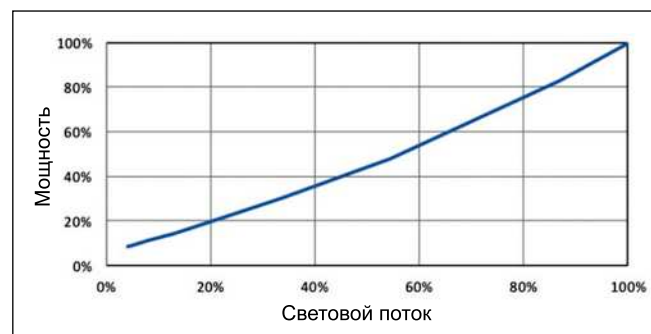


Рис. 1. Кривые силы света светильника с СД, который использовался во втором сценарии

Рис. 2. Пример светорегулирования светильника с СД: связь между выраженными в процентах мощностью и световым потоком [14]



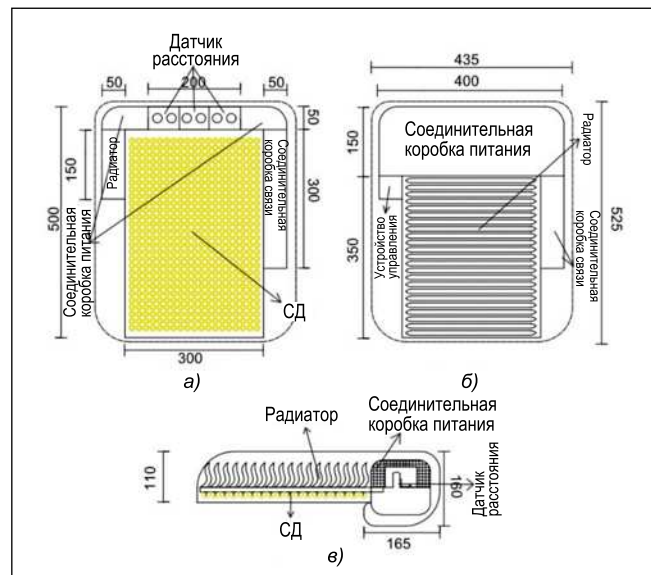


зубые в настоящее время в традиционных установках дорожного освещения, изменяют без изменения существующей системы осветительных опор. Для того, чтобы исключить из рассмотрения расположенные внутри светильников провода, используется электрическое оборудование, которое имеет розетки и может быть закреплено на корпусе светильника. Все устройства связи, датчики, устройства управления и СД модули имеют свои гнезда. Ожидается, что это приведёт к уменьшению времени принятия решений и затрат в случае отказа светильника. На рис. 3 приведены виды светильника снизу, сверху и сбоку.

Определение скорости и интенсивности движения транспорта является критичным для УДО. Эта информация используется для регулирования светового потока СД, что позволяет обеспечить очень высокую эффективность по сравнению с традиционным дорожным освещением. Установка УДО отслеживает транспортные средства на основе информации о высоте этих транспортных средств. На рис. 4 приведены расстояния между светильником и контрольной дорогой при отсутствии (а) и наличии (б) на дороге транспортных средств.

Светильники оборудованы лазерными датчиками-дальномерами. Эти датчики пересчитывают скорость транспортного средства при прохождении каждой из опор. В результате система управления отождествляет транспортное средство посредством информации о высоте этого транспортного средства и о светильнике, мимо которого оно проезжает. Интенсивность дорожного движения определяется исходя из количества транспортных средств, проезжающих мимо опоры за заданный промежуток времени. Скорость движения транспортного средства определяется временем, которое ему требуется для преодоления расстояния между опорами, и рассчитывается следующим образом: при проезде транспортного средства перед опорой на следующую опоры с определённой задержкой поступает сигнал, и время, которое транспортное средство затрачивает на достижение этой следующей опоры, измеряют с учётом этой задержки. Затем рассчитывают время, затрачиваемое радиосигналом на достижение этой следующей опоры, после чего эти два значения времени суммируют. Скорость транспортно-

Рис. 3. Изображение разработанного светильника: а – вид снизу, б – вид сверху, в – вид сбоку. Размеры указаны в мм



го средства определяют посредством деления шага между опорами на полученное значение времени.

### 3.4. Сравнение разных сценариев

В этом разделе применительно к компьютерной модели контрольной дороги проводится анализ годового энергопотребления для трёх рассматриваемых сценариев. В рамках этого анализа сначала на основе данных о времени захода и восхода солнца в Стамбуле определяется продолжительность работы дорожного освещения. В табл. 2 приведены среднемесячные данные о заходе и восходе солнца в Стамбуле и полное месячное время работы дорожного освещения.

После определения месячной продолжительности работы дорожного освещения, являющейся одним из базовых параметров УДО, надо решить, до какой степени следует уменьшать световые потоки источников света при разных дорожных условиях. При этом подходящее светорегулирование

должно быть обеспечено на основе результатов непрерывного наблюдения за дорогой при помощи датчиков. Для этого в соответствии с рекомендациями МКО следует определить уровень светорегулирования на основе выбора класса дороги по освещению, который осуществляется исходя из характеристик дороги, интенсивности дорожного движения и скорости транспортных средств. В данном случае для определения этих уровней светорегулирования используются данные о движении транспорта в Стамбуле (рис. 5).

В данном исследовании для сравнения сценариев используются зависящие от уровня светорегулирования световые потоки светильников, которые определяют в соответствии с рекомендациями на основе приведённых на рис. 5 реальных значений интенсивности дорожного движения в Стамбуле. На рис. 6 приведены относительные световые потоки светильников, полученные для разного времени суток.

Из рис. 6 следует, что относительные значения световых потоков светильников соответствуют почасовым

Рис. 4. Расстояние между светильником и контрольной дорогой при отсутствии (а) и наличии (б) на дороге транспортных средств. Размеры указаны в м

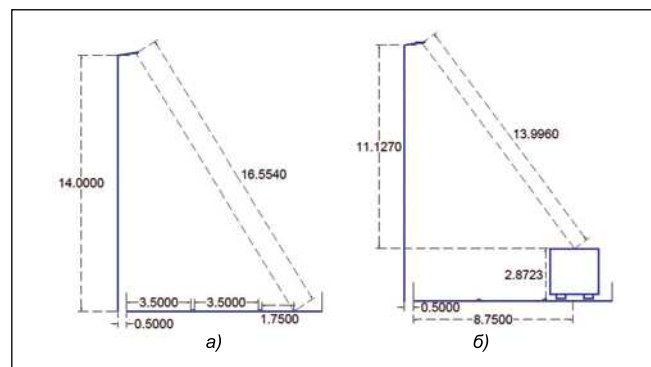


Рис. 5. Почасовая интенсивность движения транспорта в Стамбуле [16]

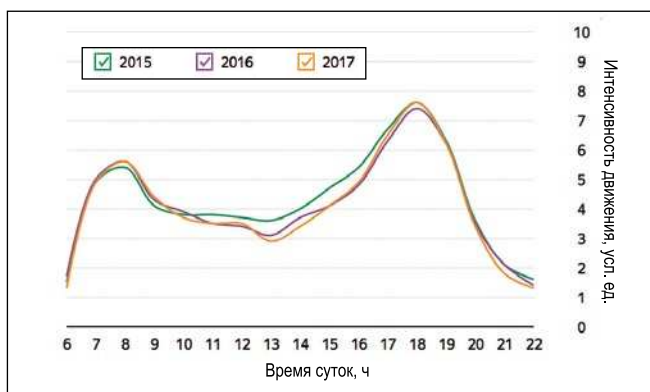


Рис. 6. Относительные значения световых потоков светильников в Стамбуле (в дневное время лампы выключены)

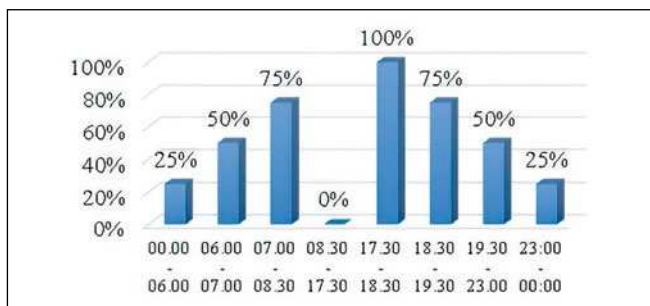
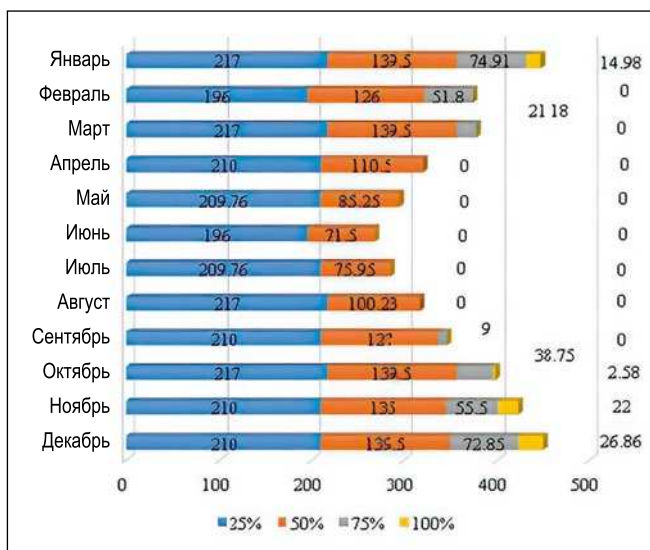


Рис. 7. Месячное время работы светильников при разных уровнях светорегулирования



интенсивностям дорожного движения, которые приведены на рис. 5. Если интенсивность дорожного движения оказывается ниже, чем 10 %, то из соображений безопасности световые потоки светильников поддерживаются на уровне 25 %. Мгновенные изменения светового потока при проведении расчётов не учитываются в связи с отсутствием соответствующих данных. В данном исследовании для дороги класса M1 равно 2,0 кд/м<sup>2</sup> предельное нормированное значение яркости дорожного покрытия заменено на 2,6 кд/м<sup>2</sup>, что облегчает сравнение умного и традиционного дорожного освещения. Кроме того, уровни яркости выбраны превышающими

минимальное нормированное значение из-за необходимости учёта коэффициентов эксплуатации светильников. Приведённые на рис. 6 относительные значения светового потока (100, 75, 50 и 25 %) удовлетворяют, соответственно, требованиям к яркости для дорог классов M1, M2, M3 и M4 по освещению. Для расчёта полного энергопотребления, после определения зависимости светового потока светильника от времени определяются продолжительности работы светильников при каждом уровне светорегулирования, для чего используются средние данные о заходе и восходе солнца в Стамбуле. На рис. 7 приведены месячные продолжительности ра-

боты светильников при разных уровнях светорегулирования.

На основе данных, приведённых на рис. 7, рассчитываются годовые продолжительности работы светильников при разных уровнях светорегулирования, после чего по приведённым ниже формулам для каждого из сценариев можно рассчитать годовое энергопотребление и количество сэкономленной энергии:

$$P_i^{i,j} = P_i^i \times P_r^{i,j} \times NP^i \quad (1)$$

$$E_y^{i,j} = P_i^{i,j} \times OT^{i,j} \quad (2)$$

$$E_y^i = \sum_{j \in J^i} E_y^{i,j} \quad (3)$$

где  $P_i^{i,j}$  – полная мощность осветительной установки,  $P_i^i$  – мощность светильника,  $P_r^{i,j} \in \{0,25; 0,5; 0,75; 1\}$  – относительная мощность, зависящая от относительной величины светового потока,  $NP^i$  – количество опор,  $E_y^{i,j}$  – полное годовое потребление энергии,  $OT^{i,j}$  – продолжительность работы светильников,  $J = \{1; 2.1; 2.2; 3\}$  – совокупность сценариев,  $i \in J$  – номер сценария,  $J^i$  – совокупность уровней светового потока для соответствующего сценария,  $j \in J^i$  – уровень светового потока. Значения этих переменных приведены в табл. 1 и на рис. 6 и 7.

Для расчётов экономии энергии, обеспечиваемой разными сценариями, в качестве опорного выбрано традиционное дорожное освещение. При этом относительная экономия энергии  $E_s^i$  рассчитывается по формуле:

$$E_s^i = \frac{E_y^1 - E_y^i}{E_y^1} \times 100 \quad (4)$$

Расчитанные для всех сценариев значения годового потребления энергии и количества сэкономленной энергии, а также продолжительности работы светильников при разных уровнях светового потока, приведены в табл. 3.

Традиционное дорожное освещение характеризуется большим потреблением энергии, что обусловлено отсутствием светорегулирования и использованием НЛВД. Для исследования экономии энергии в результате использования светорегулирования и замены светильников с НЛВД на светильники с СД были рассмотрены два варианта второго сценария,



Среднее месячное время захода и восхода солнца в Стамбуле и полное время работы дорожного освещения [15]

Месяц	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
Среднее время захода солнца	18:01	18:37	19:08	19:44	20:15	20:37	20:33	20:00	19:12	18:25	17:46	17:38
Среднее время восхода солнца	08:25	07:58	07:19	06:25	05:46	05:32	05:46	06:14	06:44	07:15	07:51	08:21
Полное время работы дорожного освещения, ч	446,4	373,8	377,68	320,5	295,02	267,5	285,7	317,23	346	397,83	422,5	456,22

Таблица 3

Годовое потребление энергии и количество сэкономленной энергии для всех сценариев

Относительный световой поток светильника, %	100	75	50	25	Всего	Экономия энергии ( $E_s$ ), %
1. Традиционное дорожное освещение	4306,4 ч 48124 кВт·ч	–	–	–	4306,4 ч 48124 кВт·ч	0
2.1. Только замена светильников, без светорегулирования	4306,4 ч 32836 кВт·ч	–	–	–	4306,4 ч 32836 кВт·ч	31,77
2.2. Только замена светильников, со светорегулированием	66,43 ч 2454,26 кВт·ч	324 ч 1920,47 кВт·ч	1389,43 ч 5595,68 кВт·ч	2526,53 ч 4174,68 кВт·ч	4306,4 ч 12472,85 кВт·ч	74,08
3. Полностью преобразованная система	66,43 ч 2204,79 кВт·ч	324 ч 1774,89 кВт·ч	1389,43 ч 5171,44 кВт·ч	2526,53 ч 3852,23 кВт·ч	4306,4 ч 1157,37 кВт·ч	76,04

в рамках которого заменялись только светильники без замены электрической установки и опор. В первом варианте (замена светильников с НЛВД на светильники с СД без светорегулирования) экономия энергии составила 31,77 %, тогда как во втором варианте (замена светильников и светорегулирование) она оказалась равной 74,08 %. Так что светорегулирование приводит к большому увеличению экономии энергии. Однако при этом по сравнению с первым вариантом несколько увеличиваются и затраты, что в первую очередь связано с оборудованием, требующемся для обеспечения светорегулирования. В случае третьего сценария, (полная замена опор, электрической установки и светильников для обеспечения максимального энергосбережения) экономия энергии оказалась равной 76,04 %. При анализе результатов было установлено, что экономия энергии при замене только светильников оказалась почти такой же, как и экономия энергии при замене всей осветительной установки.

#### 4. Заключение

Широкому распространению УДО препятствуют высокие затраты. В данной работе разработан подходящий светильник с СД и предложено пре-

образование традиционного дорожного освещения в УДО, не требующее замены электрической установки и опор. Было показано, что даже реализованный посредством замены только светильников переход на УДО обеспечивает очень большую экономию энергии. При этом было установлено, что хотя сценарий, в рамках которого заменяется вся осветительная установка, и является самым энергоэкономичным, капитальные затраты в этом случае оказываются очень большими. В предложенном решении затраты снижены благодаря тому, что заменяются только светильники. Показано, что УДО может быть реализовано с небольшими затратами. Снижение затрат внесёт существенный вклад в распространение УДО, особенно в развивающихся странах, в которых в настоящее время нельзя обеспечить повсеместный переход на УДО.

В данной работе не проведено подробное рассмотрение затрат для каждого из сценариев, что обусловлено отсутствием необходимых данных. Однако если сравнение затрат всё же будет проведено, то окажется, что предложенное решение требует меньших затрат по сравнению с третьим сценарием, так как оно не предполагает замену опор и электрической установки. Переход от традиционного

дорожного освещения к предложенному решению предусматривает только замену светильников. Благодаря большой экономии энергии, соответствующие затраты можно окупить за короткое время.

Тем не менее, для лиц, принимающих решения, более полезным было бы определение времени достижения точки равновесия между вариантами на основе подробного анализа затрат и выгоды с использованием метода чистой дисконтированной стоимости.

Следует отметить, что изменение класса дороги по освещению, являющееся следствием светорегулирования, осуществляющегося в целях экономии энергии, может отрицательно сказаться на безопасности. Вообще, уровень яркости, соответствующей дороге класса *M1* по освещению, можно уменьшать не более чем до уровня, соответствующего дороге класса *M3* по освещению. В данной работе при отсутствии движущихся транспортных средств яркость уменьшается до уровня, соответствующей дороге класса *M5* по освещению. Из соображений безопасности освещение полностью не выключают. Если транспортное средство движется по дороге, то оно регистрируется датчиками, и уровень яркости соответствующего участка дороги увеличивают до класса *M3*.

В странах с высоким уровнем допустимого риска и проблемами с энергообеспечением, допустимым вариантом может оказаться уменьшение уровня яркости до соответствующего класса дороги по освещению M5.

В данной работе выполнен только технический анализ УДО, позволивший продемонстрировать потенциальные возможности УДО в части экономии энергии. Однако только принимающие решения лица могут выбрать класс дороги по освещению, исходя при этом из соображений, связанных с энергосбережением и безопасностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. The internet of things: A survey. *Computer networks* // *Computer Networks*. – 2010. – Vol. 54, No. 15. – P. 2787–2805.
2. Adriansyah, A., Dani, A.W., Nugraha, G.I. Automation control and monitoring of public street lighting system based on internet of things // *Proc. of Int. Conf. on Electrical Engineering and Computer Science*, Palembang, 2017. – P. 231–236.
3. Do, T.H., Yoo, M. An in-depth survey of visible light communication based positioning systems // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16, No. 5. – P. 678.
4. Tähkämö, L., Räsänen, R.S., Halonen, L. Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting // *Int. journal of life cycle assessment*. – 2016. – Vol. 21, No. 2. – P. 137–145. .,
5. Gil-de-Castro, A., Moreno-Munoz, A., Larsson, A., De La Rosa, J. J. G., Bollen, M. H. J. LED street lighting: a power quality comparison among street light technologies // *Lighting Research & Technology*. – 2013. – Vol. 45, No. 6- P. 710–728.
6. Shahzad, G., Yang, H., Ahmad, A. W., Lee, C. Energy-efficient intelligent street lighting system using traffic-adaptive control // *IEEE Sensors Journal*. – 2016. – Vol. 16, No. 13. – P. 5397–5405.
7. De Paz, J. F., Bajo, J., Rodríguez, S., Villarrubia, G., Corchado, J.M. Intelligent system for lighting control in smart cities // *Information Sciences*. – 2016. – Vol. 372, No. 12. – P. 241–255.
8. Gül, Ö., Sen, Ö. Technical and Economical Evaluation of LED Road Lighting in Turkey // *Light & Engineering*. – 2010. – Vol. 18, No. 4. – P. 29–36.
9. Гюль Ё., Шэн Ё. Техническая и экономическая оценки дорожного освещения светодиодами в Турции // *Светотехника*. – 2010. – № 4. – С. 16–22.
10. Fonseca, C.C.D., Pantoni, R.P., Brandão, D. Public street lighting remote operation and

supervision system // *Computer Standards & Interfaces*. – 2015. – Vol. 38, No. 2. – P. 25–34.

11. CIE140–2000 Road Lighting Calculations.

12. Daely, P. T., Reda, H. T., Satrya, G. B., Kim, J. W., Shin, S.Y. Design of smart LED streetlight system for smart city with Web-based management system // *IEEE Sensors Journal*. – 2017. – Vol. 17, No. 18. – P. 6100–6110.

13. TEDAŞ. (2019, March). *LED’li Yol Aydınlatma Tasarımına İlişkin Usul ve Esaslar* [Online]. Available: [http://www.tedas.gov.tr/uploads/LEDliYolAydınlatma%20TasarımınaİlişkinUsulveEsaslar%20\(Taslak\).pdf](http://www.tedas.gov.tr/uploads/LEDliYolAydınlatma%20TasarımınaİlişkinUsulveEsaslar%20(Taslak).pdf)

14. National Electrical Manufacturers Association. (2014, July). *Energy Savings with Fluorescent and LED Dimming* [Online]. Available: <https://www.nema.org/Standards/SecureDocuments/NEMALSD%2073–2015%20WATER-MARKED.pdf>

15. Time and Date. (2019). *World Clock* [Online]. Available: <http://www.timeanddate.com/worldclock/astronomy.html>

16. Yandex. (April, 2018). *İstanbul Trafik Analizi* [Online]. Available: [https://yandex.com.tr/company/press\\_center/infographics/istanbul\\_traffic](https://yandex.com.tr/company/press_center/infographics/istanbul_traffic)



**Мустафа Ейюп Горсоу (Mustafa Eyyüp Gürsoy).** B.S. (2019 г.). Обучается в магистратуре Стамбульского технического университета. Область научных интересов: умное дорожное освещение и энергосбережение



**Бурак Диндар (Burak Dindar).** B.S. (2016 г.). Обучается в магистратуре Стамбульского технического университета. Ассистент факультета электротехники Стамбульского технического университета. Область научных

интересов: умные системы распределения энергии и качество электроэнергии



**Омер Гюль (Ömer Güll),** Ph.D. (2001 г.). Доцент Стамбульского технического университета. Лауреат награды компании «Сименс» за научные исследования (2001 г.). Область научных интересов: умные системы распределения энергии,

рынок электроэнергии, качество и эффективность использования электроэнергии, электробезопасность, освещение, управление проектными работами в области электротехники

## Зелёная энергия стала основным источником электричества в Великобритании

Первый квартал 2020 г. стал рекордным для британской возобновляемой энергетики. За первые три месяца текущего года солнце, ветер и биомасса стали основным источником электроэнергии в Соединённом Королевстве.

Как сообщает «Electrek» со ссылкой на анализ европейской энергетической компании EnAppSys, в I квартале года за счёт ВИЭ было произведено 44,6 % всей выработки – значительный рост по сравнению с 37 % годом ранее. На газовые электростанции пришлось 29,1 %, на атомные – 15,3 %, а на угольные – 3,7 %. Ещё 7,3 % страна экспортировала из-за рубежа.

Впервые возобновляемые источники энергии обошли источники на ископаемом топливе в III квартале минувшего года, однако теперь разрыв стал по-настоящему внушительным.

В пересчёте на абсолютные цифры выработка чистой энергии с января по март составила 35,4 ТВт·ч. Для сравнения, за аналогичный период 2019 г. британские ВИЭ произвели 27,2 ТВт·ч. Показатель вырос за год на 30 %.

Основной фактор, который обеспечил рекордные цифры, – благоприятные погодные условия. Стабильно сильные ветра



позволили выработать значительные объёмы энергии на ветровых электростанциях. А благодаря шторму «Сиара» 8 февраля было установлено сразу два рекорда: доля ветра в энергобалансе страны составила 56 % в моменте и 44,26 % в течение дня.

nanonewsnet.ru  
17.04.2020



# Исследование зависимостей температуры $p$ - $n$ -переходов и световых потоков СД модулей нового поколения от различных параметров<sup>1</sup>

К. Ф. СОКМЕН\*, О. Б. КАПАТАШ

Технический университет Бурсы, Бурса, Турция

\* E-mail: furkan.sokmen@btu.edu.tr

## Аннотация

В статье рассмотрены зависимости температуры  $p$ - $n$ -переходов и световых потоков СД модулей нового поколения от температуры окружающего воздуха и тока при наличии и отсутствии облучения и/или линзы и при различном количестве сквозных отверстий в плате. Для расчётов, осуществлявшихся методом конечных объёмов, использовалось коммерческое программное обеспечение *FlotEFD2019*. Результаты расчётов были подтверждены экспериментально. В результате проведённых расчётов было получено решение, не зависящее от количества элементов. При проведении расчётов учитывалась сила тяжести. Исследования производились применительно к температурам окружающего воздуха 23 и 40 °, облучённостям 0 и 1009 Вт/м<sup>2</sup> и токам 140, 160, 180, 200, 220 и 240 мА, тогда как количество сквозных отверстий принималось равным 101 и 202. Для определения влияния линзы, расположенной на СД модуле, расчёты были проведены как при наличии, так и при отсутствии линзы. В результате было установлено, что увеличение температуры окружающего воздуха и облучённости отрицательно сказывается и на температуре  $p$ - $n$ -перехода, и на световом потоке. Показано, что количество сквозных отверстий оказывает пренебрежимо малое влияние и на температуру  $p$ - $n$ -перехода, и на световой поток. Установлено, что наиболее сильное влияние на световой поток СД модуля оказывают облучение и линзы.

**Ключевые слова:** автомобильная СД лампа, ламинарная естественная конвекция, моделирование переноса излучения методом Монте-Карло, вычислительная гидрогазодинамика, температура  $p$ - $n$ -перехода.

## 1. Введение

В последнее время светодиоды (СД) нашли широкое применение в светотехнике. В зависимости от области применения, СД имеют сроки службы до 100000 ч. Температуры, меньшие чем 110 °С, позволяют обеспечить более эффективное распределение энергии, чем галогенные лампы накаливания с температурой 3000 °С и ксеноновые лампы с температурой 700 °С. Фундаментальные исследования теплового режима работы СД были проведены в [1]. Исследование теплового режима СД было проведено также в [2]. Помимо других исследований [3], направленных на определение температуры  $p$ - $n$ -перехода ( $T_j$ ), предпринимались попытки определить как оптические характеристики, так и сроки службы СД [4]. Ряд статей, посвящённых расчёту и определению  $T_j$ , были опубликованы производителями СД [5–7]. В 2009 г. было проведено исследование влияния температуры окружающего воздуха на СД и их сроки службы [8]. Ещё одно фундаментальное исследование было проведено в 2007 г. авторами работы [9]. В работе [3], целью которой являлось определение  $T_j$  при помощи трёхмерной модели, использовалось моделирование переноса излучения методом Монте-Карло. Метод Монте-Карло использовался и в [10]. В [11] сообщили об увеличении теплопроводности и уменьшении  $T_j$  до 20 °С при увеличении толщины медного покрытия печатных плат. В [12] были проведены исследования влияния на  $T_j$  теплопроводности и термического сопротивления.

В связи с возрастанием спроса, появились мощные СД, предназначенные для использования в небольших объёмах, что затрудняет проектирование тепловых режимов работы СД [13]. Для выявления термических про-

блем, имеющих место в СД, в [14] методом конечных элементов исследовали влияние локальных тепловых точек СД. В [15] был разработан точечный СД модуль (*spot module*), снабжённый устройством распределения тепла. При этом охлаждение осуществлялось за счёт естественной конвекции, а задача размещения СД была решена при помощи устройства распределения тепла с вертикальными рёбрами, расположенными на всех участках цилиндрической трубки [15]. В [16] исследовали влияние углового положения печатной платы на теплопередачу в системах с СД, в которых охлаждение осуществлялось посредством естественной конвекции. В ряде работ исследовались системы охлаждения СД, в которых использовались термоэлектрические охладители. В [17] было проведено сравнение системы с термоэлектрическим охладителем с системой, в которой использовалось устройство распределения тепла и вентилятор. В результате было установлено, что система с термоэлектрическим охладителем оказалась более эффективной при скорости воздуха 3,6 м/с и мощности СД, меньшей чем 35 Вт. При проектировании тепловых режимов работы систем с СД части используются методы вычислительной гидрогазодинамики. В [18], где использовался метод конечных элементов, исследовали изменение распределения температуры при изменении коэффициента теплопередачи применительно к 10 СД, замкнутому объёму за печатной платой и вертикальным рёбрам. Было установлено, что температуру СД можно уменьшить, воспользовавшись вентилятором для увеличения коэффициента конвективной теплоотдачи [18]. В другой работе, в которой использовался метод конечных элементов, исследовалось влияние на тепловой режим количества, ширины и длины рёбер устройства распределения тепла. В [19] тепловые режимы систем с СД исследовались при помощи метода конечных элементов. В литературе также приводятся результаты различных исследований, в которых в системах охлаждения вместо воздуха использовалась жидкость. Жидкостная система охлаждения была разработана в [20], где было показано, что воздушное охлаждение может оказаться недостаточным по сравнению с жидкостным.

<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского

В отличие от прочих исследований, в данной работе анализ теплового режима СД модуля проводился с учётом таких переменных, как температура окружающего воздуха, облучённость, ток и количество сквозных отверстий в плате. В работе также рассмотрена связь между температурой  $p-n$ -перехода и световым потоком СД модуля.

## 2. Материалы и метод

### 2.1. Геометрия и модель

В этой работе использовались СД модули нового поколения с тремя СД (рис. 1). Эти модули могут использоваться в любых конструкциях.

Каждый из СД потребляет мощность 0,1 Вт при токе 0,4 А. Одно из устройств управления (УУ) обеспечивает 0,13 А и 1,8 В. Один диод потребляет 0,15 А и работает при 0,7 В. Транзистор работает при 0,3 А и 1,4 В. Геометрическая модель и размеры СД модуля приведены на рис. 2.

### 2.2. Численное моделирование

Температуры электронных компонентов определялись методами вычислительной гидрогазодинамики. Для проведения тепловых расчётов электронной системы охлаждения использовалось программное обеспечение *FLoEFD2019* компании *Mentor Graphics*. *FLoEFD2019* может работать с разными системами автоматизированного проектирования (САПР), но в данной работе использовалась программа *CATIA V5 R19*. Непосредственное включение моделирующих программ в программу САПР *CATIA V5* привело к упрощению расчётов, которые стали очень простыми и быстрыми. Для проведения тепловых расчётов геометрия печатной платы и электронных компонентов была упрощена и импортирована из базы данных САПР. Затем с учётом размеров печатной платы была сформирована область проведения расчётов. Чтобы получить правильные результаты, эта область должна включать все части печатной платы. Затем были выбраны условия и методы проведения расчётов.

После формирования области проведения расчётов были заданы граничные условия. Температура окру-

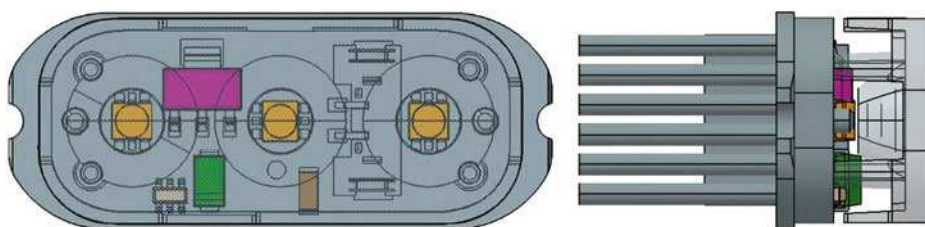


Рис. 1. Геометрия и местоположения СД и электронных устройств

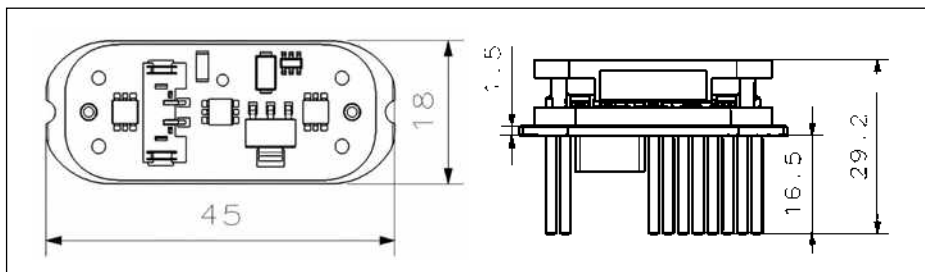


Рис. 2. Размеры СД модуля

жающего воздуха была установлена равной 23 °С, а для проведения расчётов был выбран внешний метод. Были выбраны моделирование переноса излучения методом Монте-Карло и естественная конвекция. В рамках метода Монте-Карло рассматривался перенос фотонов со случайной выборкой. Этот процесс повторялся  $N$  раз, причём  $N$  зависело от максимального количества фотонов, заданного в начале проведения расчётов. Выбор подходящего значения  $N$ , представляющего собой количество случайных выборок, имеет для этого метода большое значение. Кроме того, учитывалась сила тяжести ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ), направленная вниз вдоль оси  $z$ . Термодинамические параметры в области проведения расчётов задавались для давления 101325 Па и температуры окружающего воздуха 23 °С. Кроме того, с направления  $x = -0.568562$ ,  $y = 0$  и  $z = -0.8226405$  поступало солнечное излучение, создающее облучённость  $1009 \text{ Вт/м}^2$ .

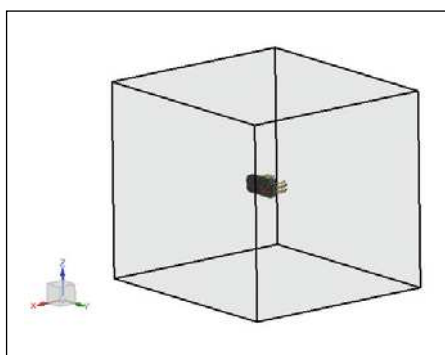


Рис. 3. Моделирование области проведения расчётов и солнечного излучения

Все СД и электронные компоненты были смонтированы на печатной плате *FR4* с двусторонним медным покрытием. Слои меди имели толщину 35 мкм, а общая толщина печатной платы была равна 1,5 мм.

Материалы и электронные компоненты следует выбирать тщательно, с тем, чтобы избежать перегрева. Материалы и электронные компоненты приведены в табл. 1 и на рис. 4.

Были проведены контрольные исследования, позволяющие проверить правильность результатов расчётов. Мощности, которые при проведении этих исследований потреблялись расположенными на печатной плате компонентами, указаны на рис. 5. Все компоненты питались током 140 мА.

Для получения решения, не зависящего от количества элементов, расчёты были проведены при различных количествах элементов, и полученные результаты приведены в табл. 2. Было замечено, что после

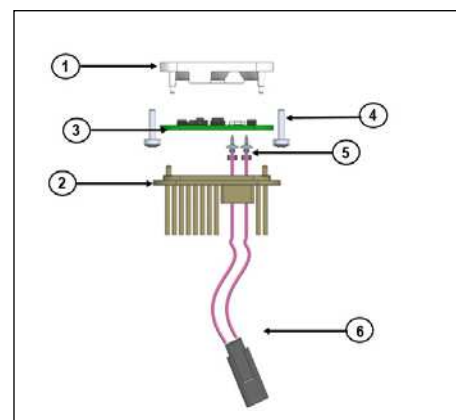


Рис. 4. СД модуль (см. табл. 1)



Компоненты и материалы СД модуля

Номер	Деталь	Материал
1	Линза	
2	Радиатор	
3	Печатная плата	
4	Втулка для сквозного отверстия	Ejot Delta
5	Кабельный зажим	CuZn33
6	Кабель	FLY-R Cable 200 mm

Таблица 2

Количество элементов и температура  $p-n$ -перехода СД

Количество элементов	$T_j$
550986	95,2
687250	98,3
765687	105,4
863547	116,4
954376	117,1
1025468	117

того, как количество элементов превысило некую величину, результаты уже не изменялись, и количество используемых при проведении расчётов элементов определялось исходя из условия, что оно не должно быть меньше, чем 954376.

Программа *FLoEFD* позволяет решить уравнения Навье-Стокса, описывающие сохранение массы, количества движения и энергии в потоке жидкости. Эти уравнения подкрепляются зависимостями, описывающими структуру жидкости, её плотность и вязкость, а также эмпирическими зависимостями для определения теплопроводности. Время, требующееся для формирования распределения температуры, очень невелико, и время передачи тепла от СД и электронных компонентов другим деталям также не очень велико, так что в данной работе предпочтение было отдано стационарному режиму работы. Работа в этом режиме описывается уравнениями сохранения массы, количества движения и энергии [21]. Температура  $p-n$ -перехода ( $T_j$ ) определялась при помощи уравнения (1). Зависимости нормированного светового потока СД производства компании *Samsung*, которые использовались в данном исследовании, от тока и  $T_j$  приведены на рис. 6 и 7.

$$T_j = T_{LED} + P_{LED} \cdot R_{jc}, \quad (1)$$

где  $T_{LED}$  – температура СД,  $P_{LED}$  – мощность СД,  $R_{jc}$  – термическое сопротивление.

Зависимости нормированного светового потока СД от тока и  $T_j$ , которые были взяты из каталогов на СД, были пересчитаны при помощи уравнений (2) – (4) применительно к световому потоку 32,4 лм – максимальному из встречающихся в каталогах световому потоку при 140 мА. Приведённая на рис. 6 зависимость нормированного светового потока СД ( $\alpha$ ) от тока ( $I$ ) описывается формулой (2), а приведённая на рис. 7 зависимость нормированного светового потока СД ( $\beta$ ) от  $T_j$  описывается формулой (3).

$$\alpha = 0,0068 \cdot I + 0,037, \quad (2)$$

$$\beta = -0,0014 \cdot T_j + 1,0237, \quad (3)$$

$$\text{Световой поток} = 32,4 \cdot \beta \cdot \alpha. \quad (4)$$

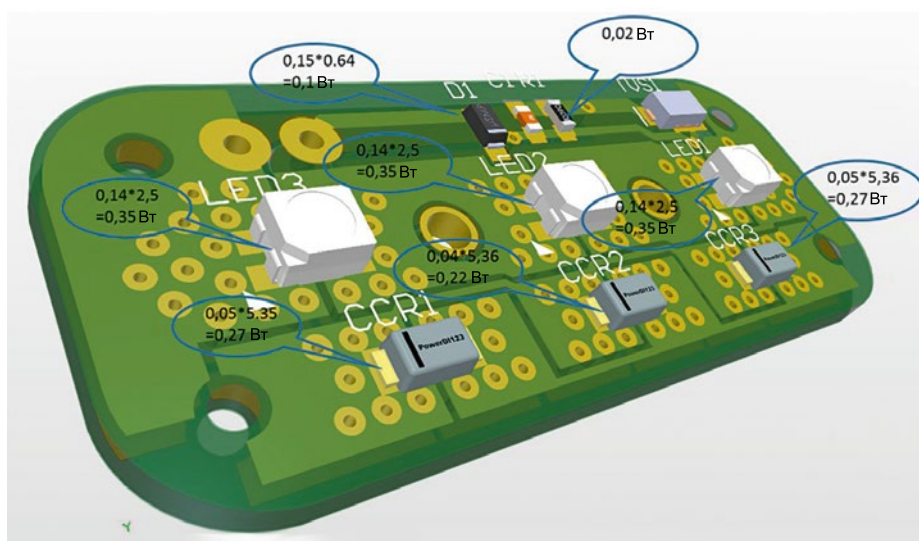


Рис. 5. Мощности всех электронных компонентов

### 2.3. Экспериментальные исследования

Результаты расчётов следовало подтвердить при помощи лабораторных исследований. Испытательное оборудование и его характеристики приведены в табл. 3.

Измерения проводили в помещении с кондиционированием воздуха при контролируемых внешних условиях (рис. 8). Печатная плата помещалась примерно в центре помещения.

Для обеспечения такой же, как и в случае численного моделирования, естественной конвекции, скорость воздуха в помещении поддерживалась на минимальном уровне. Измерения температуры производились при помощи термопар, удовлетворяющих требованиям системы сбора данных компании *National Instruments*. Температуры деталей и электронных компонентов отслеживались при помощи программного обеспечения. Данные, соответствующие стационарному ре-

Таблица 3

## Испытательное оборудование

Оборудование	Торговая марка	Рабочий диапазон	Точность
Климатическая камера	Angelantoni CST 157 2T	-80/+220 °C	+/-0,1 °C
Термометр	APPA-50	-40/204 °C	+/-2,2 °C
Термопары	Стандартные (тип K)		

Рис. 6. Зависимость нормированного светового потока от тока

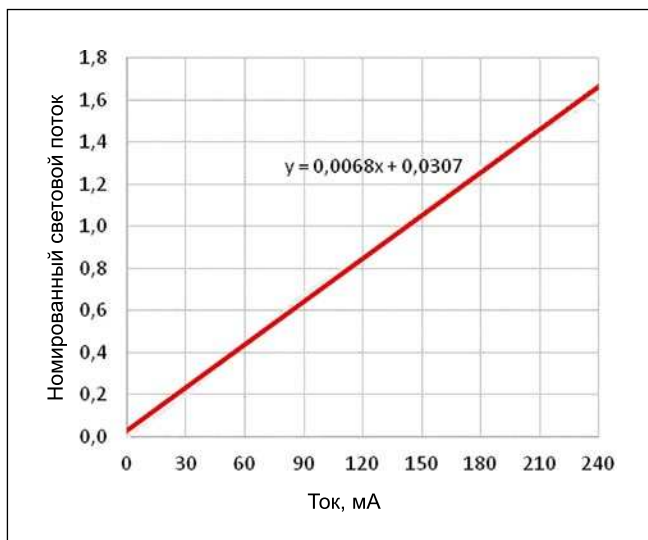
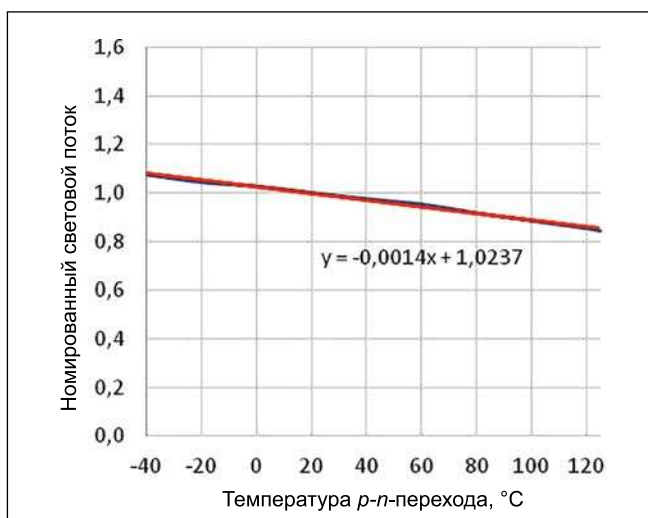
Рис. 7. Зависимость нормированного светового потока от  $T_j$ 

Рис. 8. Климатическая камера



жиму работы, собирались после гарантированного достижения термического равновесия в кондиционируемой части помещения.

Термопары были установлены на четырёх СД модулях, причём две из них размещались на линзах, одна термопара размещалась на рёбрах, а одна – на печатной плате (рис. 9).

Результаты измерений, которые проводились трижды, приведены на рис. 10. Было установлено, что температура СД достигает своего максимума за короткое время, а затем остаётся неизменной. Как оказалось, заметное на рис. 10 уменьшение температуры в период между 09:07 и 09:36 было связано с уменьшением тока. Затем температура оставалась неизменной, не считая очень небольших колебаний. Поэтому при проведении расчётов рассматривался стационарный режим работы. Зависимости от времени не рассматривались. Сравнение результатов измерений и расчётов проведено в табл. 4.

После подтверждения правильности расчётов, расчёты были проведены применительно к СД PLCC4 компании Samsung.

### 3. Результаты и обсуждение

После подтверждения правильности расчётов, были выполнены ещё 7 расчётов, которые перечислены в табл. 5, и было рассмотрено влияние на  $T_j$  таких параметров, как температура окружающего воздуха, облучённость, количество сквозных отверстий в плате, линза и ток СД. Полученные результаты показали, что так как допустимый предел температуры всех электронных компонентов, кроме СД, равен 150 °C, то согласно полученным результатам их температуры опасности не представляют.

Полученные в результате расчётов максимальные значения  $T_j$  приведены в табл. 6.

В результате расчётов характеристик семи СД модулей нового поколения, проведённых в данной работе, было установлено, что значения  $T_j$  оказались ниже предельно допустимой температуры p-n-перехода. Расчёты, проведённые применительно к току 0,14 А, температуре окружающего воздуха ( $T_a$ ) 23 и 40 °C и двум погодным условиям (при наличии и отсутствие облучения) (Расчёт 1 и Расчёт 2), показали, что увеличение  $T_a$



Сравнение результатов измерений и расчётов

СД модуль	СН10*, °С	СН11*, °С	СН12*, °С	СН13*, °С
1-е измерение	38,44	36,85	61,30	61,18
2-е измерение	38,26	37,73	62,59	62,07
3-е измерение	38,70	37,53	62,85	61,92
Расчёт	38,25	36,46	63,16	62,20

\* СН10 – СН13 – каналы измерительного прибора, к которым подключены соответствующие термопары.

Таблица 5

Условия, при которых проводились расчёты

Samsung PLCC4	$T_a$ , °С	Ток, А	Количество сквозных отверстий
Расчёт 1	23 °С	0,14	101
Расчёт 2	40 °С+обл	0,14	101
Расчёт 3	23 °С	0,18	101
Расчёт 4	40 °С+обл	0,18	101
Расчёт 5	23 °С	0,18	202
Расчёт 6 (с линзой)	40 °С+обл	0,18	202
Расчёт 7 (с линзой)	23 °С	0,18	202

Таблица 6

Результаты расчётов

Samsung PLCC4	$T_j$ , °С	Световой поток, лм
Расчёт 1	87,1	28,7
Расчёт 2	114,55	27,5
Расчёт 3	102,86	35,8
Расчёт 4	129,54	34,2
Расчёт 5	102,64	35,8
Расчёт 6 (с линзой)	121	34,7
Расчёт 7 (с линзой)	94,74	36,2

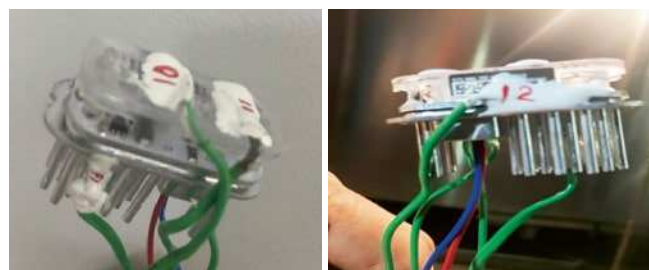


Рис. 9. Точки измерения

и добавление облучения привели к увеличению  $T_j$  на 27,45 °С и уменьшению светового потока на 1,2 лм.

Расчёты, проведённые при одних и тех же условиях окружающего воздуха, показали, что при большем токе СД, увеличенном для увеличения светового потока, увеличение  $T_a$  и добавление облучения (Расчёт 3 и Расчёт 4) привели к увеличению  $T_j$  на 26,68 °С и уменьшению светового потока на 1,6 лм. Для того, чтобы выявить влияние облучения на  $T_j$ , влияние температуры окружающего воздуха было исключено из изменения  $T_j$ :

$$T_{j(2-1)} = (T_{j \text{ Расчёт 2}} - T_{j \text{ Расчёт 1}}) - 17 \text{ °С}, \quad (5)$$

$$T_{j(4-3)} = (T_{j \text{ Расчёт 4}} - T_{j \text{ Расчёт 3}}) - 17 \text{ °С}. \quad (6)$$

После того, как равное 17 °С увеличение температуры окружающего воздуха было вычтено из разности  $T_j$  (см. вышеприведённые уравнения), были получены изменения  $T_j$ , равные, соответственно, 10,45 и 9,68 °С. И можно предположить, что эти полученные изменения температуры обусловлены наличием облучения. Расчёты показали, что облучение привело к увеличению температуры на 10 °С, то есть  $T_j$  возрасла на 36–38 %. А так как увеличение  $T_j$  приводит к уменьшению светового потока (см. рис. 7), то и при одних, и при других условиях окружающей среды наличие облучения привело к уменьшению светового потока на 1,2 и 1,6 лм соответственно. С точки зрения освещения, это нежелательный эффект. Увеличение количества сквозных отверстий в плате с 101 до 202 (Расчёт 5, проведённый применительно к  $T_a = 23 \text{ °С}$  и току 0,18 А) привело к уменьшению  $T_j$ . Хотя Расчёт 5 проводился применительно к вдвое большему, чем при Расчёте 3, количеству сквозных отверстий в плате, сравнение полученных результатов показало, что  $T_j$  уменьшилась всего на 0,22 °С, так что увеличение количества сквозных отверстий повлияло на  $T_j$  незначительно, и можно предположить, что это обусловлено маленькими размерами печатной платы. Значения светового потока, полученные в результате Расчётов 3 и 5, оказались одинаковыми. Поэтому при сравнении результатов расчётов влияние количества сквозных отверстий не учитывалось. Результаты расчётов 5 и 7, которые проводились применительно к одним и тем же условиям

( $T_a = 23 \text{ °С}$  и ток 0,18 А) при наличии и отсутствии линзы, что позволило исследовать влияние линзы на световой поток, показали, что добавление линзы привело к уменьшению  $T_j$  на 0,4 °С, что, в свою очередь, привело к уве-

личению светового потока на 1,5 лм. При сравнении результатов Расчётов 4 и 6, которые проводились применительно к  $T_a = 40 \text{ °С}$  при наличии облучения, было установлено, что добавление линзы привело к уменьшению  $T_j$

Рис. 10. Результаты измерений

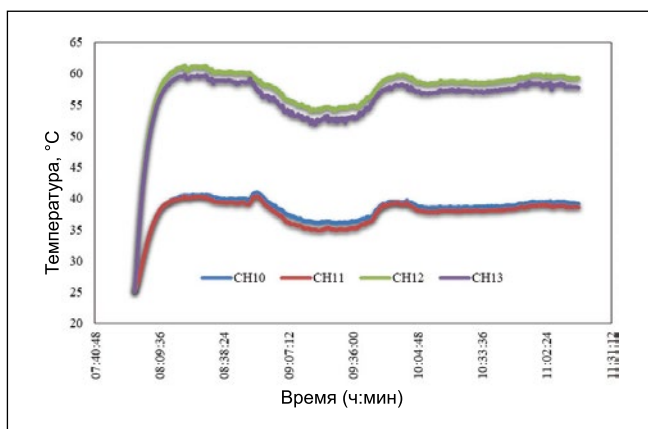


Рис. 11. Зависимости  $T_j$  и светового потока от тока при 23 °С (без линзы)

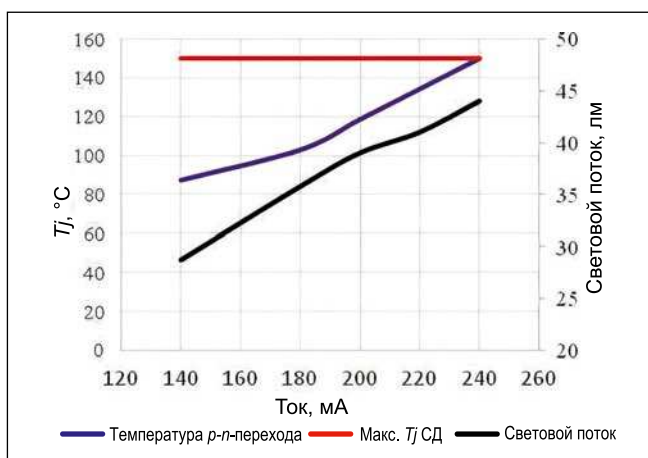


Рис. 12. Зависимости  $T_j$  и светового потока от тока при 40 °С и наличии облучения (без линзы)

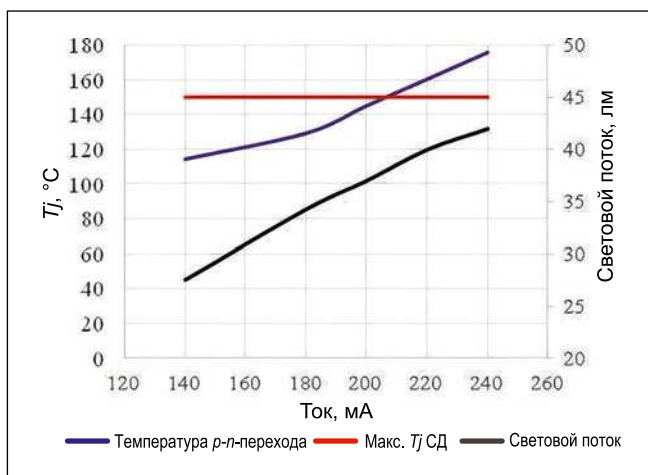
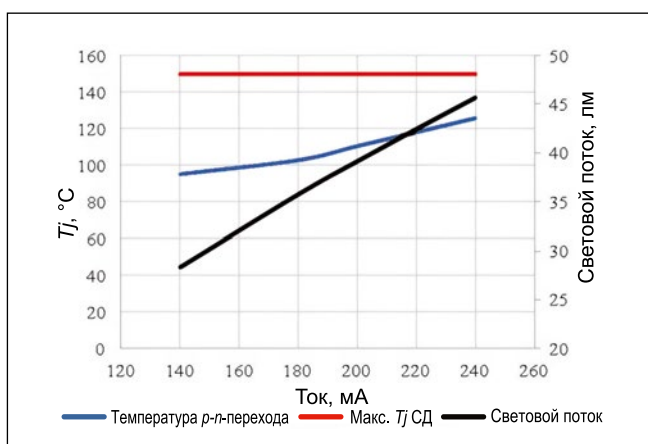


Рис. 13. Зависимости  $T_j$  и светового потока от тока при 23 °С (с линзой)



на 8,54 °С, что, в свою очередь, привело к увеличению светового потока на 0,5 лм. Сравнение результатов Расчётов 5 и 6 показало, что  $T_j$  увеличилась на 18,36 °С, что включает в себя увеличение  $T_a$  на 17 °С и воздействие облучения. Расчёты показали, что это увеличение  $T_j$  привело к уменьшению светового потока на 1,1 лм. Учитывая, что из равного 18,36 °С увеличения  $T_j$  17 °С приходится на увеличение температуры окружающего воздуха, получаем, что на облучение и линзы приходится 1,36 °С. Было установлено, что использование линз привело к существенному уменьшению влияния облучения. В данной работе было показано, что связанное с улучшением теплопередачи уменьшение обусловленного облучением роста температуры приводит к увеличению светового потока. Однако так как увеличение температуры окружающего воздуха приводит к увеличению  $T_j$ , то оно приводит и к уменьшению светового потока. Для расширения области, охватываемой проводимыми исследованиями, был проведён анализ влияния увеличения тока от 0,14 до 0,24 А, целью которого было получение максимального светового потока СД (рис. 6). Расчёты проводились применительно к температуре окружающего воздуха 23 и 40 °С, наличию и отсутствию облучения и наличию и отсутствию линзы. Полученные результаты приведены на рис. 11–14.

Влияние линзы очевидно при сравнении рис. 11 и рис. 13. То, превышено ли предельно допустимое значение  $T_j$  при наилучшем световом потоке, получаемом при 240 мА и отсутствии линзы, можно определить при помощи рис. 11. В этом случае СД модуль работает неудовлетворительно, так как  $T_j$  оказалась выше предельно допустимой. Согласно результатам расчётов, проведённых при наличии линзы (рис. 13), при 240 мА  $T_j$  оказалась ниже предельно допустимой, и наибольшее значение светового потока равно 44 лм.

Это же имело место при температуре окружающего воздуха 40 °С и наличии облучения: как видно на рис. 12, при отсутствии линзы предельно допустимое значение  $T_j$  было превышено после достижения током значения 200 мА, тогда как при наличии линзы это не наблюдалось (рис. 14). Было установлено, что в случае СД модуля с линзой  $T_j$  была ниже предельно



допустимой даже при 240 мА, а соответствующий световой поток оказался равным 46 лм, и модуль удовлетворительно работал в этих условиях. При равной 40 °С температуре окружающего воздуха и наличии облучения предельно допустимое значение  $T_j$  оказалось превышенным после достижения током значения, ненамного превышающего 200 мА, а при равной 23 °С температуре окружающего воздуха и отсутствии облучения предельно допустимое значение  $T_j$  оказалось превышенным только при токе 240 мА (рис. 11, 12).

Было установлено, что у СД модулей с линзами предельное значение  $T_j$  не было превышено даже при токе 240 мА при всех внешних условиях, так что в этом случае СД модули можно использовать для освещения. Как следует из рис. 13 и 14, модули с линзами могут работать и при тех, и при других внешних условиях.

Для того, чтобы понять, как наличие линзы сказывается на воздействии облучения, расчёты были проведены при температуре окружающего воздуха 23 °С и при наличии и отсутствии линзы. Полученные результаты приведены на рис. 15 и 16.

Было установлено, что при отсутствии линзы и наличии облучения предельно допустимое значение  $T_j$  было превышено после достижения током значения 200 мА (рис. 15), тогда как из рис. 16 следует, что при тех же внешних условиях и наличии линзы  $T_j$  была ниже предельно допустимой даже при 240 мА, а соответствующий световой поток оказался равным 44 лм.

#### 4. Заключение

В данной работе показано, что для того, чтобы СД модули нового поколения имели приведённые в каталогах характеристики, следует обеспечить хорошие внешние условия их работы. Особо значимое влияние на световой поток оказывает облучение. Было установлено, что облучение приводит к увеличению на 10 °С температуры  $p$ - $n$ -перехода использовавшегося в данной работе СД модуля, которая могла превысить своё предельно допустимое значение. Было установлено, что при наличии линзы облучение приводит к увеличению  $T_j$  всего на 2–2,5 °С, что не мешает использовать СД модуль для освещения. Полученные результаты подтвердили, что использование

Рис. 14. Зависимости  $T_j$  и светового потока от тока при 40 °С и наличии облучения (с линзой)

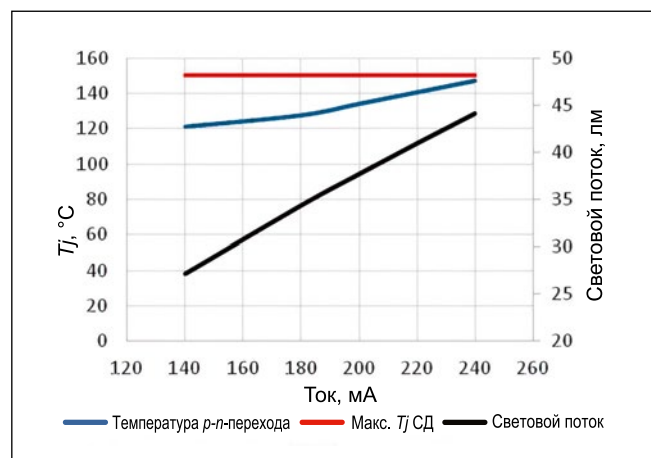


Рис. 15. Зависимости  $T_j$  и светового потока от тока при 23 °С и наличии облучения (без линзы)

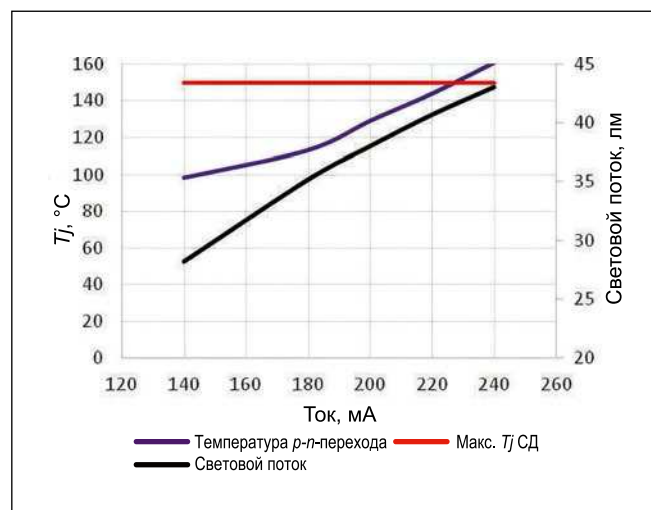
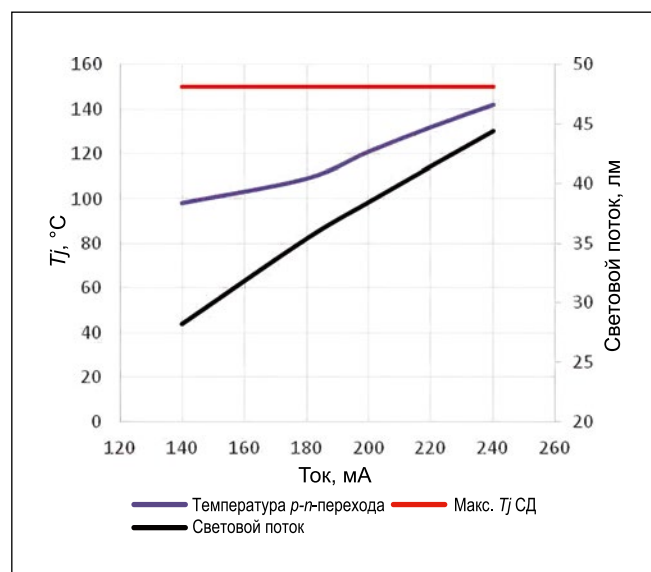


Рис. 16. Зависимости  $T_j$  и светового потока от тока при 23 °С и наличии облучения (с линзой)



линз непосредственно влияет на срок службы СД модуля и возможность использования его для освещения. Эти же результаты показали, что СД модули следует размещать там, где последствия облучения сводятся к минимуму, и что линзы необходимо использовать. Результаты работы должны быть тщательно проанализированы,

что позволит обеспечить требуемые характеристики СД модулей нового поколения. Проведённые исследования показали, что программные средства вычислительной гидрогазодинамики следует широко использовать для определения рабочих характеристик СД модулей при разных внешних условиях и для исключения рисков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosenberg, E., Fidje, A., Espegren, K.A., Stiller, C., Svensson, A.M., Møller-Holst, S. Market penetration analysis of hydrogen vehicles in Norwegian passenger transport towards 2050 // Int. Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35, No. 14. – P. 7267–7279. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.04.153
2. Poppe, A., Lasance, C.J.M. On the standardization of thermal characterization of LEDs. // Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement Management Symposium 2009, (2), 151–158. doi:10.1109/STHERM.2009.4810757
3. Kikuchi, K., Hamashiam, Y., Kobayashi Y. Prediction of LED junction temperatures with CFD for headlamp application // In: ISAL Symposium Proceeding, 2005.
4. Senawiratne, J., Zhao, W., Detchprohm, T., et al. Junction temperature analysis in green light emitting diode dies on sapphire and GaN substrates // Physica status solidi (c). – 2008. – Vol. 5, No. 6. – P. 2247–2249. doi:10.1002/pssc.200778648
5. Weber, R. Calculating an LED's Junction Temperature, 2015.
6. Application Guide. 2010.
7. Thermal Management of SMT LED Application Note, 2014.
8. Bider, C. Effect of thermal environment on LED light emission and lifetime // LED Prof Rev. – 2009. – May/June.
9. Bielecki, J., Jwania, A.S., Khatib, F.E., Poorman, T. Thermal Considerations for LED Components in an Automotive Lamp // 23<sup>rd</sup> IEEE SEMI-THERM Symp., 2007.
10. Rubenstein, R.Y., Kroese, D.P. Simulation and the Monte Carlo method, 2011.
11. Vora, A.K., Vijaykumar, P. Basic Thermal Guidelines for using PowerPSoC ®, 2009, (001), P. 1–12.
12. Sheu, G.-J. The heat dissipation performance of LED applied a MHP, 2005, 5941, 594113–594118. doi:10.1117/12.616355
13. Cheng, J.-H., Liu, C.-K., Chao, Y.-L., Tain, R.-M. Cooling performance of silicon-based thermoelectric device on high power LED // In: ICT 2005. 24<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics, 2005. IEEE; 2005, 53–56. doi:10.1109/ICT.2005.1519885
14. Arik, M., Becker, C.A., Weaver, S.E., Petroski, J. Thermal management of LEDs: package to system // 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Solid State Light, 2004, 5187 (July 2014), 64. doi:10.1117/12.512731
15. Petroski, J. Understanding longitudinal fin heat sink orientation sensitivity for Light Emitting Diode (LED) lighting applications // In: Advances in Electronic Packaging, 2003.

16. Yung, K.C., Liem, H., Choy, H.S., Lun, W.K. Thermal performance of high brightness LED array package on PCB // International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.07.023

17. Zhong, D., Qin, H., Wang, C., Xiao, Z. Thermal performance of heatsink and thermoelectric cooler packaging designs in LED // In: Proc. of 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging, ICEPT-HDP 2010, 2010. doi:10.1109/ICEPT.2010.5582819

18. Cheng, H.H., Huang, D.S., Lin, M.T. Heat dissipation design and analysis of high power LED array using the finite element method // Microelectron Reliab, 2012. doi:10.1016/j.microrel.2011.05.009

19. Weng, C.J. Advanced thermal enhancement and management of LED packages // Int. Communications in Heat and Mass Transfer, 2009. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.11.015

20. Lai, Y., Cordero, N., Barthel, F., et al. Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications // Applied Thermal Engineering, 2009. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.06.023

21. Raypah, M.E., Dheepan, M.K., Devarajan, M., Sulaiman, F. Investigation on thermal characterization of low power SMD LED mounted on different substrate packages // Applied Thermal Engineering, 2016. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.02.092



**Кемаль Фуркан  
Сокмен (Kemal  
Furkan Sokmen),**

Ph.D. Доцент Технического университета Бурсы, Турция. Область научных интересов: теплопередача, вычислительная механика

жидкости и газа, электронные системы охлаждения и тепловой комфорт



**Осман Бедреттин  
Караташ (Osman  
Bedrettin Karatas),**

М. Сс. Научный сотрудник Технического университета Бурсы, Турция. Область научных интересов: теплопередача, механика

жидкости и газа и электронные системы охлаждения

## Рост рынка профессиональных светильников в 2019 г.

В начале июня было опубликовано исследование рынка профессиональных светильников в 2019 г., проведенное компанией «Лайтинг Бизнес Консалтинг». По их оценкам, рынок профессиональных светильников в 2019 году показал прирост на 11,9 % в количественном выражении, достигнув уровня более 71,3 млн шт., и на 12,3 % в стоимостном, составив 63,9 млрд руб. При этом основной прирост рынка пришелся на III–IV кварталы 2019 года в первую очередь за счёт увеличения импорта светильников. Первый квартал 2019 г. напротив, показал сокращение объема импорта в стоимостном и количественном выражениях при сравнении показателей 2019 г. с аналогичным периодом 2018 г.

Увеличение импорта профессиональных светильников в стоимостном выражении в 2019 г. по отношению к 2018 г. составило 8,78 млрд руб.

Наибольшую динамику роста показали такие сегменты как:

- административно-офисное освещение (+3,03 млрд руб.),
- торговое освещение (+1,51 млрд руб.),
- ЖКХ (+0,97 млрд руб.).

По типам источников света, в 2019 г. доля СД светильников в общем объеме выросла на 4,7 пунктов в количестве, на 3,0 пункта в стоимости. При этом доля традиционных светильников составила 8,7 % в количественном и 7,8 % в стоимостном объеме. Таким образом, за 3 года доля традиционных светильников на рынке уменьшилась в 2 раза.

www.lbconsulting.ru  
03.06.2020

## Новый перовскитный диод является одновременно источником и приёмником света

Разработка устройств, способных как генерировать, так и обнаруживать свет, могла бы позволить разрабатывать более компактные и интеллектуальные оптические и оптоэлектронные системы.

Учёные из Университета Линчепинга в Швеции вместе с коллегами из КНР представили небольшое устройство, которое сможет упростить эту задачу. Оно одновременно является и оптическим излучателем и приёмником излучения. «Это очень важно для миниатюризации оптоэлектронных систем», – отмечает ведущий автор исследования Фэн Гао.

Осенью 2018 г. исследователи обнаружили подходящий для этого перовскит и разработали перовскитный светодиод с КПД 21 % – это один из лучших показателей в мире. Его можно использовать одновременно в качестве источника и приёмника света.

Этот крошечный блок, который может принимать и подавать оптические сигналы, позволяет упрощать и уменьшать современные оптические системы. Его также можно интегрировать с традиционными электронными схемами.

hightech.fm/  
11.04.2020





# СветоСервис СОЧИ

ООО «Светосервис-Сочи»

Гарантия высокого качества жизни жителей города

Благоустройство придомовых территорий, прокладка высоковольтных линий, а также монтаж приборов учета – уникальный для нашей страны опыт. При разработке проекта главным условием было вовлечение жителей в работу по созданию нового облика наших городов. Им дана возможность не только решить, как будут потрачены средства, но и вести контроль за реализацией.



354055, г. Сочи,  
ул. Тоннельная, 2Б



[www.svetoservis.ru](http://www.svetoservis.ru)



+7 (968) 300-63-30  
+7 (862) 296-54-40

# О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера. Часть III. Результаты и выводы

**В.В. ВОРОНОВ**, **Н.И. ЩЕПЕТКОВ**

Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва  
E-mail: n\_shchepetkov@inbox.ru

## Аннотация

Статья является окончанием (часть III) одноимённой статьи, отражающим содержание главы 4 и результатов диссертации архитектора В.В. Воронова, успешно защищённой в МАРХИ в 1985 г., с изложением авторского метода проектирования архитектурного освещения производственных интерьеров с тремя основными типами фонарей верхнего естественного света при дневном и искусственном освещении. Метод разработан на основе многочисленных расчётов и экспериментов, проведённых в натуральных условиях и в созданной автором камере «Искусственный небосвод зеркального типа» путём плоскостного и объёмного (на макетах) светомоделирования с тщательным измерением светотехнических параметров, характеризующих разные состояния, качества и варианты яркостной композиции, светонасыщенности пространства интерьера, контрастности освещения и т.п. Выводы в диссертации дают общую картину выполненной исследовательской работы, убеждающей в том, что проектирование освещения в производственных (и в любых других) интерьерах не сводится лишь к обеспечению элементарных нормируемых светотехнических параметров, а является комплексной, творческой задачей архитектурного проектирования, где свет – естественный и искусственный – есть главное «действующее лицо» в создании функциональных и эстетических качеств интерьера.

**Ключевые слова:** метод проектирования, архитектурное освещение, производственный интерьер, световой образ, яркостное и светлотное подобия.

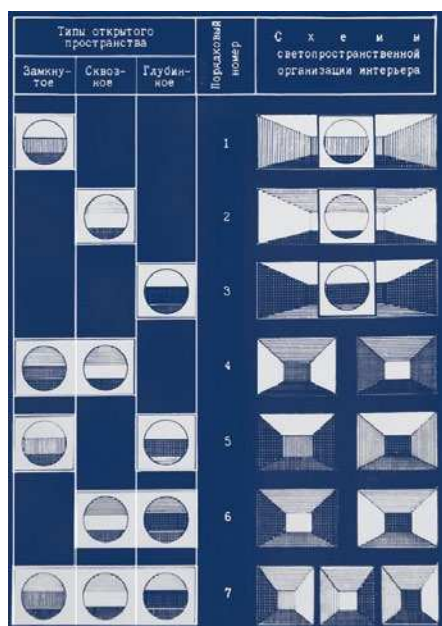


Рис. 1. Принципиальные схемы светопрозрачной организации интерьеров (см. также [3, рис. 2])

В диссертации установлено, что решение актуальной проблемы проектирования архитектурного освещения интерьера (достижение определённого зрительного соответствия светового образа в проекте, выполнявшемся в недавнем прошлом графически вручную, и в натуре) может достигаться на базе полученной в процессе экспериментальных исследований закономерности яркостного подобия, основанной на подобии светлот. Хотя даже сегодня, при наличии и совершенствовании компьютерной методики расчётов и визуализации их результатов, полного соответствия нет по причинам, отмеченным в [1] как «неискоренимый недостаток» любого плоскостного светомоделирования.

Итак, для реализации проектного замысла архитектора (а ныне – и светодизайнера) без грубых искажений в натуре на основе проведённых исследований разработан метод проектирования архитектурного освещения, обеспечивающий заложенное в проекте функциональное и эстетическое качество световой среды. Стоит отметить, что при современных возможностях управления освещением светодиодами среда может быть не только традиционно светостатичной, но и светокинетичной по определённому сценарию.

Процесс проектирования освещения по разработанному методу имеет две стадии. Первая – поиск решения и выражение задуманного (прогнозируемого) светового обра-

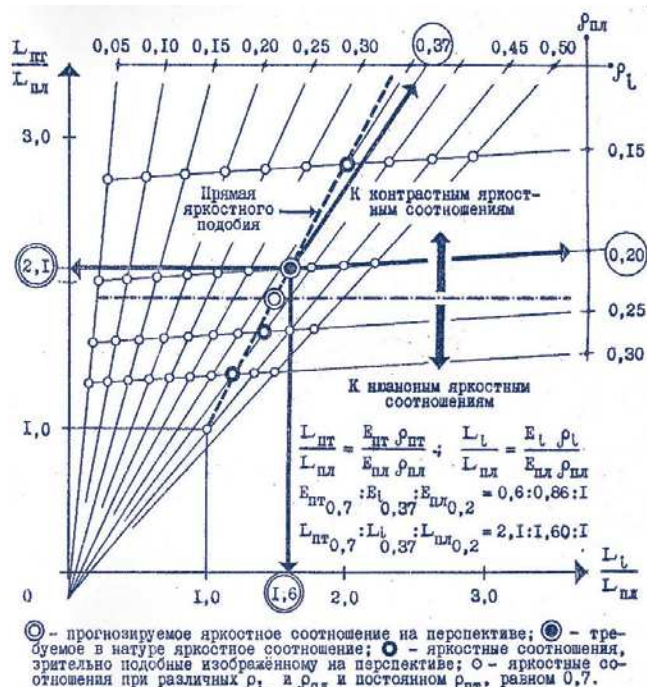


Рис. 2. Определение требуемых в натуре соотношений  $L_{пт} : L_t : L_{пл}$  и соответствующих  $\rho$  расчётно-графическим методом



за средствами архитектурной графики на бумаге (или, ныне возможно, на экране компьютера), а вторая – определение способов его реализации в натуре [2].

Первая стадия включает:

- выбор схемы светопрозрачной организации интерьера (рис. 1);
- ахроматическое изображение на перспективе прогнозируемого распределения яркостей в интерьере;
- нахождение яркостей потолка ( $L_{пт}$ ), элементов интерьера ( $L_i$ ) и пола ( $L_{пл}$ ) и их соотношений относительно  $L_{пл}$ .

Вторая стадия включает:

- графическое определение при естественном освещении требуемых соотношений  $L_{пт} : L_i : L_{пл}$  для природы, подобных по зрительному ощущению изображённым на перспективе (рис. 2);

- выбор соотношений  $L_{пт} : L_i : L_{пл}$  для реализации их в натуре и определение  $\rho$  и абсолютных значений  $L$  этих поверхностей;

- определение класса качества освещения интерьера согласно [1, таблица] и номограмме согласно [3, рис. 9], в соответствии с которой (если необходимо) производится корректировка соотношения  $L_{пт} : L_{ст} : L_{пл}$  на перспективе, где  $L_{ст}$  – яркость стен;

- оценку качества освещения интерьера по диапазону яркости, гармоничности яркостного ряда и её частоте [1, рис. 4];

- нахождение  $E_T / E_{ц}$  и авторского показателя светонасыщенности  $N$  и определение их соответствия требуемым значениям согласно [1, таблица].

В четырёх, к счастью сохранившихся, хоть и не в лучшем виде, экспозиционных (на защите диссертации) планшетах системно представлен авторский (В.В. Воронов) метод проектирования архитектурного освещения интерьера – в комментариях, графических схемах и таблицах (рис. 3).

Обязательным разделом кандидатских диссертаций в те годы была оценка экономической эффективности результатов. Понятно, что сегодня она бы выглядела иначе, но отвергнутая ныне идея этого раздела в диссертациях ущербна для науки и практики. В.В. Воронов добросовестно показал, что приведённые суммарные затраты на освещение в производственных интерьерах наименьшие с зенитными фонарями, а в зданиях с прямоугольными и шедовыми фонарями они в среднем, соответственно, на 7 и 14 % выше. Но это не значит, что шедовые фонари отвергаются: они почти всегда в интерьере по впечатлению от световой композиции эстетически предпочтительнее других, а для ряда производств в соответствующих климатических условиях могут быть экономически целесообразными. При

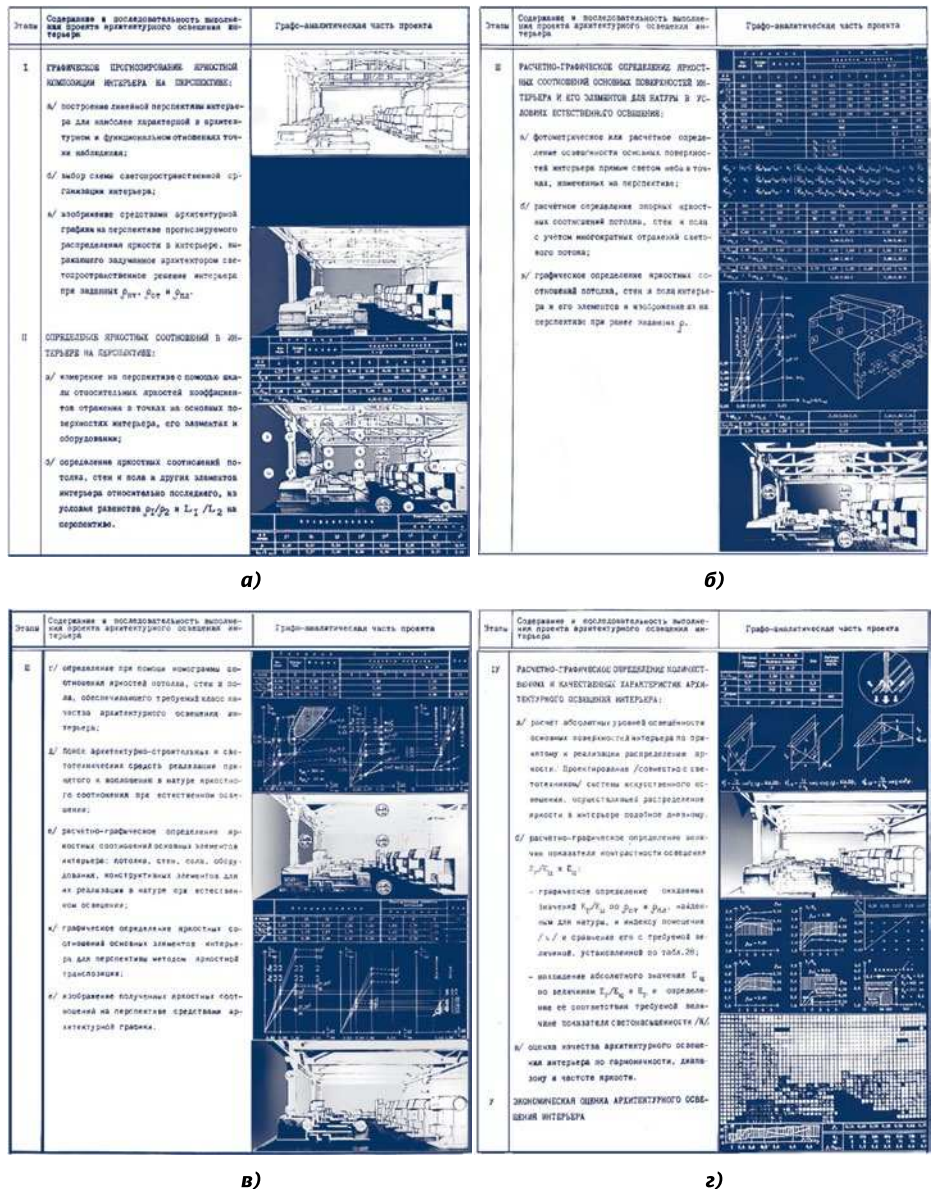


Рис. 3. Краткая графическая презентация метода проектирования архитектурного освещения интерьера (этапы I–V)

этом единовременные затраты на естественное освещение определялись стоимостью покрытия здания, а на искусственное – стоимостью первоначально установленных ОП с ЛЛ и их монтажом.

Приведённые затраты на искусственное освещение вычислялись по методу ВНИСИ для ОУ (система общего освещения), обеспечивающих в вечернее время распределение яркости в интерьере, близкое к принятому при дневном свете. Уровень затрат на искусственное освещение составляла от 26 до 38 % от суммарных затрат на освещение (при действовавших в те годы нормах и тарифах) и зависел от выбранной системы светопрозрачной организации интерьера. При равных условиях средневзвешенных яркостных соотношений основных поверхностей интерьера при естественном освещении и светонасыщенности в цехах с шедовыми, прямоугольными и зенитными фонарями приведенные затраты на искусственное освещение были различны. Это обусловлено тем, что основные поверхности интерьера (в силу особенностей светораспределения фонарей верхнего естественного света) днём ос-

вещены неодинаково. Равенство же их средневзвешенных яркостных соотношений при естественном освещении (для достижения сопоставимого эстетического эффекта) достигается за счёт использования разных  $\rho$  внутренних поверхностей, которые при расчёте искусственного освещения приводят к разному количеству ОП в ОУ. Это важное обстоятельство нужно учитывать не только как фактор, определяющий качество архитектурного освещения производственного (как и любого другого) интерьера, но и как важное условие экономической оценки того или иного варианта ОУ.

Итогами диссертационного исследования можно считать как минимум следующее [1–3]:

- разработаны теоретические основы светопромышленной организации производственного интерьера с верхним естественным и искусственным светом, включающие относительно универсальные классификацию и систему типов пространства интерьера, а также принципиальные схемы его светопромышленной организации;

- представлены авторские методы объективной и субъективной оценок качества архитектурного освещения интерьеров с верхним светом в натуральных и лабораторных условиях, показавшие, что эта характеристика в основном определяется светонасыщенностью и распределением яркости в пространстве интерьера;

- создана номограмма («бабочка») для оценки качества архитектурного освещения интерьера по распределению яркости в его пространстве, предложенная как инструмент для контроля светокомпозиционных решений на стадии проектирования и в натуре;

- определены показатели количественной и качественной оценок светонасыщенности производственных интерьеров с верхним светом, объективно характеризующие полусферической ( $E_{2\pi}$ ) и цилиндрической ( $E_{\Pi}$ ) освещённостями, а также контрастностью освещения через соотношения  $E_{\Gamma} / E_{2\pi}$  и  $E_{\Gamma} / E_{\Pi}$ , и субъективно – показателем светонасыщенности  $N$ ;

- установлена закономерность яркостного подобию, на основе которой разработан архитектурный метод транспозиции яркостных соотношений с плоскостного графического изображения перспективы интерьера в натуре;

- разработан график оценки качества архитектурного освещения интерьера по диапазону яркости, гармоничности и частоте её ряда, который позволяет оценивать яркостную композицию интерьера на микрометрическом уровне и дифференцировать её по категориям монотонности, нюансности и контрастности освещения;

- доказано, что допустимые (предпочтительные) диапазоны яркостных соотношений в интерьерах при естественном и искусственном освещении практически совпадают, что свидетельствует о субъективной желаемости человеком обеспечения относительного постоянства распределения яркости в интерьере при переходе от естественного к искусственному освещению в целях сохранения качества архитектурного освещения и постоянства визуально-психологической атмосферы, если она комфорта и эстетична;

- разработан метод проектирования архитектурного освещения производственных интерьеров с верхним светом, применимый и к другим типологическим группам зданий и позволяющий определять средства реализации авторского замысла в натуре при естественном, искусственном и совмещённом освещении с обеспечением тре-

буемых количественных и качественных характеристик и с оценкой их экономической эффективности.

Если говорить о кандидатской диссертации, то это не так уж и мало.

**P.S. от соавтора:** Диссертация В.В. Воронова, на мой взгляд, вполне «тянула» на докторскую, хотя бы потому, что диссертант не просто сочинил некоторые принципы и методику проектирования, чем «грешат» современные наши аспиранты и соискатели, а капитально «внедрился» своей доказательной базой в техническую сторону светотехники, малоизвестную и малопонятную в архитектурной теории и практике. Мы, архитекторы с кафедры архитектурной физики МАРХИ (С.С. Алексеев, Н.М. Гусев, В.Г. Макаревич, Н.В. Оболенский, В.В. Воронов, Н.И. Щепетков, В.И. Жердев, Г.И. Чиркин, Е.В. Шангина, А.Г. Батова (Приходько), Г.С. Матовников и др.) и из НИИ ИСФ (О.А. Корзин, В.В. Иванов, А.И. Пануров, Ю.А. Волков и др.), в течение десятилетий пытались и пытаемся в меру своих способностей и возможностей расширить круг мировоззренческих проблем, связанных со светом в архитектуре и влияющих на профессиональные задачи – стратегические, тактические и, в меньшей мере, оперативные. Прикладная архитектурная светотехника, по нашему мнению, призвана решать часть тактических и оперативных задач формирования комфортных, художественно полноценных, экологических и энергоэффективных естественной и искусственной световых архитектурных сред в интерьере и экстерьере в части более точных критериальных оценок и методов их определения. Вряд ли она претендует быть обособленной «наукой для науки», как когда-то существовало исторически несостоявшееся направление «искусства для искусства», хотя и сегодня экстраординарные примеры его живы. Нет смысла спорить, что стратегические задачи в этой области должны сформулировать грамотные архитекторы – они проектируют материально-пространственную и образную основу антропогенной среды. А продуктивного контакта между ними сегодня практически нет. Немногие архитекторы, научно занимающиеся проблемами света, в лучшем случае определяют некоторые актуальные тенденции развития этой среды и её художественных качеств, в т.ч. в виде соотношений светотехнических величин, не ставя конечной целью получение математически точных результатов. Это не их область и стезя. Вот здесь-то и могла бы наладиться продуктивная, системная, междисциплинарная научная преемственность: профессиональные и важные для архитектуры задачи поставлены, а «узкие специалисты»-светотехники широким фронтом ищут средства и способы их решения. Это – мечты архитектора, давно «погрузившегося» в светотехнику.

К сожалению, по опыту эпизодического рецензирования в последние годы «светотехнических» диссертационных работ, выполненных в НИИ ИСФ, МГСУ и МЭИ, а также по публикациям, в т.ч. в журнале «Светотехника», я вижу – насколько фрагментарны, несистемны, разрознены и отчасти мелкомасштабны темы исследований по прикладной, строительной светотехнике, а по существу – по свету в архитектуре. И похоже, ни в одной диссертационной работе не упоминаются труды архитекторов в этой области. Не знаю, что означает такая «кастовая» замкнутость – неведение, неуважение или, не дай



Бог, презрение к попыткам, возможно, не всегда убедительным с их точки зрения, воспользоваться «чужакам» знаниями смежной уважаемой науки. Наверное, я в чем-то ошибаюсь. Можно рассматривать эти оценки как приглашение к дискуссии.

Диссертация и автореферат В.В. Воронова вскоре будут представлены на сайте журнала «Светотехника».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов В.В., Щепетков Н.И. О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера. Часть II. Экспериментальные лабораторные исследования // Светотехника. – 2020. – № 2. – С.—.

2. Воронов В.В. Метод проектирования архитектурного освещения производственного интерьера // Автореф. дисс. ... к-та архитектуры. – М.: МАРХИ, 1985.

3. Воронов В.В., Щепетков Н.И. О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера. Часть I. Теоретические основы и результаты научных исследований // Светотехника. – 2020. – № 1. – С. 6–11.



**Воронов Владимир Васильевич**, кандидат архитектуры, доцент. Окончил в 1965 г. МАРХИ. Профессор кафедры «Архитектурная физика» МАРХИ (ГА) до 2016 г. Почётный работник высшей школы РФ



**Щепетков Николай Иванович**, доктор архитектуры, профессор. Окончил в 1965 г. МАРХИ. Заведующий кафедрой «Архитектурная физика» МАРХИ (ГА). Лауреат Государственной премии РФ (за архитектурное освещение Москвы). Заслуженный деятель искусств РФ. Член-корр. РАЕН. Член редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering»

## МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ В 2020 ГОДУ (III квартал)

Дата	Название мероприятия	Место проведения
04–07.08	<b>Exprolux - 2020</b> Международная выставка индустрии освещения, с конференцией	<b>Сан-Паулу, Бразилия</b> lightsearch.com
02–05.09	<b>Агрорусь - 2020</b> Международная агропромышленная выставка-ярмарка	<b>Санкт-Петербург, РФ</b> exponet.ru
15–17.09	<b>ChipEXPO - 2020</b> 18-я Международная выставка электроники, компонентов, оборудования и технологий, с конференцией	<b>Москва, РФ</b> exponet.ru
16–18.09	<b>LED &amp; Laser Diode Technology Expo (L-Tech)</b> Международная выставка технологий производства и применения светодиодов и лазерных диодов, с конференцией	<b>Нагойя, Япония</b> lightsearch.com

### Применение инновационных решений – одно из важных направлений перспективного развития СПб ГБУ «Ленсвет»

21 апреля во всём мире отмечают Всемирный день творчества и инновационной деятельности. Благодаря внедрению передовых технологий, многие из которых являются продуктом творчества и инновационной деятельности, складываются условия для повышения уровня жизни.



Эксплуатация наружного освещения с применением инновационных решений – одно из важных направлений перспективного развития СПб ГБУ «Ленсвет», специалистами которого сформирована концепция инновационного развития на среднесрочный пятилетний период (2020–2024 гг.). Концепция определяет технологические приоритеты организации и порядок интеграции в систему наружного освещения Санкт-Петербурга различных технических решений, нового оборудования и материалов.

Мировые тенденции развития наружного освещения, которых придерживается СПб ГБУ «Ленсвет», связаны с повышением эффективности и снижением негативного воздействия на окружающую среду. Приоритетное внимание уделяется эффективным инструментам управления в реальном времени и методам обнаружения неисправностей, контролю и управлению световым потоком светильников, развитию автоматизированных информационных систем, систем учёта и управления, применению композиционных материалов, проектированию и внедрению

системы наружного освещения для построения платформы искусственного интеллекта в целях оптимизации получения прибыли в перспективе». Планируемые к применению технологии должны быть экологичны и безвредны.

СПб ГБУ «Ленсвет» ведёт работу с производителями оборудования, ассоциациями, профильными институтами. На сегодняшний день проходят апробацию: светильники с индивидуальным управлением; оборудование из композиционных материалов; подземная распределительная система; технология удалённого контроля за исправностью светильников художественной подсветки; светодиодные модули в исторических светильниках; защитные покрытия от расклейки объявлений; инновационный подход к освещению пешеходных переходов с применением управляемых светильников со специальной оптикой.

Одним из важных направлений совершенствования инновационной деятельности является кооперация с другими компаниями, эксплуатирующими сети наружного освещения. В связи с этим в СПб ГБУ «Ленсвет» в 2020 г. начала свою деятельность российская некоммерческая организация Ассоциация наружного освещения. Новая организация способствует коллегиальному решению актуальных вопросов, связанных как с совершенствованием стандартов и законодательных норм, так и с поиском надёжных поставщиков инновационных технологий и оборудования.

lensvet.spb.ru

21.04.2020

# Метод квазизеркальных элементов для снижения стохастического шума при моделировании яркости

С.В. ЕРШОВ<sup>1\*</sup>, Д.Д. ЖДАНОВ<sup>2</sup>, А.Г. ВОЛОБОЙ<sup>1</sup>, Н.Б. ДЕРЯБИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург

\*E-mail: measure@spp.keldysh.ru

## Аннотация

При моделировании распространения излучения яркость<sup>1</sup> каждого пучка лучей рассчитывается с учётом оптических свойств объектов виртуальной сцены, с которыми он взаимодействует. По оптическим свойствам объекты могут грубо подразделяться на диффузные и зеркальные. Обычно используемая при моделировании трассировка лучей на основе методов Монте-Карло позволяет рассчитывать яркость пучка после встречи с диффузной поверхностью. При встрече же его с зеркальной поверхностью он отражается (или преломляется) до тех пор, пока не достигнет диффузной поверхности, где только и рассчитывается его яркость. В предлагаемом подходе диффузные элементы разделяются на истинно диффузные и квазизеркальные. Наиболее естественный критерий для последних – рассеяние в узком конусе «вокруг» чисто зеркального направления рассеяния. Элементом сцены может быть также суперпозиция обоих типов рассеяния, когда её двулучевая (двунаправленная) функция отражательной способности (*BRDF*) трактуется как сумма истинно диффузной и квазизеркальной частей. В работе показано, как разные компоненты освещённости<sup>2</sup> взаимодействуют с квазизеркальными объектами, и описано, как это реализуется в двунаправленной стохастической трассировке лучей. Предложенный подход позволяет значительно снижать стохастический шум для ряда сцен, включая и те, для которых не удаётся достигать хороших результатов при любых настройках стандартного метода. Он также применим к моделированию объёмного рассеяния, трактуя фазовую функцию среды как квазизеркальную. В этом случае выделение квазизеркальных объектов не основано на характере *BRDF*: квазизеркальной трактуется среда, в то время как поверхности, даже если их *BRDF* уже, остаются истинно диффузными. В статье показывается преимущество такого подхода.

**Ключевые слова:** расчёт освещённости, реалистичная визуализация, двунаправленная трассировка лучей, стохастическая трассировка лучей, понижение шума, индикатриса рассеяния.

## 1. Введение

Метод двунаправленной трассировки лучей с использованием фотонных карт является одним из эффективных для построения «виртуальной фотографии» [1]. Трассировка лучей от источников света создаёт фотонную кар-

ту, которая позволяет вычислять освещённость поверхностей сцены. Затем луч трассируется из камеры, и при попадании на диффузную поверхность встречи берёт освещённость из фотонной карты, свёртывает её с двулучевой функцией отражательной способности (*BRDF*<sup>3</sup>) в этой точке и прибавляет результат (яркость) к яркости пикселя. Эта идея реализована в ряде модификаций данного метода [2–5].

Важным параметром в таком подходе является число операторов (событий на трассе луча) в произведениях интегральных операторов рассеяния, вычисляемых с помощью метода Монте-Карло трассировкой из камеры. Обычно учитываются только диффузные события, максимально допустимое число которых обозначается как *BDD*<sup>4</sup>. *Эффективность подхода, т.е. скорость сходимости (или уровень шума, что более или менее то же самое), сильно зависит от BDD*, оптимальное значение которого своё для каждой сцены.

Лучшим выбором будут разные *BDD* в разных частях сцены [5] и даже смешение вычислений с разными *BDD* [5]. Часто найти оптимальное *BDD* (автоматически или вручную) возможно, и тогда вычисления оказываются весьма эффективными. Однако так бывает не всегда, и в некоторых случаях изменение *BDD* не помогает, т.е. какое бы значение его мы ни взяли, изображение оказывается сильно зашумлённым.

Мы предлагаем простой метод, помогающий в таких случаях. Его идея в том, что те объекты сцены, которые дают хоть какую-то толику диффузного рассеяния, разбиваются на две группы: истинно диффузные и квазизеркальные. Обычно последними будут те, у которых *BRDF* узкая и лежит вблизи зеркального направления, хоть, в принципе, критерий может быть произвольным, вплоть до того, что ламбертовская поверхность будет трактоваться как квазизеркальная. Как правило, разбиение трактует *BRDF* (для поверхности) или фазовую функцию (для объёма) как сумму квазизеркальной и истинно диффузной компонент, притом отличных от нуля.

Квазизеркальное рассеяние не увеличивает счётчик событий (при превышении которым *BDD* луч убивается). Кроме того, квазизеркальная часть *BRDF* не свёртывается с диффузной компонентой освещённости (от излучения источника, испытывающего истинно диффузное рассеяние). Это изменение в трассировке лучей от камеры может быть применено как к поверхностному, так и к объёмно-

<sup>3</sup> *Bidirectional Reflection Distribution Function*.

<sup>4</sup> *Backward Diffuse Depth* – специфический параметр двунаправленной трассировки лучей: луч из камеры обрывается после *BDD* диффузных рассеяний.

<sup>1</sup> В том числе подразумевается энергетическая яркость.

<sup>2</sup> В том числе подразумевается облучённость (энергетическая освещённость).



му рассеянию для снижений шума и объёма используемой памяти.

Более привлекательным кажется альтернативный подход, в котором нет ни фиксированного  $BDD$ , ни различения прямых, каустических и диффузных освещающих лучей. В каждой точке встречи камерного луча с диффузной поверхностью собираются все освещающие лучи, и вклад от разных точек суммируется с весом, зависящим от полной траектории (соединения участков из источника и из камеры) и вычисляемым по формулам  $MIS^5$  [6]. К сожалению, несмотря на убедительные картинки в [6], предложенный метод предполагает вовсе не использование фотонных карт, а последовательную трассировку одного луча из камеры и одного луча из источника, затем вычисление вклада от их слияния (который есть ноль, если ни в одной точке они не прошли в пределах радиуса интегрирующей сферы) и затем выбрасывание или забывание обоих. При использовании же фотонных карт одна и та же траектория луча из источника сливается с каждым лучом из камеры. На первый взгляд это одно и то же, так как при использовании разных участков от источника вклады даже при одном и том же участке от камеры независимы. На самом деле это не так [7]: шум (т.е. дисперсия накопленной яркости пикселя) вычисляется по формулам, отличным от таковых для простого  $MCMC^6$ . В эти формулы входят не только  $BRDF$  по трассе луча и кривые силы излучения источника, как в [6], но и геометрические факторы (расстояния между поверхностями и пр.). Поэтому предложенный в [6] метод не удаётся использовать непосредственно, без доработки. Между тем он требует расстановки интегрирующих сфер во всех точках встречи для камерного луча, что увеличивает требования к памяти, и, кроме того, фотон (луч из источника) проверяется на пересечение со всеми ними, что замедляет обработку. Поэтому производительность предлагаемого нами метода, основанного на ограниченном  $BDD$ , выше.

Существуют варианты метода [6], постепенно отказывающиеся от фотонных карт, см., напр., [8], где в добавление к *vertex merging*, мало отличающемуся от фотонных карт, используется *vertex connection*, когда концы трасс из камеры и из источника не близки и соединяются третьим отрезком конечной длины, изначально отсутствовавшим в обеих трассах. Точки, которые выгодно соединять, можно выбирать вероятностно [9]. Подробный обзор можно найти в диссертации [10]. Во всех этих методах используется  $MIS$ , когда слияние траекторий из источника и из камеры делается в разных точках, и все эти возможные варианты смешиваются с весами. Помимо того, в [8]  $MIS$  применяется к двум возможным подходам – *vertex connection* и *vertex merging*.

К сожалению, как и в [6], в этих работах формулы для вычисления весов применяются к фотонным картам или их аналогу, когда один и тот же набор трасс от источника переиспользуется для всех камерных лучей.

## 2. Уравнение глобальной освещённости и вычисление его ряда Неймана двунаправленной трассировкой лучей

Световое поле в сцене описывается самосогласованным уравнением, которое можно записывать в разных формах, например как уравнение глобального освещения (УГО) [11] и т.д. Идея в том, что в сцене есть некое световое поле, и оно освещает поверхности, которые рассеивают его. При этом преобразование облучённости  $E$  (от излучения, падающего на поверхность в точке  $x$  в направлении  $v'$ ) в яркость  $L$  (излучения, выходящего с точки поверхности  $x$  в направлении  $v$ ) определяется  $BRDF$  поверхности  $f$ :

$$L(v; x) = \int f(x; v, v') E(v', x) d^2 v'.$$

Затем это излучение, исходящее от поверхности, распространяется далее по сцене и в конце концов освещает её поверхности. Это преобразование описывается оператором переноса. Поскольку явная форма операторов рассеяния и переноса нам не важна, мы будем пользоваться компактной записью:

$$L = \hat{F}E, \quad (1)$$

$$E = \hat{T}L. \quad (2)$$

Заметим, что здесь  $\hat{F}$  включает только диффузное рассеяние, поэтому каустика считается нерассеянным светом, т.е. частью прямого освещения.

Также заметим, что  $L$  есть яркость **поверхностей сцены**; яркость же **изображения в камере** будет  $\hat{S}L$ , где  $\hat{S}$  описывает *чисто зеркальное* преобразование между сценой и камерой (и чаще всего это единичный оператор). Здесь и ниже мы будем вычислять только  $L$ . Затем, если необходимо, можно её преобразовывать в яркость изображения.

Полная освещённость состоит из прямой и диффузной компонент:

$$E = E^{(0)} + E^{(i)}. \quad (3)$$

Объединяя эти три уравнения, приходим к используемому ниже самосогласованному УГО в форме уравнения рендеринга [11]

$$E = \hat{T}\hat{F}E + E^{(0)}. \quad (4)$$

В вычислительной оптике широко применяется комбинация прямой и обратной трассировки лучей, когда прямая часть вычисляет освещённость диффузных поверхностей и запоминает её как, например, фотонную карту [1], и затем обратная трассировка превращает её в видимое камерой изображение. Заметим, что полученная стохастической трассировкой освещённость зашумлена и шум этот передаётся в изображение, а его окончательная амплитуда сильно зависит от того, как именно работает трассировка от камеры.

Простейший способ состоит в том, что мы трассируем лучи из камеры до первой диффузной поверхности, где вычисляется яркость от *всех компонент* освещения ( $\hat{F}E$ ),

<sup>5</sup> *Multiple Importance Sampling* – множественная выборка по значимости.

<sup>6</sup> *Markov Chain Monte-Carlo* – метод Монте-Карло по схеме цепей Маркова.

Рис. 1. Изображения для модифицированной сцены «Cornell Box», полученные за одинаковое время расчёта (200 с) при  $BDD = 0$  (слева),  $BDD = 1$  (в середине) и с использованием квазизеркального метода при  $BDD = 0$  (справа)



которая затем добавляется к яркости пикселя. Это обеспечивает оценку яркости поверхности, согласно (1), хотя результат и не идеален, т.к. вычисленная трассировкой от источника  $E$  обычно подвергается фильтрации (пространственной) для снижения шума. Из-за этого мелкомасштабные детали освещения, такие как блики, обыкновенно теряются.

Вместо этого можно применить к освещённости  $N$ -ую итерацию (4), что приводит к уравнению для яркости

$$L = (\hat{F}\hat{T})^N \hat{F}E + \sum_{k=0}^{N-1} (\hat{F}\hat{T})^k \hat{F}E^{(0)}. \quad (5)$$

Для точного поля освещённости  $E$  это, естественно, даёт тот же самый результат, как и простое  $\hat{F}I$  выше, однако для фактически используемой зашумлённой  $E$  эта вторая форма часто оказывается лучше из-за более низкого уровня шума благодаря свёртке со степенью  $(\hat{F}\hat{T})$ . При этом  $N$  есть не что иное, как описанная в п. 1 величина  $BDD$ .

Член  $\hat{F}E^{(0)}$  есть яркость поверхности под *прямым* (включая каустику) освещением. Диффузная же компонента освещения учитывается только в *последней* точке встречи камерного луча: это член  $(\hat{F}\hat{T})^N \hat{F}E$ .

Интегральные операторы могут вычисляться методом Монте-Карло: мы выстреливаем лучи из камеры через данный пиксель изображения, они попадают на поверхность, рассеиваются ею (левый оператор  $\hat{F}$ ), распространяются по сцене (оператор  $\hat{T}$ )<sup>7</sup> и так далее, пока не достигнут  $N$ -й диффузной поверхности, на которой и остановятся. В  $k$ -й диффузной точке встречи (т.е. непосредственно *перед*  $k$ -м диффузным рассеянием) мы вычисляем яркость поверхности при прямом (ну и каустическом) освещении ( $\hat{F}E^{(0)}$ ), если  $k < N$ , и при полном освещении ( $\hat{F}E$ ), если  $k = N$ . Затем результат (яркость) масштабируется с учётом ослабления излучения из-за зеркальных преобразований в  $\hat{T}$ , и наконец прибавляется к яркости пикселя. Среднее по ансамблю камерных лучей сходится к  $L$ .

### 3. Идея квазизеркального метода

Рассмотрим модификацию широко распространённой тестовой сцены «Cornell Box». Она представляет собой открытую со стороны камеры коробку, на полу которой стоят два параллелепипеда. Источник света – **прозрач-**

**ный** квадратик, расположенный очень близко к потолку коробки и светящий только вверх. Стенки коробки имеют ламбертовское отражение с альбедо 50 %, а параллелепипеды –  $BRDF$ , являющуюся суммой ламбертовской и узкой (почти зеркальной) компонент. Чтобы видеть, какая из них и какой вклад даёт в изображение, ламбертовская компонента *чисто* красная (нормированный цвет  $(1, 0, 0)$ ), а узкая компонента *почти чисто* зелёная (нормированный цвет  $(0, 1; 1, 0, 1)$ ). Альбедо для максимальной из цветовых компонент – 50 и 25 % соответственно.

В сцене практически нет первичного освещения (за исключением маленького квадратика потолка над источником).

Рассмотрим случай  $BDD = 0$ . Луч из камеры, попавший на любую поверхность сцены, тут и останавливается (поскольку зеркальных индикатрис в сцене нет) и берёт яркость точки как свёртку  $BRDF$  с *полной* освещённостью поверхности от всей полусферы. На поверхности параллелепипедов есть узкая  $BRDF$ , а освещение в основном – вторичное от стенок коробки. Свёртка узкой  $BRDF$  с *флуктуирующей* освещённостью из фотонных карт даёт большой шум (см. «зелёное» отражение внизу параллелепипедов на рис. 1).

В случае  $BDD = 1$  в первой точке попадания камерного луча берётся только первичное (и каустическое) освещение, которое в этой сцене отсутствует (кроме маленького квадратика на потолке над источником). Дальше камерный луч отражается и или покидает сцену, или попадает на одну из её поверхностей, где собирает уже *полное* освещение. При этом очень малая часть лучей попадает на квадратик потолка, расположенный прямо над источником, где освещённость на порядки выше. Соответственно, и приносимая этими лучами в пиксель яркость будет на порядки выше средней. Прочие же лучи попадают на стенки коробки или параллелепипедов, где освещённость невелика, и, соответственно, их вклад в яркость пикселя тоже невелик. В результате получается, что яркость пикселя в основном создаётся малым числом лучей, приносящих зато большую яркость. Это неизбежно приводит к большому шуму (рис. 1). Заметим, что шум на параллелепипедах в основном *не зелёный*, т.к. узкая часть  $BRDF$  «посылает» отражённый луч в примерно одно и то же место сцены, т.е. или уж почти все лучи попадают в яркий квадратик на потолке, или уж ни один.

Большие значения  $BDD$  положения не улучшают. Можно было бы попробовать использовать  $BDD = 0$  для камерных лучей, отражённых согласно ламбертовской части  $BRDF$ , и  $BDD = 1$  для лучей, которые (сперва) были рассеяны согласно узкой компоненте  $BRDF$  поверхности. Однако это не работает [5, 12]. То есть, когда лучи,

<sup>7</sup> Заметим, что в *обратной* трассировке порядок событий от камеры соответствует порядку операторов слева направо, т.е. крайний левый оператор соответствует преобразованию в левом от камеры сегменте луча.



рассеянные почти по зеркальному направлению и лучи, рассеянные далеко от него, собирают освещение по-разному, мы получаем неверную яркость изображения. Необходимо более изощрённый выбор того, какие освещающие лучи в какой точке встречи использовать, а какие игнорировать.

Ключевая идея подхода остаётся всё той же: рассеяние согласно узкой части диффузной *BRDF* трактуется специфически, не как истинно диффузное, а как в некотором смысле сходное с зеркальным. Поэтому такую узкую *BRDF* и весь способ обработки рассеянных согласно с ней лучей в трассировке от камеры называют квазизеркальными. Результату вычислений для той же модельной сцены с помощью этого метода соответствует правая часть рис. 1 (см. также п. 7.1).

#### 4. Операторные последовательности в присутствии квазизеркальных *BRDF*

Перейдём теперь к формальному выводу того, что делать с камерным лучом, когда диффузная *BRDF* разбита на истинно диффузную и квазизеркальную части:

$$\hat{F} = \hat{F}_d + \hat{F}_{qs} \quad (6)$$

Разбиение это произвольно (хотя некоторые способы с точки зрения уменьшения разбиения оказываются выгоднее других), т.е. яркость изображения всё равно сходится к точному решению.

Яркость точки поверхности  $x$  с учётом (6) выражается как

$$L(\mathbf{v}, \mathbf{x}) = (\hat{F}_d E)(\mathbf{v}, \mathbf{x}) + (\hat{F}_{qs} E)(\mathbf{v}, \mathbf{x}). \quad (7)$$

Освещение также разделяется теперь на *три* составляющие: **прямое** (которое не было рассеяно вовсе или соответствует чисто зеркальной *BRDF*), **квазикаустика** (рассеянное по крайней мере один раз в соответствии с квазизеркальной *BRDF*, но ни разу – с истинно диффузной *BRDF*) и **диффузное** (рассеянное по крайней мере один раз в соответствии с истинно диффузной *BRDF* поверхности), т.е.

$$E = E^{(0)} + E^{(qc)} + E^{(i)},$$

так что (7) принимает вид

$$L = \hat{F}E = \hat{F}_{qs} (E^{(0)} + E^{(qc)}) + \hat{F}_{qs} E^{(i)} + \hat{F}_d E. \quad (8)$$

Затем, подставляя наше разбиение освещения в УГО (4), получаем

$$E^{(qc)} + E^{(i)} = \hat{T}\hat{F}_{qs} (E^{(0)} + E^{(qc)}) + \hat{T}\hat{F}_{qs} E^{(i)} + \hat{T}\hat{F}_d E.$$

Двучлен  $\hat{T}\hat{F}_{qs} E^{(i)} + \hat{T}\hat{F}_d E$  здесь описывает свет, испытавший по крайней мере одно (истинно) диффузное рассеяние, в то время как член  $\hat{T}\hat{F}_{qs} (E^{(0)} + E^{(qc)})$  – свет, испытавший по крайней мере одно чисто зеркальное рассеяние,

но ни одного диффузного. С учётом нашего разбиения освещения на три компоненты, это означает, что

$$E^{(i)} = \hat{T}(\hat{F}_d E + \hat{F}_{qs} E^{(i)}), \quad (9)$$

$$E^{(qc)} = \hat{T}(\hat{F}_{qs} E^{(qc)} + \hat{F}_{qs} E^{(0)}), \quad (10)$$

откуда следует, что

$$E^{(i)} = (1 - \hat{T}\hat{F}_{qs})^{-1} \hat{T}\hat{F}_d E, \quad (11)$$

$$E^{(qc)} = (1 - \hat{T}\hat{F}_{qs})^{-1} \hat{T}\hat{F}_{qs} E^{(0)}. \quad (12)$$

Мы предполагаем, что если камерный луч испытал квазизеркальное рассеяние, то это *не* увеличивает счётчик диффузных событий, так что луч не обрывается. Выведем теперь, какие компоненты освещённости должны браться в каких точках встречи камерного луча, чтобы математическое ожидание яркости изображения совпало с точным значением.

Объединяя (8) с (11) и (12), мы после громоздких, хотя и тривиальных, преобразований получим, что вычисленная при  $BDD = N$  яркость поверхности выражается как

$$L = \hat{F}_{qs} (E^{(0)} + E^{(qc)}) + \sum_{k=0}^{N-1} ((1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_d \hat{T})^k (1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)}) + ((1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_d \hat{T})^N (1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_d E, \quad (13)$$

где

$$\hat{Q} \equiv \hat{F}_{qs} \hat{T}. \quad (14)$$

Существует и **альтернативная** форма, которая даёт в точности то же точное решение по яркости  $L$ , хотя при использовании реальных, зашумлённых вычислений результат может быть иным (с другим уровнем шума):

$$L = (1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_{qs} E^{(0)} + \sum_{k=0}^{N-1} ((1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_d \hat{T})^k (1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)}) + ((1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_d \hat{T})^N (1 - \hat{Q})^{-1} \hat{F}_d E. \quad (15)$$

Подробный вывод приведён в [12].

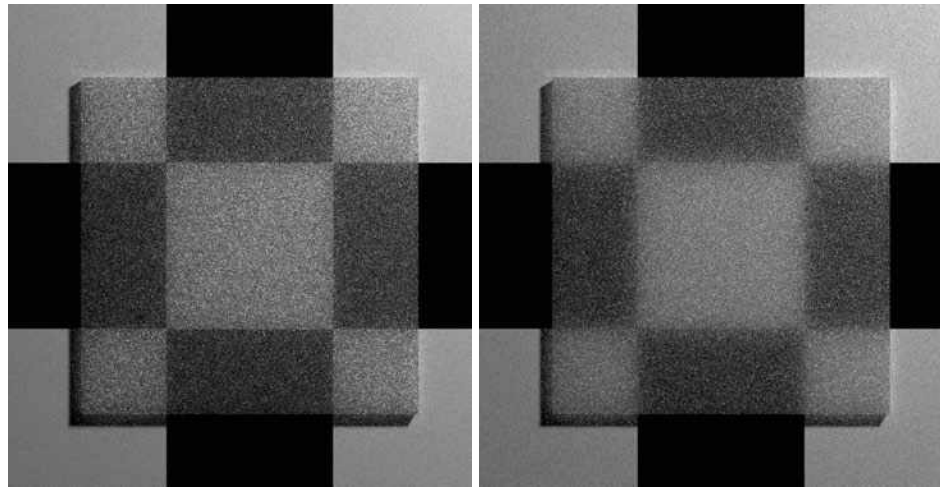
#### 5. Интегрирование по траекториям от камеры

Разлагая  $(1 - \hat{F}_{qs} \hat{T})^{-1}$  из (13) в ряд Неймана, можем видеть, что, например, при  $BDD = 2$

$$L = \hat{F} (E^{(0)} + E^{(qc)}) + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{Q}^k \hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)}) + \sum_{k,m=0}^{\infty} \hat{Q}^k \hat{F}_d \hat{T} \hat{Q}^m \hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)}) +$$

Рис. 2. Изображения, полученные для сцены из пластины рассеивающей среды, положенной на лист бумаги с шахматной текстурой.

Слева – стандартный режим, справа – рассеяние в среде, трактуемое как квазизеркальное. В обоих случаях  $BDD = 1$



$$+ \sum_{k,m,n=0}^{\infty} \hat{Q}^k \hat{F}_d \hat{T} \hat{Q}^m \hat{F}_d \hat{T} \hat{Q}^n \hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)}). \quad (16)$$

В этом выражении член вида  $\hat{Q}^k \hat{F}_d \hat{T} \hat{Q}^m \hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)})$  означает, что:

1. Завершающее (последнее перед камерой) преобразование света – это  $k \geq 0$  квазизеркальных преобразований с соответствующим переносом  $\hat{Q}^k = (\hat{F}_{qs} \hat{T})^k$ .

2. До того (т.е. дальше от камеры) излучение испытало *истинно диффузное* преобразование с соответствующим переносом  $\hat{F}_d \hat{T}$ .

3. До того (т.е. ещё дальше от камеры) излучение испытало  $m \geq 0$  квазизеркальных преобразований с соответствующим переносом  $\hat{Q}^m = (\hat{F}_{qs} \hat{T})^m$ .

4. Всё это действует на свёртку *истинно диффузной* компоненты  $BRDF$  с прямым и квазикаустическим освещением, т.е. на  $\hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)})$ .

Действие интегральных операторов  $\hat{F}_d$  и  $\hat{F}_{qs}$  можно вычислять с помощью метода Монте-Карло, трассируя лучи от камеры. При этом первое преобразование луча (по пути его из камеры) соответствует левому оператору в произведении, а последнее преобразование луча – правому.

Таким образом, наш член  $\hat{Q}^k \hat{F}_d \hat{T} \hat{Q}^m \hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)})$  оценивается по камерным лучам, которые **сначала** испытали квазизеркальных рассеяний  $k \geq 0$ , **затем** одно истинно диффузное, **затем** квазизеркальных рассеяний  $m \geq 0$  и **после** того взяли яркость согласно истинно диффузной части  $BRDF$  при прямом и квазикаустическом освещении (т.е. диффузное освещение игнорируется).

Подробный вывод приведён в [12].

Прочие члены уравнения (16) могут аналогичным образом вычисляться с помощью метода Монте-Карло на основе трасс от камеры. Это приводит к алгоритму обработки камерных лучей, в котором яркость точки встречи вычисляется так:

• до (и включая!) первого не чисто зеркального события –  $\hat{F} (E^{(0)} + E^{(qc)})$ ;

• после первого квазизеркального события и до второго истинно диффузного –  $\hat{F}_d (E^{(0)} + E^{(qc)})$ ;

• после второго истинно диффузного события –  $\hat{F}_d E$ ;

• на третьем истинно диффужном событии луч обрывается.

Описанное относится к случаю  $BDD = 2$ . Случай другого  $BDD$ , как и альтернативная форма (13), рассматриваются аналогично. Трассируем лучи от камеры до тех пор, пока они не испытают  $BDD + 1$  истинно диффузных рассеяний (или поглотятся ранее); дальше луч не трассируется. Когда луч попадает на поверхность, имеющую диффузную или квазизеркальную  $BRDF$ , он берёт свёртку части  $BRDF$  с частью освещённости:

• *Диффузное освещение* – всегда только с диффузным остатком  $BRDF$ .

• *Квазикаустическое освещение*

♦ **Основной вариант:**

• до первого квазизеркального рассеяния – с полной  $BRDF$ ;

• после – с диффузным остатком  $BRDF$ .

♦ **Альтернативный вариант:** всегда только с диффузным остатком  $BRDF$ .

• *Прямое и каустическое освещение*

♦ **Основной вариант:**

• до первого квазизеркального рассеяния – с полной  $BRDF$ ;

• после – с диффузным остатком  $BRDF$ .

♦ **Альтернативный вариант:**

• до первого диффузного рассеяния – с полной  $BRDF$ ;

• после – с диффузным остатком  $BRDF$ .

## 6. Объёмное рассеяние

### 6.1. Стандартный метод

В нём всё работает так же, как в случае поверхностей. Предположим для простоты, что  $BDD = 1$  и камера находится внутри рассеивающей среды. Тогда камерный луч распространяется в среде. И когда он испытывает первое объёмное рассеяние, мы собираем прямую и каустическую компоненты освещённости и свёртываем результат с фазовой функцией. В точке второго объёмного рассеяния берётся полная освещённость. После



второго диффузного рассеяния камерный луч далее не продолжается.

Рассмотрим теперь модельную сцену, в которой камера смотрит сквозь слой рассеивающей среды на некоторую освещённую диффузную поверхность. Пусть также среда непоглощающая и имеет большой коэффициент рассеяния, так что камерный луч претерпевает *много* актов рассеяния в ней до достижения этой поверхности. Ну и наконец, пусть фазовая функция узкая, так что каждое рассеяние лишь незначительно изменяет направление луча.

В стандартном методе с небольшим  $BDD$  камерный луч заканчивается недалеко от его входа в среду (т.е. от камеры), и луч вообще не достигает диффузной поверхности за ней. Кроме того, поскольку фазовая функция узкая, то свёртка её с освещённостью от поверхности сцены приводит к сильному шуму (см. п. 3).

Поэтому для снижения шума мы должны использовать большое  $BDD$ , чтобы камерный луч проходил сквозь среду и достигал поверхности за ней, и, кроме того, не собирать диффузное освещение в точках объёмного рассеяния. Однако это требует хранения всех актов объёмного рассеяния луча на его длинной трассе (поскольку там собираются прямое и каустическое освещение), что обычно весьма обременительно по памяти.

## 6.2. Квализеркальная среда

Применение кваализеркального подхода позволяет заметно улучшить ситуацию для сцен этого типа.

Предположим, что поверхность сцены не кваализеркальная (то есть, у неё не выделено кваализеркальной компоненты, обрабатываемой, как описано в конце п. 5). Пусть также *вся* фазовая функция трактуется как кваализеркальная, т.е. её истинно диффузная часть  $\hat{F}_d = 0$ . Тогда, куда камерный луч распространяется внутри рассеивающей среды он испытывает только кваализеркальные события, которые не увеличивают счётчика диффузных событий. В результате он распространяется в среде пока не покинет её, и в итоге достигает поверхности сцены.

Диффузное освещение теперь составляет излучение, отражённое от диффузной поверхности сцены; кваизаустика – это свет, испытавший хотя бы одно объёмное рассеяние (и произвольное число зеркальных рассеяний – но ни одного рассеяния на диффузных поверхностях).

Коль скоро  $\hat{F}_d = 0$ , основной вариант (см. конец п. 5) предполагает, что в точках объёмного рассеяния диффузное освещение (от поверхности сцены) игнорируется, а прямое, каустическое и кваизаустикальное освещение используются только в точке первого объёмного рассеяния.

В результате при любом  $BDD$  камерный луч покидает среду и достигает поверхности сцены. При этом запоминается только одно (первое) объёмное рассеяние, а в последующих точках яркость среды не берётся. Также нет сильного шума от свёртки узкой фазовой функции с диффузной освещённостью (от поверхности), но есть её свёртка с параметрами прямого, каустического и рассеянного лишь внутри среды типами освещения. Однако последние обычно не имеют широкой направленности и потому не приводят к сильному шуму.

Альтернативный вариант (см. конец п. 5) тут менее выгоден, поскольку прямое и каустическое освещение в нём берутся во всех точках объёмного рассеяния. Поэтому не-

обходимо хранить в памяти все точки объёмного рассеяния на длинной трассе, чтобы потом в них брать свёртку фазовой функции с параметрами прямого и каустического освещения из фотонных карт. В случае, если первой делается фаза трассировки от камеры, формирующая обратную фотонную карту, а лучи от источника не запоминаются и обрабатываются на ходу, это потребует неприемлемо большой памяти.

## 7. Результаты

### 7.1. Для поверхности

Вычисления для описанной в п. 3 модифицированной сцены «*Cornell Box*» в кваализеркальном режиме выполнены при  $BDD = 0$  при равных условиях и за одинаковое время (200 с), как и для стандартного режима. Результаты для стандартного режима и с применением кваализеркального метода показаны на рис. 1.

Видно, что при применении предложенного метода на стенках «*Cornell Box*» удалось добиться такого же пониженного шума, что и при стандартном методе с  $BDD = 0$ . При этом внизу параллелепипеда мы смогли снизить шум примерно так же, как и при стандартном методе с  $BDD = 1$ . В определённой мере тем самым получен наилучший результат.

### 7.2. Для объёмного рассеяния

Модельная сцена представляет собой пластину толщиной 3 мм, положенную на лист бумаги с шахматной текстурой и освещённую самосветящейся сферой над ней. Рассеивающая среда внутри пластины имеет показатель преломления 1,5, показатель рассеяния  $7,5 \text{ мм}^{-1}$  и фазовую функцию Хенри-Гринштейна [13] с параметром  $g = 0,9$ .

Изображения, вычисленные за равное время и при прочих одинаковых параметрах, приведены на рис. 2. Видно, что при использовании стандартного метода границы текстурных квадратиков *резкие*, а на самом деле они должны размываться. При использовании же кваализеркального представления фазовой функции эти границы размываются, что соответствует тому, что для реальной пластины мы видим в жизни.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jensen H.W. Global illumination using photon maps / in Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '96. – Wien: Springer-Verlag, 1996. – P. 21–30.
2. Jensen H.W., Christensen P. High quality rendering using ray tracing and photon mapping / in ACM SIGGRAPH 2007 Courses, SIGGRAPH '07, ACM, 2007.
3. Hachisuka T., Jensen H.W. Stochastic progressive photon mapping / in ACM SIGGRAPH Asia 2009 Papers, SIGGRAPH Asia '09, ACM, 2009. – P. 141:1–141:8.
4. Pharr M., Humphreys G. Physically Based Rendering, Second Edition: From Theory To Implementation. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2010.
5. Жданов Д.Д., Еришов С.В., Волобой А.Г. Адаптивный выбор глубины трассировки обратного луча в методе двунаправленной стохастической трассировки лучей / in Proceedings of 25-th International Conference on Computer Graphics and Vision, September 22–25, 2015. – P. 44–49.

6. *Vorba J.* Bidirectional photon mapping / in Proceedings of CESC 2011: The 15th Central European Seminar on Computer Graphics, SIGGRAPH '86, (Prague), Charles University, 2011.

7. *Ershov S.V., Zhdanov D.D., Voloboy A.G.* Estimation of noise in calculation of scattering medium luminance by mcrt // *Mathematica Montisnigri*. – 2019. – Vol. XLV. – P. 60–73.

8. *Georgiev I., Krivanek G.J., Davidovic T., Slusallek P.* Light transport simulation with vertex connection and merging // *ACM Trans. Graph.* – 2012. – Vol. 31, No. 6. – P. 192:1–192:10.

9. *Popov S., Ramamoorthi R., Durand F., Drettakis G.* Probabilistic Connections for Bidirectional Path Tracing // *Computer Graphics Forum* (Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering). – 2015. – Vol. 34, No. 4.

10. *Dodik N.* Implementing probabilistic connections for bidirectional path tracing in the Mitsuba Renderer / Bachelor Thesis. – Wien: Technische Universität Wien, 2017.

11. *Kajiya J.T.* The rendering equation / in Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '86. – 1986. – Vol. 20, No. 4. – P. 143–150.

12. *Ershov S.V., Zhdanov D.D., Voloboy A.G., Sorokin M.I.* Treating diffuse elements as quasi-specular to reduce noise in bi-directional ray tracing // Preprint of the Keldysh Institute of Applied Mathematics. – 2018. – No. 122. – 30 p.

13. *Pomraning G.* On the Henyey-Greenstein approximation to scattering phase functions // *JQSRT*. – 1988. – Vol. 39, No. 2. – P. 109–113.

## Светочувствительный белок чувствует вкус

Мы видим благодаря светочувствительным клеткам сетчатки глаза, у которых есть специальные светочувствительные белки под названием опсины. Под действием света опсины меняют пространственную форму, из-за чего меняется концентрация ионов по обе стороны клеточной мембраны. В темноте постоянные потоки ионов подавляют активность нейронов (а клетки сетчатки – это нервные клетки); но когда опсины принимают свет и меняют форму, они закрывают некоторые ионные каналы, и нейрон получает возможность сгенерировать сигнал.

Известно очень много разновидностей опсинов: разные их типы настроены на световые волны разной длины, кроме того, они у разных организмов свои. Но до поры до времени никто не думал, что опсины могут делать что-то ещё, кроме как чувствовать свет – пока в 2011 г. Крэйг Монтелл (*Craig Montell*) и его коллеги из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре не опубликовали работу, в которой говорилось, что опсины помогают дрозофилам чувствовать небольшие изменения температуры в пределах, когда температура ещё комфортна для самих мух.

Прошло ещё несколько лет, и вот сейчас в «*Current Biology*» вышла новая статья Монтелла и его сотрудников, которые утверждают, что опсины помогают дрозофилам чувствовать ещё и вкус. Исследователи изучали вкусовые рецепторы дрозофил, действуя на них аристороховой кислотой (АК) – токсичным и горьким веществом, которое содержится в некоторых растениях.

Высокие концентрации АК включали вкусовые рецепторы *TRPA1*, вызывавшие у насекомых отвращение. Однако мухи явно чувствовали неприятную горечь и при низких концентрациях АК, которых было недостаточно, чтобы действовать на обычные вкусовые рецепторы. Когда дрозофилам предлагали просто сладкий раствор и сладкий раствор с примесью горького вещества, мухи выбирали первый, без примеси.

Если у дрозофил во вкусовых нейронах молекулярно-генетическими методами отключали гены опсинов – все три типа, что у них есть – то дрозофилы переставали отличать сладкое от сладкого с горькой примесью, но продолжали чувствовать большую концентрацию горечи. То есть всё дело было именно в светочувствительных белках. Дальнейшие эксперименты показали, что АК связывается с опсинами в том же месте, где с ними связывается ретиналь – альдегид витамина А, который ловит световые волны и помогает опсину менять пространственную форму, чтобы дать клетке возможность сгенерировать импульс. То есть опсины чувствуют горечь без своего светочувствительного модуля, при этом усиливают «горький» сигнал, позволяя обнаруживать горечь даже в очень небольшой концентрации.

Может быть, у светочувствительных белков есть ещё какие-нибудь умения: может, они способны воспринимать разные виды горьких молекул, может, они участвуют и в других вкусовых ощущениях, и т.д. – дальнейшие исследования покажут, так это или не так. Авторы работы полагают, что вкусовая функция была у опсинов эволюционно первой, так как отличать горький яд от безопасной пищи более важно, чем отличать свет от тьмы. Потом, когда живые организмы стали сложнее и всё же возникла необходимость отличать свет от тьмы, к этой работе удалось приспособить уже существующий вкусовой рецептор, снабдив его добавочной молекулой-придатком для улавливания световых волн.

nkj, ru  
04.2020



**Ершов Сергей Валентинович**, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1988 г. физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Старший научный сотрудник отдела компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, численные методы математической физики, методы Монте Карло, трассировка лучей, задачи дифракции



**Жданов Дмитрий Дмитриевич**, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1984 г. ЛИТМО по специальности «Оптическое и оптико-электронное приборостроение». Доцент Университета ИТМО. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, виртуальная и дополненная реальность



**Волобой Алексей Геннадьевич**, доктор физ.-мат. наук. Окончил в 1988 г. механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Ведущий научный сотрудник отдела компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: компьютерная графика, вычислительная оптика, трассировка лучей, моделирование освещённости



**Дерябин Николай Борисович**, математик. Окончил в 1977 г. механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Научный сотрудник отдела компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: компьютерная графика, графические драйверы



# Дешёвый датчик освещённости для систем управления совмещённым освещением<sup>1</sup>

М. БАГ, С. МАЗУМДАР, К.К. РЭЙ

Джадавпурский университет, Колката, Индия  
E-mails: bag12moutusi@mail.com, saswaty.mazumdar@gmail.com, kalyancs.ray.com

## Аннотация

Разработан дешёвый двухпроводный датчик освещённости, удовлетворяющий требованиям промышленных стандартов на токовые петли 4–20 мА. Этот датчик предназначен для систем управления внутренним совмещённым освещением и других областей применения. В базовом варианте этого датчика используются фоторезистор из сульфида кадмия ( $CdS$ ), относительная спектральная чувствительность которого почти совпадает со спектральной чувствительностью глаза человека. Описан способ калибровки датчика и приведены результаты измерений его статических и динамических характеристик.

**Ключевые слова:** использование естественного света, относительная спектральная чувствительность, фоторезистор, кремниевый  $p-i-n$  фотодиод, управляемый источник втекающего тока, инфракрасный полосно-заграждающий фильтр, статические характеристики, динамические характеристики, контрольные точки.

## 1. Введение

### 1.1. Общие сведения

Двухпроводные датчики широко используются для проведения измерений часто встречающихся параметров, таких как температура, давление, расход жидкости, уровень и т.д. [1–4]. Важнейшей причиной их популярности является отсутствие каких бы то ни было внешних источников питания, низкая стоимость подключения и простота монтажа. Необходимость использования двухпроводных датчиков для измерения освещённости стала очевидной при создании совмещённых осветительных установок, в которых естественный свет дополняет регулируемый искусственный свет светильников со светодиодами

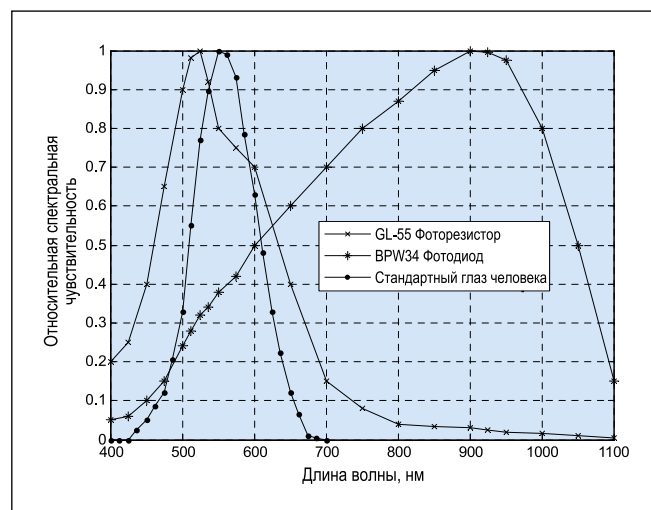
(СД), что позволяет создавать высокоэнергоэффективные осветительные установки [5–9, 20, 21]. Так как подходящие датчики, которые имеются в продаже, оказались или не очень доступными, или слишком дорогими, то возникла потребность в разработке датчика с высоким отношением эффективности к стоимости. Для обеспечения равномерности освещённости может потребоваться много датчиков. Это делает стоимость датчиков и их подключения очень важными для проекта освещения факторами.

### 1.2. Фоторезистор как датчик освещённости

Наша первоначальная попытка разработать дешёвый прибор для косвенного измерения освещённости в связанных с использованием естественного света областях применения склонялась в сторону использования кремниевый  $p-i-n$  фотодиода ( $SIPD$ ) в качестве базового чувствительного элемента. Основанием для этого послужила явно высокая линейность зависимости фототока короткого замыкания от освещённости [13]. Однако в процессе разработки стали очевидными некоторые недостатки этого датчика. Во-первых, усилитель, необходимый для усиления фотото-

ка до приемлемого тока или напряжения, требовал наличия биполярного источника питания, что, в свою очередь, требовало наличия двух проводов (не считая заземляющего провода). Вторым недостатком заключался в необходимости использования расположенного на плате преобразователя положительного напряжения в отрицательное, что приводит к увеличению сложности, стоимости и тока питания устройства. Ток питания, превышающий 4 мА, говорит о невозможности обеспечить выходной сигнал, удовлетворяющий требованиям промышленных стандартов на двухпроводные токовые петли 4–20 мА. Это означает, что следует удовлетвориться выходными сигналами 0–10 В или 0–5 В, со всеми сопутствующими недостатками датчиков с выходным сигналом напряжения (*voltage-type sensor*) [3]. Подобный датчик будет нуждаться в четырёх или по меньшей мере трёх проводах для подключения его к удалённому прибору или контроллеру. Вторым фактором, сделавшим  $SIPD$  неподходящим для разрабатываемого прибора, было большое несоответствие между его спектральной чувствительностью и спектральной чувствительностью глаза человека. Относительная спектральная чувствительность типичного  $SIPD$  приведена на рис. 1. Средний глаз человека реагирует на длины волн от 380 до 780 нм с максимумом на длине волны 555 нм. 10 % от пикового значения чувствительности соответствуют длинам волн 472 и 651 нм. Как показано на рис. 1, 10 % от пикового значения чувствительности  $SIPD$  соответствует длине волны примерно 1080 нм, находящейся в инфракрас-

Рис. 1. Относительная спектральная чувствительность типичного  $Si PIN$  BPW 34 фотодиода, фоторезистора и стандартного глаза человека



<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского

ной области, что делает этот фотодиод чувствительным к длинам волн за пределами видимой области спектра. Если использовать *SIPD* без соответствующего ИК фильтра, то при воздействии излучения с ИК составляющей (например, естественного света или света ламп накаливания) он генерирует большой выходной сигнал, чем при воздействии обеспечивающего ту же освещённость излучения без ИК составляющей (например, света белых СД или люминесцентных ламп). Необходимые ИК фильтры дороги и не общедоступны, так что это направление было отвергнуто. Были анонсированы фотодиоды со встроенными светофильтрами, например, *TEMT6200FX01* [14], спектральные чувствительности которых почти совпадают со спектральной чувствительностью глаза человека. Однако возможность их приобретения и их стоимость не позволили нам использовать их в данной работе.

Максимум спектральной чувствительности глаза человека для дневного зрения соответствует длине волны 555 нм. Относительные спектральные чувствительности (*RSR*) *CdS* фотосопротивления и кремниевого *PIN* фотодиода приведены на рис. 1. *RSR* обычного фотосопротивления [15, 16] имеет максимум на длине волны 555 нм. Кроме того, на длине волны 800 нм, которая находится за пределами видимой области спектра, *RSR* уменьшается до всего лишь 0,04. В отличие от этого, на этой длине волны *RSR* кремниевого *PIN* фотодиода равна 0,87, что совершенно неприемлемо.

Основное уравнение, описывающее зависимость сопротивления фоторезистора *R* от его освещённости *E*, имеет вид [16]:

$$R(E) \cdot E^\gamma = K, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – константа, известная как индекс освещённости (*illuminance index*) фотосопротивления, *K* – константа.

Производители получают значения  $\gamma$  на основе результатов двух измерений: при  $E_1 = 10$  лк и при  $E_2 = 100$  лк, так что

$$R(10)/R(100) = 10^\gamma$$

или

$$\gamma = \log [R(10)/R(100)]. \quad (3)$$

Экспериментальный метод определения приблизительного значения  $\gamma$  описан в разделе 3.

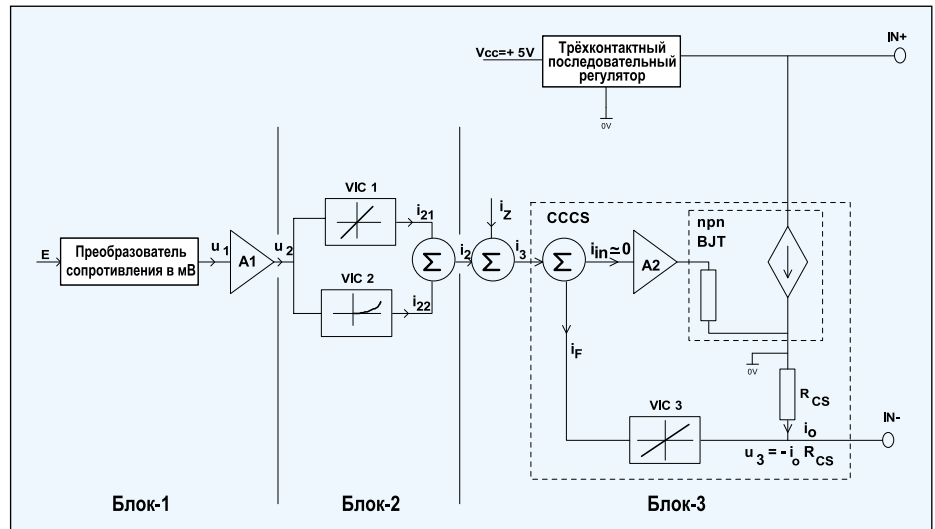


Рис. 2. Упрощённая блок-схема датчика (CCCS – Источник втекающего тока с регулировкой по току, *pnp BJT* – биполярный транзистор типа *n-p-n*)

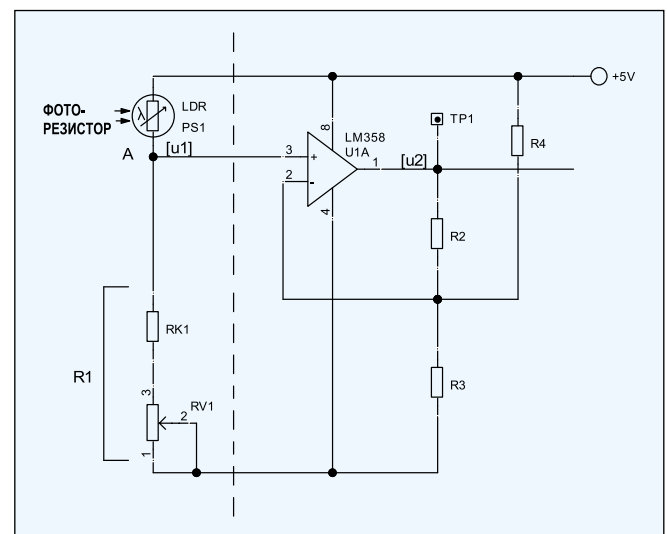


Рис. 3. Преобразователь освещённости в напряжение и линейный усилитель

## 2. Принцип работы датчика

### 2.1. Описание блок-схемы

Принцип работы датчика можно понять, последовательно рассмотрев три его блока (рис. 2). Первый блок преобразует освещённость *E* в небольшое напряжение  $u_1$  с типичным наибольшим значением 90 мВ. Это напряжение усиливается до более высокого уровня  $u_2$  при помощи усилителя *A1*. Типичное наибольшее значение  $u_2$  равно примерно 1 В. Для улучшения линейности преобразования при низких значениях *E* предусмотрено фиксированное напряжение смещения. Второй блок генерирует два тока –  $i_{21}$  и  $i_{22}$  – при помощи двух двухпроводных компонентов, обозначенных как *VIC1* и *VIC2*. Фактически, *VIC1* представляет собой переменный линейный резистор, тогда как *VIC2* –

это нелинейный резистор. *VIC1* и *VIC2* выбирают таким образом, чтобы равная  $i_2$  сумма токов  $i_{21}$  и  $i_{22}$  была линейной функцией освещённости *E*.

Третий блок использует сумму тока  $i_2$  и регулируемого тока  $i_z$  для получения тока  $i_3$ . Затем ток  $i_3$  подаётся в источник втекающего тока с регулировкой по току (*Current Controlled Current Sink*), так что ток  $i_o$ , протекающий между контактами преобразователя *IN+* и *IN-*, оказывается усиленной копией тока  $i_3$ . В этом блоке используются операционный усилитель и биполярный транзистор средней мощности типа *n-p-n*. Подробное объяснение приведено в конце этого раздела.

Теперь можно рассмотреть выражение для расчёта выходного тока  $i_o$ . Очевидно, что  $i_o$  равен

$$i_o = G_i \cdot (i_2 + i_z), \quad (4)$$



где  $G_i$  – коэффициент усиления источника втекающего тока с регулировкой по току.

Так как  $i_2$  пропорционален  $E$ , то уравнение (4) можно переписать в виде:

$$i_o = K_1 \cdot E + K_2, \quad (5)$$

где  $K_1$  – константа и  $K_2 = G_i \cdot i_z$  – тоже константа. В идеальном преобразователе  $K_2$  соответствует части «фаза – ноль» выходного тока, которая обычно равна 4 мА.

## 2.2. Реализация электрических схем функциональных блоков

Электрическая схема первого блока приведена на рис. 3. Фототок фоторезистора, который зависит от освещённости  $E$ , протекает через переменный резистор  $R_1$  и создаёт входное напряжение  $u_1$  усилителя [17]. Сопротивление резистора должно быть мало по сравнению с сопротивлением фоторезистора при наибольшем измеряемом значении  $E$ . При напряжении питания  $V_{cc} = 5$  В величина  $u_1$  поддерживается в пределах 90 мВ. Это гарантирует, что напряжение на фоторезисторе остаётся почти постоянным.

Усилитель использует половину обычного операционного усилителя  $LM358$  в инвертирующей конфигурации [17, 18]. При отсутствии резистора  $R_4$  коэффициент усиления усилителя  $G_v = u_2 / u_1$  описывается выражением:

$$G_v = 1 + R_2/R_3. \quad (6)$$

Однако при наличии в схеме резистора  $R_4$  выражение для расчёта  $u_2$  принимает вид:

$$u_2 = (1 + R_2/R_3) \cdot u_1 - (R_2/R_4) \cdot V_{cc}.$$

Это уравнение преобразуется в:

$$u_2 = G_v \cdot u_1 + u_{20}, \quad (7)$$

где

$$u_{20} = - (R_2/R_4) \cdot V_{cc}. \quad (8)$$

В данной работе использовались значения  $R_2$  и  $R_3$ , равные 10 и 1 Ком соответственно, что позволило получить равное 11 значение  $G_v$ . Равное 1МОм фиксированное значение  $R_4$  обеспечило равное –5 мВ фиксирован-

Рис. 4. Зависимость выходного напряжения усилителя 1 от освещённости  $E$

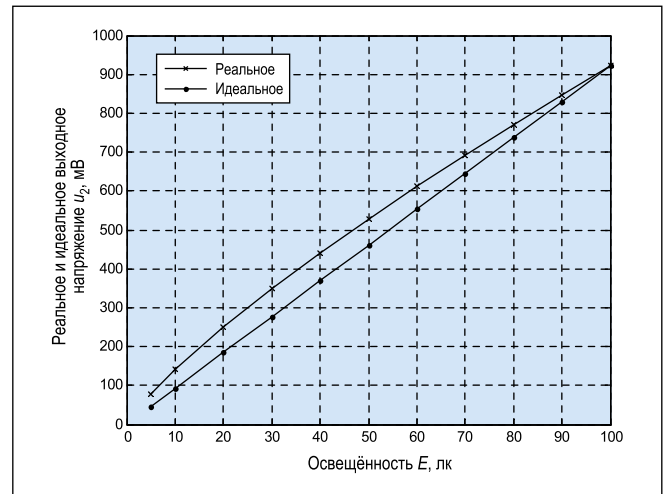
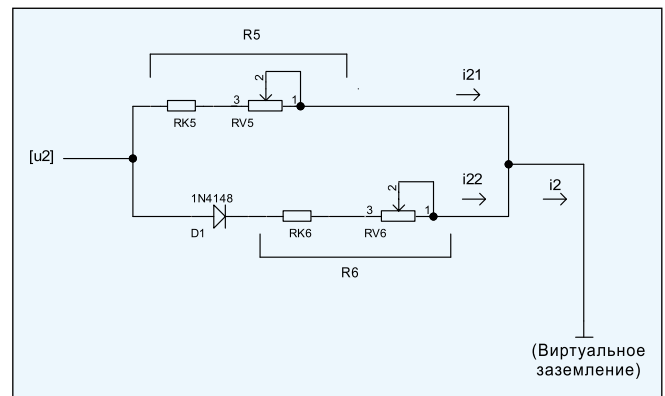


Рис. 5. Подключённые к усилителю линейный и нелинейный преобразователи тока



ное выходное напряжение смещения нуля, что достаточно хорошо для всех преобразователей. Величина  $RV1$ , регулируемой части  $R_1$ , подбиралась таким образом, чтобы при 40 % от максимального измеряемого значения освещённости  $E_{FS}$  выходное напряжение  $u_2$  было равно 440 мВ.

На рис. 4 приведена зависимость  $u_2$  от  $E$  для типичного фоторезистора с  $\gamma = 0,81$  и  $R(100) = 7,1$  кОм. Как можно заметить, это нелинейная зависимость. Максимальное отклонение, равное примерно 72 мВ, имеет место при примерно 40 % от интервала изменения  $E$ . Наклон графика  $u_2(E)$  монотонно уменьшается по мере увеличения  $E$ . Последнее справедливо независимо от значений  $\gamma$  и  $R(100)$ .

Электрическая схема второго блока приведена на рис. 5. Потенциал вывода заземления, расположенного в правой части этого рисунка, очень близок к потенциалу Земли по причинам, которые приведены в следующем разделе. Ток  $i_{21}$ , протекающий в верхней ветви схемы, описывается выражением:

$$i_{21} = u_2/R_5, \quad (9)$$

где  $R_5$  – переменное сопротивление, равное сумме сопротивлений соединённых последовательно резисторов  $RK5$  и  $RV5$ . Соответствующее любому  $u_2$  значение  $i_{21}$  может быть подобрано посредством регулировки  $R_5$ . В соответствии с уравнением (9), зависимость  $i_{21}$  от  $E$  имеет ту же форму, что и приведённая на рис. 4 зависимость. Так как  $du_2/dE$  является монотонно убывающей функцией  $E$  и  $i_{21} = u_2/R_5$ , то функция  $i_{21}(E)$  имеет тот же вид. Дополнительную нелинейность, характеризующуюся непрерывным увеличением наклона графика, вносит преобразователь тока в напряжение  $VIC2$ . Ход последней дополнительной функции должен быть таким, чтобы сумма  $i_2$  токов  $i_{21}$  и  $i_{22}$  оказалась линейной функцией  $E$  во всём рабочем диапазоне.

Считая  $D1$  идеальным диодом с фиксированным пороговым напряжением  $V_F$  и пренебрежимо малым динамическим сопротивлением, получаем, что

$$i_{22} = 0 \text{ при } u_2 < V_F$$

$$i_{22} = (u_2 - V_F)/R_6 \text{ при } u_2 \geq V_F, \quad (10)$$

Рис. 6. Зависимость  $i_{22}$  от  $u_2$  при разных значениях  $R_6$

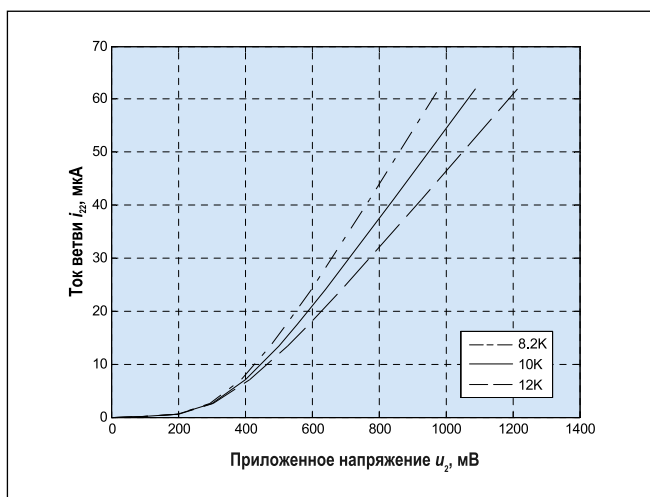
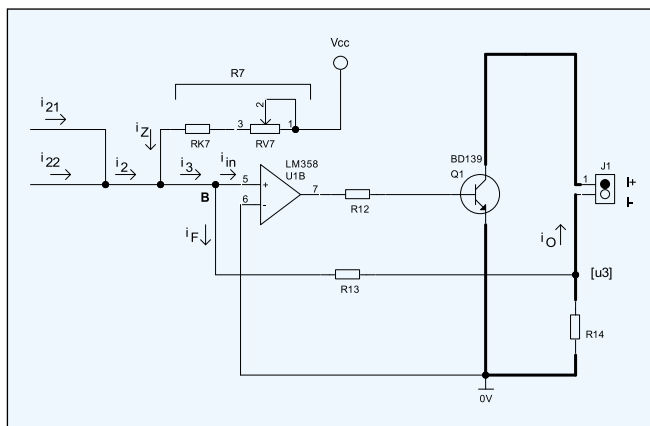


Рис. 7. Сумматор тока и выходной преобразователь тока



где  $R_6$  – сумма фиксированного сопротивления  $R_{K6}$  и переменного сопротивления  $R_{V6}$ .

Легко построить описываемую уравнением (10) зависимость  $i_{22}$  от  $u_2$ . Она будет иметь нулевой наклон до того момента, как напряжение достигнет значения  $V_F$ , и  $1/R_6$  при больших значениях напряжения. При использовании реального маломощного диода, например,  $1N4148$ , такое резкое изменение наклона не наблюдается. Зависимости  $i_{22}(u_2)$  при трёх разных, равных 8,2, 10 и 12 кОм, сопротивлениях резистора  $R_6$ , включённого последовательно с  $1N4148$ , приведены на рис. 6. Заметно, что при фиксированном  $u_2$  ток  $i_{22}$  при увеличении  $R_6$  уменьшается, а при фиксированном  $R_6$  наклон графика монотонно увеличивается по мере увеличения  $u_2$ .

Теперь рассмотрим реализацию электрической схемы 3-го блока. Выходной каскад датчика, который играет роль управляемого источника втекающего тока [19], показан на рис. 7. Первый из двух выходных контактов, которые обозначены как  $I+$  и  $I-$ , соединён с плюсом источника напряжения 8–24 В, а второй контакт через

фоторезистор  $R_{CS}$  (на рисунке не показан) соединён с земляным выводом этого же источника. Падение напряжения на  $R_{CS}$  используется для измерения выходного тока датчика. Путь прохождения выходного тока  $i_o$  обозначен на этом рисунке жирной линией. В результате протекания тока  $i_o$  на  $R_{14}$  формируется напряжение  $u_3$ :

$$u_3 = -i_o \cdot R_{14}. \quad (11)$$

Это напряжение, в свою очередь, приводит к образованию тока  $i_F$ , текущего в указанном направлении и равного:

$$i_F = u_3/R_{13}. \quad (12)$$

Из уравнений (11) и (12) следует, что

$$i_o = i_F \cdot G_I, \quad (13)$$

где  $G_I$  – коэффициент усиления по току, равный

$$G_I = R_{13}/R_{14}. \quad (14)$$

Требуемую зависимость выходного тока от токов  $i_2$  и  $i_Z$  можно полу-

чить, применив к узлу  $B$  закон Кирхгофа, который можно записать в виде  $i_2 + i_Z = i_F$ , так как входным током  $i_{in}$  неинвертирующего операционного усилителя  $U1$  можно пренебречь по сравнению с остальными членами. Воспользовавшись уравнением (13) и тем, что

$$i_Z = V_{CC}/R_7, \quad (15)$$

получаем:

$$i_o = G_I \cdot (i_2 + V_{CC}/R_7). \quad (16)$$

Уравнение (16) говорит о том, что так как при нулевой освещённости ( $E = 0$ ) и  $i_{21}$ , и  $i_{22}$  равны нулю, то при этой освещённости выходной ток становится равным  $V_{CC}/R_7$ , и это значение можно сделать равным 4 мА посредством настройки переменной составляющей  $R_7$ , а именно,  $R_{V7}$ . Как будет показано ниже, это будет одним из этапов калибровки датчика.

### 3. Приблизительное определение $\gamma$ и выбор подходящего фоторезистора

Если считать, что напряжение  $u_1$  гораздо меньше, чем  $V_{CC}$ , то при 10 и 100 лк напряжение  $u_1$  будет, соответственно, равно

$$u_1(10) \sim V_{CC} \cdot R_1/R(10), \quad (17)$$

$$u_1(100) \sim V_{CC} \cdot R_1/R(100), \quad (18)$$

где  $\sim$  означает «приблизительно равно».

Разделив (18) на (17), получаем:

$$u_1(100)/u_1(10) \sim R(10)/R(100). \quad (19)$$

Так как  $u_1$  and  $u_2$  связаны друг с другом постоянным коэффициентом усиления  $G_v$ , то при отсутствии выходного напряжения смещения  $u_{20}$ , что можно обеспечить, исключив  $R_4$  из схемы, изображённой на рис. 3, левую часть уравнения (19) можно заменить на  $u_2(100)/u_2(10)$ . В результате получаем:

$$u_2(100)/u_2(10) \sim R(10)/R(100). \quad (20)$$

Совместив уравнения (20) и (3), получаем:

$$\gamma \sim \log [u_2(100)/u_2(10)]. \quad (21)$$



Рис. 8. Реальная и идеальная выходные характеристики (а) и погрешность датчика (б)

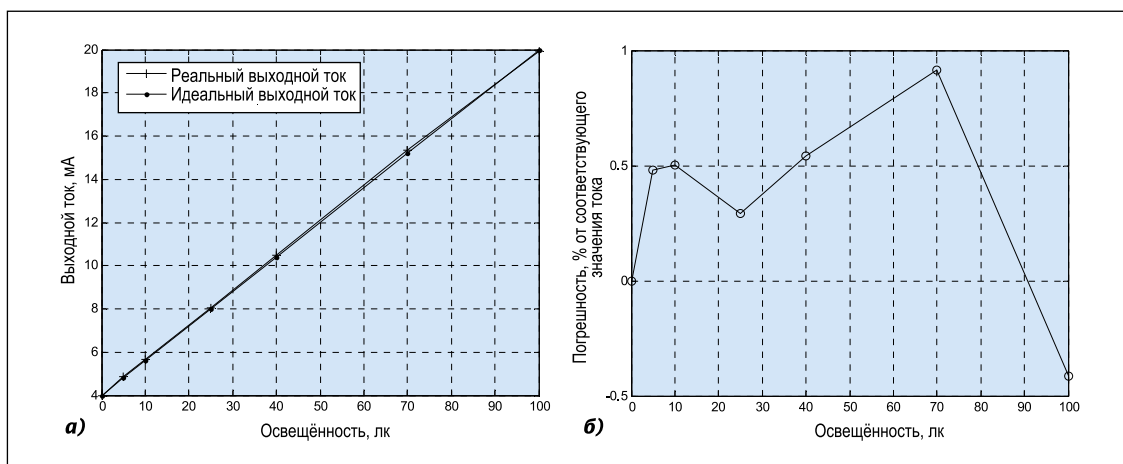
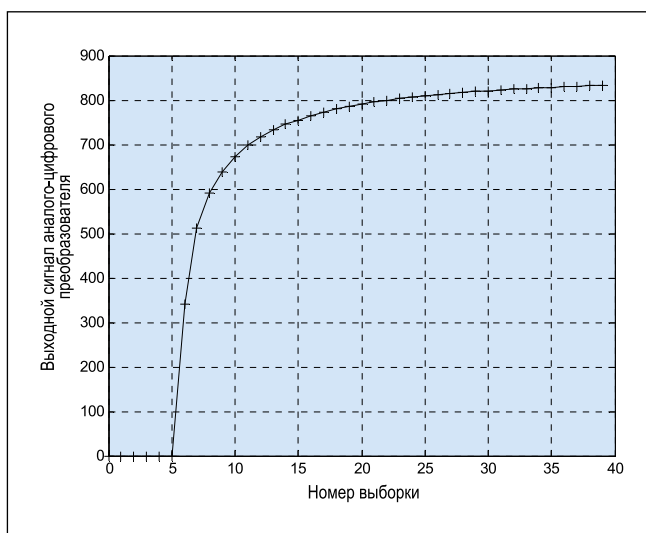


Рис. 9. Реакция датчика на ступенчатое воздействие



Уравнение (21) обеспечивает удобную возможность определения примерного значения  $\gamma$ . Наш опыт показывает, что если примерное значение  $\gamma$  лежит в пределах от 0,7 до 0,8, то датчик имеет линейность, лучше чем 1 %. Так что фоторезисторы, в случае которых  $\gamma$  лежит за пределами этого диапазона, были отвергнуты.

#### 4. Калибровка датчика

Для калибровки измерительная головка датчика помещалась в светонепроницаемую коробку в непосредственной близости от калиброванного люксметра. СД источник белого света помещался над датчиком, и токи СД выбирались таким образом, чтобы замыкая два обозначенных соответствующим образом выключателя, можно было обеспечить освещённости, равные 40 и 100 лк. Размыкание обоих выключателей обеспечивало нулевую освещённость датчика. Контакты датчика  $IN+$  и  $IN-$  соединены с источником постоянного тока на-

пряжением 12 В через миллиамперметр. Калибровка датчика производилась в следующей последовательности:

1. Обеспечивали освещённость, равную 0 лк.  $RV7$  (рис. 7) регулировали таким образом, чтобы  $i_o = 4$  мА.

2. Поддерживали максимальное значение  $RV6$ .

3. Обеспечивали освещённость, равную  $E = 100$  лк, а  $RV5$  (рис. 5) регулировали таким образом, чтобы ток  $i_o$  стал равным 90 % от своего верхнего предела измерения, то есть 18 мА.

4. Обеспечивали освещённость, равную  $E = 40$  лк, а  $RV6$  (рис. 5) регулировали таким образом, чтобы ток  $i_o$  стал равным  $(4 + 0,4 \cdot 16)$ , то есть 10,4 мА.

5. Обеспечивали освещённость, равную  $E = 100$  лк, а  $RV5$  (рис. 5) регулировали таким образом, чтобы ток  $i_o$  стал равным 20 мА.

6. Этапы 4 и 5 повторяли до тех пор, пока датчик не был откалиброван и при 40, и при 100 лк.

Работа датчика во всём диапазоне 0–100 лк описана в следующем разделе.

### 5. Экспериментальные результаты

Приведённые в этом разделе результаты были получены применительно к датчику с фоторезистором, у которого величина  $\gamma$ , определённая описанным в разделе 3 методом, была равна 0,78.

#### 5.1. Статические характеристики

Идеальная и реальная зависимости выходного тока датчика от освещённости приведены на рис. 8а, на котором экспериментальные точки соответствуют освещённостям 0, 5, 10, 25, 40, 70 и 100 лк. Погрешность измерений настолько мала, что её нельзя точно отобразить на этом графике, так что зависимость погрешности измерений от освещённости приведена на рис. 8б. Можно заметить, что максимальная погрешность, соответствующая току 16 мА, составляла менее чем 1 %.

#### 5.2. Динамические характеристики

Были проведены эксперименты, целью которых было определение постоянной времени применительно к модели первого порядка. Выходной ток пропускали через резистор с сопротивлением 100 Ом. Результирующее падение напряжения преобразовывалось в число при помощи аналого-цифрового преобразователя с разрядностью 10 бит. Освещённость ступенчато изменяли в интервале от



Рис. 10. Фотография типичного настенного датчика

0 до 100 лк, и соответствующие выходные сигналы аналого-цифрового преобразователя запоминали на протяжении 800 мс с интервалом 20 мс. График зависимости запомненных значений от номера выборки приведён на рис. 9, где ступенчатое изменение освещённости соответствует моменту времени 100 мс. Учитывая, что соответствующий установившемуся режиму выходной сигнал аналого-цифрового преобразователя равен 840, получаем, что постоянная времени датчика равна примерно 40 мс, что равно времени, требующемуся для достижения уровня, соответствующего 0,632 от установившегося значения.

## 6. Заключение

### 6.1. Реализация датчика

Были изготовлены два варианта датчика, в которых использовались фоторезисторы и соответствующие электрические схемы. Первый из них предназначался для установки на стенах, а второй – на потолке. Фотография настенного варианта приведена на рис. 10. Головка датчика располагается на дне показанного на рисунке цилиндра диаметром 25 мм и длиной 30 мм. Ось цилиндра направлена под углом 45° к белой матовой горизонтальной площадке. Свет, поступающий на площадку от находящихся в помещении источников света, отражается на датчик. В типичной системе управления освещением выходные сигналы нескольких датчиков могут совмещаться для расчёта освещён-

стей в нескольких представляющих интерес точках помещения.

Другой вариант датчика, который предназначен для установки на потолке, имеет более простую конструкцию. В этом случае фоторезистор помещён на дне цилиндра диаметром 20 мм и длиной 20 мм, открытый конец которого направлен в сторону пола. В результате получается коническая область с полным углом наблюдения примерно 53°. Выходной сигнал этого датчика зависит от освещённости на рабочей плоскости, попадающей в поле зрения прибора.

### 6.2. Применение

Описанные в данной статье датчики можно использовать там, где основными требованиями являются дешевизна, двухпроводное подключение и не непосредственное размещение (на стенах или потолке) [11]. Кроме того, благодаря применению имеющих низкую себестоимость компонентов, затраты на материалы у этих датчиков очень малы по сравнению с имеющимися в продаже датчиками. Последнее требование обусловлено тем обстоятельством, что в большинстве случаев необходимые датчики невозможно разместить непосредственно на рабочей плоскости.

Разработанный датчик предназначен для совмещённых осветительных установок с обратной связью, в которых естественный свет дополняет регулируемое СД освещение. Этот подход к созданию устройств управления совмещённым внутренним освещением делает возможными существенную экономию электроэнергии и равномерность освещённости в заданных контрольных точках рабочей плоскости [10, 12]. Схема, предлагаемая для помещения размером 6,2 x 4,1 м с односторонним расположением окон, включает в себя шесть потолочных светильников с СД и 4 настенных датчика. В помещении заданы 6 контрольных точек, в которых освещённость, обеспечиваемая совместным действием естественного и искусственного света, должна поддерживаться на заданных уровнях. Информация об освещённости, поступающая от этих четырёх датчиков, преобразуется в шесть значений освещённости в контрольных точках при помощи соответствующих матричных преобразований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liptak, B.G. Instrument Engineers Handbook. 4<sup>th</sup> Edition. – Boca Raton, London, New York, Washington: D.C.: CRC Press, 2003.
2. Webster, J.G. The Measurement, Instrumentation And Sensors Hand book. – N.W., Boca Raton: CRC Press, and IEEE Press, 1999.
3. dos Reis Filho, C.A. An integrated 4–20 mA two-wire transmitter with intrinsic temperatures sensing capability // IEEE Trans. Solid-State Circuits. – 1989. – Vol. 24, No. 4. – P. 1136–1142.
4. Murata Power Solutions, DMS Application Note 20: 4–20 mA Current Loop Primes. [Online]. Available: [www.murata-ps.com/support](http://www.murata-ps.com/support).
5. Li, S., Pandharipande, A. Daylight sensing LED lighting system // IEEE sensors Journal. – 2016. – Vol. 16, No. 9. – P. 3216–3223.
6. Pandharipande, A., Li, S. Light-harvesting wireless sensors for indoor lighting control // IEEE sensor Journal. – 2013. – Vol. 13, No. 12. – P. 4599–4606.
7. Pandharipande, A., Caicedo, D. Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches // Energy Buildings. – 2015. – Vol. 104, No. 10. – P. 369–377.
8. Caicedo, D., Pandharipande, A., Willems, F. M.J. Light sensor calibration and dimming sequence design in distributed lighting control systems // Proc. IEEE 11<sup>th</sup> Int. Conf. Netw. Sens. Control (ICNSC), Apr. 2014. – P. 344–349.
9. Caicedo, D., Pandharipande, A., Willems, F. M.J. Illumination gain estimation and tracking in a distributed lighting control system // Proc. IEEE Multi-Conf. Syst. Control (MSC), Oct. 2014. – P. 1650–1655.
10. Pandharipande, A., Li, S. Illumination and light sensing for daylight adaptation with an LED array: Proof-of-principle // Proc. 39<sup>th</sup> Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON), Nov. 2013. – P. 6081–6086.
11. Dietz, P., Yerazunis, W., Leigh, D. Very low-cost sensing and communication using bi-directional LEDs // Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Ubiquitous Comput, Oct. 2003. – P. 175–191.
12. Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays // Proc. Power Electron. Conf. (COBEP), 2009. – P. 1244–1254.
13. BPW34 datasheet, Vishay Semiconductors. [Online]. Available: [www.vishay.com/doc?91000.PDF](http://www.vishay.com/doc?91000.PDF).
14. TMT6200FX01 datasheet, Vishay Semiconductors. [Online]. Available: [www.vishay.com/doc?91000](http://www.vishay.com/doc?91000).
15. Plastic coated CdS photocells. [Online]. Available: [www.selcoproducts.com](http://www.selcoproducts.com).
16. PGM CDS Photo resistors, version 2010. [Online]. Available: [www.token.com/tw](http://www.token.com/tw).
17. Sedra, A.S., Smith, K.C. Microelectronic Circuit. – New York: Oxford University press, 1998.



18. *Franco, S.* Design with operational amplifiers and analog integrated circuits. – NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.

19. *Analogue IC design: the current-mode approach.* Ed. Toumazou, C., Lidgey, F. J., Haigh, D. G. – London: IEE, Peter Peregrinus Ltd, April 1990.

20. *Boscarino, G., Moallem, M.* Daylighting control and simulation for LED-based energy-efficient lighting systems // IEEE transactions on industrial informatics. – 2016. – Vol. 12, No. 1. – P. 301–308.

21. *Boer, K.W.* Cadmium sulfide enhances solar cell efficiency // Energy conversion and management. – 2011. – Vol. 52. – P. 426–430.



**Моутуси Баг (Moutusi Bag),** *M. Tech. (2010 г.). Аспирант Джадавпурского университета, Индия (Ph.D.). Область научных интересов: системы управления совмещённым внутренним*

*освещением и основанные на солнечной энергии осветительные установки*



**Сасвати Мазумдар (Saswati Mazumdar),** *Ph.D. (1996 г.). Профессор Джадавпурского университета, Индия. Имеет 33-летний опыт исследовательской и преподавательской работы в области светотехники. Область научных интересов включает в себя системы управления осветительными установками, осветительными установками с возобновляемыми источниками энергии, умные осветительные установки, системы связи на основе СД и лазеров, проектирование внутреннего и наружного освещения, управление цветом в современных осветительных установках*

*осветительными установками, осветительными установками с возобновляемыми источниками энергии, умные осветительные установки, системы связи на основе СД и лазеров, проектирование внутреннего и наружного освещения, управление цветом в современных осветительных установках*



**Кальян Кумар Рэй (Kalyan Kumar Ray),** *Ph.D. (1979 г.). В течение 39 лет работал в Джадавпурском университете и ушёл на пенсию с должности профессора. В настоящее время консультирует компании, производящие электронные системы. Область научных интересов включает в себя управление мощными электронными преобразователями, встроенные системы управления и измерительные приборы, преобразование солнечного излучения и бортовую электронику*

*области светотехники. Область научных интересов включает в себя системы управления осветительными установками, осветительными установками с возобновляемыми источниками энергии, умные осветительные установки, системы связи на основе СД и лазеров, проектирование внутреннего и наружного освещения, управление цветом в современных осветительных установках*

Реалии нынешнего года обусловили дистанционный формат обучения студентов и защиты ими выпускных квалификационных работ. Несмотря на вынужденность такого формата, существует ряд несомненных плюсов.

9 июня состоялась защита бакалавров направления «Оптотехника» Смоленского филиала НИУ «МЭИ» в онлайн-формате. В составе Государственной комиссии в качестве заместителя председателя в этом году работал доктор технических наук, профессор кафедры светотехники НИУ «МЭИ», главный редактор журнала «Светотехника/Light & Engineering» Владимир Павлович Будак. Традиционными членами комиссии и гостями были представители российских предприятий – ООО «Инженерный центр «Электролуч» (г. Гагарин Смоленской области), ПАО «Ростовский оптико-механический завод» (г. Ростов Ярославской обл.), АО «Ледванс» (г. Смоленск), ОАО ПО «Кристалл» (г. Смоленск).

Тематика защищаемых бакалаврских работ разнообразна и была посвящена как чисто практическим вопросам светотехники («Освещение ресторана быстрого питания»), колориметрии («Разработка и исследование методики определения цветового восприятия цифровых фотокамер»), «Интерполяция цвета ма-

тричных фотоприёмников»), так и разработкам для промышленных предприятий («Исследование спектральных характеристик люминофоров», «Спектральные методы контроля степени измельчения»), медицины («Применение спектрометрии для верификации метастазов рака желудка») и другим темам.

Для студентов такой формат защиты позволяет не выходя из дома получить заключение о своей выпускной квалификационной работе ведущих учёных, преподавателей и представителей промышленности России. Расширяется география участников дискуссии о научных и производственных аспектах выпускных работ, налаживается диалог производства и вузов, происходит обмен опытом. По итогам защиты некоторые студенты получили предложения о трудоустройстве.

Дальнейшей перспективой видится некий симбиоз традиционной защиты дипломов с привлечением онлайн в качестве экспертов ведущих преподавателей, учёных, представителей промышленности, что позволит повысить качество выпускных работ и их экспертизу, а также улучшить взаимодействие выпускников и работодателей.

*М.В. Беляков, заведующий кафедрой ОЭС*



Рис. 1. Перед началом защит



Рис. 2. Защита Владимира Орлова



Рис. 3. Студенты, гости, члены ГК

# Методы повышения спектрального разрешения изображающих спектрометров, построенных на основе многоканальных приёмников излучения

А. В. ГУРЫЛЁВА\*, А. М. ХОРОХОРОВ, В. С. КОБОЗЕВ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

\* E-mail: guryleva.av@gmail.com

## Аннотация

В статье предложены методы съёмки объектов изображающими спектрометрами, построенными на основе многоканального приёмника излучения, и последующей обработки её результатов, позволяющие значительно повысить спектральную разрешающую способность таких спектрометров с сохранением их исходного пространственного разрешения. Приведена математическая модель процесса съёмки. Определено, что восстановление спектральной плотности энергетической яркости объектов по данным съёмки предложенным методом математически является некорректной обратной задачей. В качестве методов её решения рассмотрены методы Гревилы, вейвлет-преобразования, регуляризации Тихонова и метод Годунова. Показаны результаты численного моделирования рассмотренных методов и установлено, что восстановление спектральной плотности энергетической яркости объектов по данным съёмки, проведённое рассмотренными методами, возможно, и относительная погрешность восстановления составляет доли процента. Определено, что оптимальным методом решения некорректной задачи восстановления спектров яркости объектов является метод вейвлет-преобразования. Также показано, что предложенный метод изображающей спектрометрии работает как при использовании матричных приёмников излучения с увеличенным количеством узкополосных оптических фильтров, так и – широко распространённых стандартных трёхканальных матричных *RGB* приёмников излучения.

**Ключевые слова:** изображающая спектрометрия, некорректные задачи, многоканальная съёмка, восстановление спектра, оптические фильтры.

## Введение

Изображающие спектрометры относятся к довольно востребованному в науке и промышленности типу приборов. Ключевой особенностью изображающих спектрометров является возможность регистрации с помощью них спектральных характеристик каждой точки двумерного изображения объекта. Для условного визуального представления объёма данных, получаемого в ходе измерения изображающим спектрометром, используют понятие куб данных [1]. Куб данных представляет собой трёхмерную структуру, образованную в одной плоскости спектральными характеристиками отражаемого от исследуемой поверхности излучения, а в двух других – соответствующими пространственными координатами.

По количеству спектральных каналов, в которых производится измерение, и спектральному разрешению изображающие спектрометры условно делятся на мультиспектральные и гиперспектральные. К мультиспектральным относят приборы, обеспечивающие регистрацию излучения в 4–100 спектральных каналах с разрешением хуже 10 нм [2, 3]. Среди гиперспектральных наилучшими характеристиками обладают приборы высокого спектрального разрешения [4, 5]. У них более 1000 спектральных каналов и разрешение лучше 1 нм. Для достижения высокого разрешения эти гиперспектрометры содержат диспергирующие системы разного типа, либо построены по принципу фурье-спектрометра [6–9]. Вследствие указанных особенностей и высоких требований к элементам конструкции диспергирующих и интерференционных систем эти приборы обладают значительными габаритами, низкими эксплуатационными характеристиками и высокой стоимостью [10–11]. Кроме того, для обработки информации и формирования куба данных в них необходимо обеспечивать механизм сканирования по одной из координат куба – пространственной или спектральной.

Изображающие спектрометры с числом каналов 100–1000 и разрешением 1–10 нм относят к гиперспектрометрам среднего разрешения. Наибольшей простотой и наилучшими эксплуатационными характеристиками среди всех изображающих спектрометров обладают мультиспектральные приборы [12, 13]. Они представляют собой сочетание объектива и матрицы чувствительных элементов, установленной в плоскости изображения. Чувствительные элементы (микروпиксели) снабжены узкополосными селективными фильтрами, расположение которых на матрице определяет тип многоканального матричного приёмника излучения (ПИ): полосовой, плиточный или мозаичный. С точки зрения построения изображающего спектрометра предпочтение отдают матричным ПИ мозаичного типа, в которых группы микропикселов с селективными фильтрами объединяются в один макропиксел, т.е. в них использован тот же принцип, что и в стандартных *RGB* матрицах, однако количество спектральных каналов увеличено с 3 до 4, 8, 16 и т.д. Повышение спектральной разрешающей способности такого прибора достигается увеличением числа каналов в макропикселе, но это увеличивает размеры макропикселя и, следовательно, снижает пространственное разрешение [14]. В статье рассматривается метод, позволяющий доводить спектральное разрешение мультиспектрального прибора до уровня, характерного для гиперспектрометра среднего разрешения, при сохранении его пространственного разрешения.

Метод состоит в том, что исследуемый объект последовательно снимают через несколько фильтров, спектральные характеристики пропускания которых известны,



и затем математической обработкой параметров полученных изображений находят спектральные характеристики излучения объекта в пределах каждого макропиксела со спектральным разрешением, значительно превышающим возможности мультиспектрометра. В статье также показано, что основой для изображающего спектрометра, работающего по предложенному методу, могут служить не только мультиспектральные матричные ПИ, работающие в четырёх и более каналах, но и стандартные трёхканальные *RGB* ПИ, а итоговое спектральное разрешение может достигать единиц нанометров.

## Метод

Определение спектральных характеристик протяжённых равномерно освещённых и диффузно отражающих объектов по данным изображающих спектрометров на основе мультиспектральных ПИ представляет собой задачу интерпретации исходной зависимости по результатам косвенных измерений [15, 16], таких как реакция ПИ на входное воздействие [17]. В рамках статьи рассматривается восстановление спектральной характеристики, а именно спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ)  $L_e(\lambda)$  объектов, по величине сигнала  $U$  с пикселей мультиспектрального ПИ по известным функциям спектральной чувствительности соответствующих каналов  $S(\lambda)$ . Значения сигналов с пикселей матричного ПИ в пределах одного макропиксела описываются линейными интегральными уравнениями:

$$\begin{cases} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_1(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda = C \cdot U_1, \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_2(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda = C \cdot U_2, \\ \vdots \\ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_m(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda = C \cdot U_m, \end{cases}$$

где  $U_1, U_2, U_m$  – величина сигнала пиксела, соответствующего определённому каналу, полученная при съёмке объекта камерой;  $S_1(\lambda), S_2(\lambda), \dots, S_m(\lambda)$  – функция спектральной чувствительности пиксела матричного ПИ в каждом канале;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – границы рабочего диапазона длин волн;  $m$  – количество каналов;  $C$  – коэффициент, не зависящий от  $\lambda$  и определяемый параметрами аппаратуры и условиями съёмки (диаметр входного зрачка объектива, расстояние до объекта, поле зрения и т.п.).

Для приближённых вычислений соответствующих интегралов с постоянным шагом  $\Delta\lambda$  используется система уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_1(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) = C \cdot U_{1tj}, \\ \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_2(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) = C \cdot U_{2tj}, \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_m(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) = C \cdot U_{mtj}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_e(\lambda_i)$  – значения СПЭЯ объекта в дискретных точках рабочей области спектра;  $S_1(\lambda_i), S_2(\lambda_i), \dots, S_m(\lambda_i)$  – дискретные значения спектральной чувствительности пиксела с узкополосным фильтром матричного ПИ;  $v(\lambda_i)$  – весовые коэффициенты шага, зависящие от способа численного интегрирования: методы прямоугольников, трапеций, Симпсона и т.п.;  $U_1, U_2, \dots, U_m$  – величины сигналов пикселей, полученные при съёмке объекта мультиспектральной камерой;  $m$  – количество узкополосных фильтров;  $n$  – количество точек разбиения по спектру;  $i$  – номер шага разбиения.

При известных функциях  $S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_m(\lambda)$  и значениях  $U_1, U_2, U_m$  система (1) сводится к системе линейных уравнений относительно набора выбранных значений  $L_e(\lambda_i)$ . При этом количество значений  $L_e(\lambda_i)$ , определяется значением  $n$ . Погрешность определения этих значений во многом определяется конструкционной матрицей уравнений системы (1) и характером изменения функции  $L_e(\lambda)$ . Как правило, система (1) не позволяет извлекать информацию о функции  $L_e(\lambda)$  с необходимой точностью, поэтому для получения дополнительной информации о СПЭЯ объекта предлагается выполнять несколько дополнительных снимков через специальные оптические фильтры с известными спектральными функциями пропускания  $\tau_j(\lambda)$  ( $j = 1, 2, \dots, p$ ). Тогда к системе уравнений (1) добавляется ещё  $m \times p$  аналогичных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_1(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) \cdot \tau_j(\lambda_i) = C \cdot U_{1tj}, \\ \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_2(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) \cdot \tau_j(\lambda_i) = C \cdot U_{2tj}, \quad j = 1 \dots p \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n L_e(\lambda_i) \cdot S_m(\lambda_i) \cdot v(\lambda_i) \cdot \tau_j(\lambda_i) = C \cdot U_{mtj}, \end{cases} \quad (1+)$$

где  $U_{1tj}, U_{2tj}, \dots, U_{mtj}$  – величины сигналов пикселей, полученные при съёмке объекта камерой с соответствующими узкополосными фильтрами через оптический фильтр с функцией пропускания  $\tau_j(\lambda_i)$ . (Система уравнений (1+) может быть расширена за счёт включения в неё системы (1). Для этого в системе (1+) следует ввести значение параметра  $j = 0$  и принять  $\tau_0(\lambda_i) = 1$ , т.е. считать, что съёмка объекта проводится без оптического фильтра.)

Выбор необходимого числа оптических фильтров и оптимального характера их функций пропускания определяется необходимой точностью определения функции  $L_e(\lambda_i)$ , требуемыми динамическими характеристиками системы обработки изображений и другими параметрами технического задания.

Для проведения моделирования и осуществления численного решения удобно представить систему уравнений (1+) в матричном виде:

$$S \cdot l = u, \quad (2)$$

где  $S$  – матрица размера  $m \cdot (p + 1) \cdot n$ , учитывающая спектральную чувствительность пикселей матричного ПИ, известные спектральные функции пропускания  $\tau_j(\lambda_i)$  и весовые коэффициенты шага  $v(\lambda_i)$ ;  $l$  – вектор из  $n$  элементов,

определяющий СПЭЯ объекта;  $\mathbf{u}$  – вектор из  $m \cdot (p+1)$  элементов, определяющий величины сигнала пикселей, полученные при съёмке объекта мультиспектральной камерой непосредственно и с дополнительными оптическими фильтрами.

### Метод Гревилля

При высоких требованиях к спектральной разрешающей способности изображающего спектрометра и естественном стремлении к их технической реализации число неизвестных значений  $L_e(\lambda_i)$  оказывается большим и порой значительно большим числа уравнений (1+).

При этом задача (2) может быть либо неразрешима, либо иметь неединственное решение [18–20], т.е. быть математически некорректно поставленной, поэтому в таких случаях используется псевдорешение [21–23], т.е. такой вектор  $\mathbf{l}$ , который удовлетворяет следующему функционалу [24]:

$$\|S \cdot \mathbf{l} - \mathbf{u}\|^2 \rightarrow \min.$$

С другой стороны, нормальное псевдорешение в силу известной теоремы о перпендикуляре определяется однозначно и может быть найдено из уравнения

$$\mathbf{l} = S^+ \cdot \mathbf{u}, \quad (3)$$

где  $S^+$  – псевдообратная матрица, полученная псевдообращением матрицы  $S$ .

Псевдообращение может пониматься как решение задачи наилучшей аппроксимации по методу наименьших квадратов. Метод псевдорешений служит одним из простейших способов восстановления СПЭЯ объектов по данным мультиспектральной съёмки, а нахождение псевдообратной матрицы в настоящей работе осуществлялось методом Гревилля.

### Метод вейвлет-преобразования

Уравнение (2) представляет собой обратную некорректную задачу [25, 26], а её решение в виде (3) является простым, но с серьёзным недостатком. Он заключается в том, что в силу особенностей обсуждаемой в статье проблемы матрица  $S$  зачастую является плохо обусловленной (из-за линейной зависимости строк матрицы между собой), и, соответственно, влекущей за собой низкую устойчивость решения к погрешностям правой части уравнения (2). Для устранения этого фактора снижения точности восстановления исходного спектра яркости можно использовать вейвлет-преобразование функции [27, 28].

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала – это его представление в виде обобщённого ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных из материнского (исходного) вейвлета  $\psi(\lambda)$ , обладающего определёнными свойствами за счёт операций сдвига во времени  $b$  и изменения временного масштаба  $a$ . Для заданных значений параметров  $a$  и  $b$  функция  $\psi_{ab}(\lambda)$  является вейвлетом, порождаемым материнским вейвлетом  $\psi(\lambda)$  [29]. В настоящей статье вейвлеты используются для сокращения избыточной информации. Каждая строка матрицы  $S$  раскладывается по базису, а далее в решении уравнения (2) относительно  $\mathbf{l}$  используются не элементы матрицы  $S$ , число которых определяется количеством точек

разбиения по спектру и может достигать десятков и сотен единиц, а вейвлет-коэффициенты её разложения по базису, число которых определяется количеством функций, входящих в базис, что в конечном счёте на порядки снижает число обусловленности  $\mu$ . В настоящей статье в качестве материнской функции вейвлетов использовался интеграл ошибок  $\psi(\lambda) = \text{erf}(\lambda)$ , а базис разложения состоял из  $k = 8$  функций и выглядел следующим образом:

$$\begin{cases} \psi_0(x) = 1, \\ \psi_1(x) = \text{erf}(2 \cdot x), \\ \psi_2(x) = \text{erf}\left(4 \cdot \left(x - \frac{1}{2}\right)\right), & \psi_5(x) = \text{erf}\left(8 \cdot \left(x + \frac{1}{2}\right)\right), \\ \psi_3(x) = \text{erf}\left(4 \cdot \left(x + \frac{1}{2}\right)\right), & \psi_6(x) = \text{erf}\left(8 \cdot \left(x - \frac{3}{4}\right)\right), \\ \psi_4(x) = \text{erf}\left(8 \cdot \left(x - \frac{1}{4}\right)\right), & \psi_7(x) = \text{erf}\left(8 \cdot \left(x + \frac{3}{4}\right)\right), \end{cases} \quad (4)$$

где  $x$  – переменная, имеющая смысл длины волны  $\lambda$ , приведённой к стандартному отрезку  $[-1, 1]$ , аналогично тому как в [30].

Определение СПЭЯ объекта с использованием вейвлет-преобразования матрицы  $S$  производилось по следующей, полученной из выражения (3), формуле

$$\mathbf{l} = \Phi \cdot (S \cdot \Phi)^+ \cdot \mathbf{u},$$

где  $\Phi$  – матрица значений базовых функций из выражений (4) размера  $(k \times n)$ ;  $(S \cdot \Phi)^+$  – матрица, полученная псевдообращением матрицы  $S \cdot \Phi$ .

### Метод регуляризации Тихонова

Так как вследствие некорректности задачи восстановления исходного спектра яркости нельзя получить точного решения уравнения (2), устойчивого к малым изменениям исходных данных, следует искать некоторое приближённое решение [31]. Решаемое уравнение (2) – операторное первого рода [32]; в [25, 33] показано, что его решение эквивалентно решению задачи минимизации функционала:

$$M^\alpha(\mathbf{l}, \mathbf{u}) \equiv \|S \cdot \mathbf{l} - \mathbf{u}\|^2 + \alpha \cdot \|\mathbf{l}\|^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\mathbf{l} \in L, \quad \alpha > 0,$$

где  $M^\alpha(\mathbf{l}, \mathbf{u})$  – сглаживающий функционал Тихонова,  $\alpha$  – параметр регуляризации.

Регуляризованное решение задачи (2) определяется как единственное решение уравнения Эйлера [25, 31]

$$(S' \cdot S + \alpha \cdot E) \cdot \mathbf{l} = S' \cdot \mathbf{u} + \alpha \cdot \mathbf{u}^*,$$

где  $E$  – единичная матрица порядка  $n$ .

Случаю  $\mathbf{u}^* = 0$  соответствует каноническая форма метода регуляризации, которая и использовалась в данной работе.

При практическом применении этого метода очень важны алгоритмические способы выбора параметра  $\alpha$ . Один из них обоснован в работе [34] и заключается в выборе  $\alpha$  по значениям функционала  $M^\alpha(\mathbf{l}, \mathbf{u})$  на регуляризован-



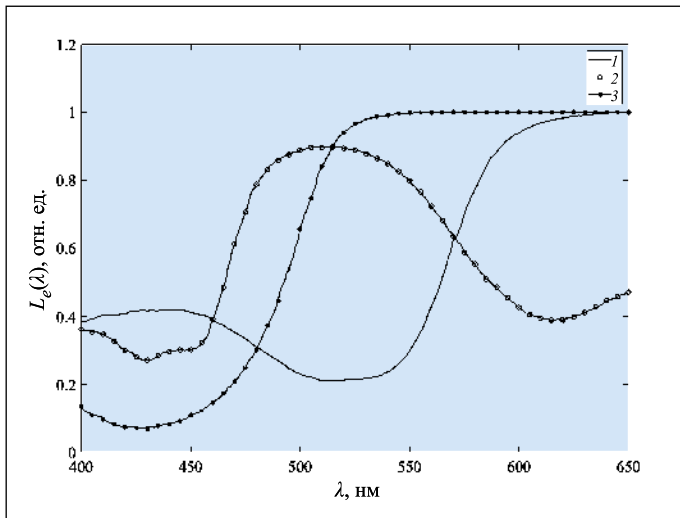


Рис. 1. Кривые относительной СПЭЯ образцов 1 (1), 2 (2) и 3 (3)

ных решениях из условия (5). Решение такой задачи ищется по принципу обобщённой невязки [35] методом последовательных приближений Ньютона на сетке по  $\alpha$ :  $\alpha_{s+1} = \alpha_s + \beta$ ;  $s = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\beta = 0,001$ .

#### Метод Годунова

Согласно [36, 37], использование дополнительной информации о том, что искомое решение имеет не слишком большие вторые производные, позволяет при составлении системы линейных уравнений так её дополнять, что это дополнение существенно снижает число обусловленности и делает систему разрешимой. В таком случае система уравнений (1+) преобразуется в систему вида

$$\begin{bmatrix} (1-\tau) \cdot S \\ \tau \cdot B \end{bmatrix} \cdot I = \begin{bmatrix} (1-\tau) \cdot u \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $B$  – матрица размера  $n$ , элементы которой  $(b_{ij})$  таковы, что

$$b_{ij} = \frac{-2}{(1/n-1)^2} \quad \text{при } i = j;$$

$$b_{ij} = \frac{-1}{(1/n-1)^2} \quad \text{при } i = j-1 \text{ и } i = j+1;$$

$$b_{ij} = 0 \quad \text{при } |i-j| \geq 2;$$

$\tau$  – коэффициент, определяемый выражением  $\tau = 1/(n-1)^2$ .

Ожидалось, что при соблюдении описанных выше условий вычисления элементов матрицы  $B$  и коэффициента  $\tau$  нормальное решение системы (6), которую можно переписать как

$$((1-\tau)^2 \cdot S' \cdot S + \tau^2 \cdot B' \cdot B) \cdot I = (1-\tau)^2 \cdot S' \cdot u,$$

будет близко к интересующему нас вектору [24].

#### Процедура моделирования

Проверка описанной методики определения СПЭЯ объекта по данным косвенных измерений проводилась с помощью численного моделирования согласно выражению (1+). В качестве исследуемых образцов использовались реальные однородные диффузно рассеивающие цветные пластинки. Кривые СПЭЯ этих образцов,  $L_{e1}(\lambda_i)$ ,  $L_{e2}(\lambda_i)$  и  $L_{e3}(\lambda_i)$ , определялись с помощью сертифицированного устройства: спектрофотометра *Perkin Elmer Lambda 950* (рис. 1).

Для каждого образца было проведено отдельное моделирование. Многоканальные мозаичные матричные ПИ выпускаются с макропикселями, состоящими из некоторого фиксированного числа пикселей с определённым фильтром (по количеству каналов  $m$ ). В моделировании рассматривались два ПИ: стандартная *RGB* матрица с тремя каналами ( $m = 3$ ) и мультиспектральный восьмиканальный матричный мозаичный ПИ, макропиксели которого содержали восемь пикселей с узкополосными фильтрами ( $m = 8$ ). Для каждой матрицы проводилось отдельное численное моделирование. Кривые относительной спектральной чувствительности *RGB* матрицы,  $S_R(\lambda)$ ,  $S_G(\lambda)$  и  $S_B(\lambda)$ , и мультиспектральной восьмиканальной матрицы,  $S_1(\lambda)$ ,  $S_2(\lambda)$ , ...,  $S_8(\lambda)$ , соответственно, приведены на рис. 2, а и б.

В рамках численного моделирования в качестве оптических фильтров, поочерёдно включаемых в ход лучей, были выбраны цветные стекла ЖЗС-5, ЖЗС-18, СЗС-16 и СС-1, из каталога оптического стекла, функции пропускания которых,  $\tau_1(\lambda_i)$ ,  $\tau_2(\lambda_i)$ ,  $\tau_3(\lambda_i)$  и  $\tau_4(\lambda_i)$  ( $p = 4$ ), соответствуют ГОСТ 9411–91. Выбор указанных цветных стёкол выполнялся с применением классического метода, заключающегося в подборе фильтров с максимально различным видом кривых пропускания и равномерным покрытием всего рабочего диапазона  $\lambda$  [38].

На первом этапе моделирования из прямого решения уравнения (1+) по известным параметрам – спектральной чувствительности пикселей матричного ПИ с филь-

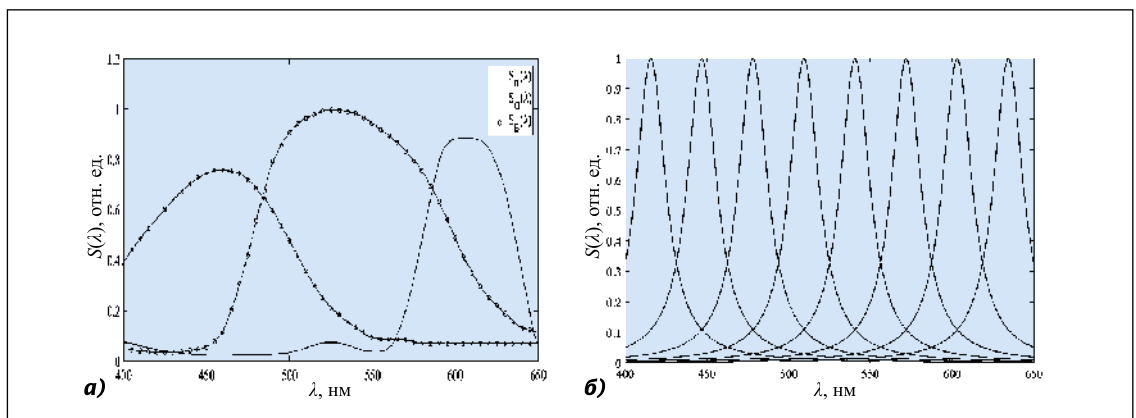


Рис. 2. Кривые относительной СПЭЯ пикселей с фильтрами Байера трёхканальной *RGB* матрицы (а) и восьмиканальной мультиспектральной матрицы (б)

Результаты моделирования восстановления спектральной плотности яркости по данным многоканальной съёмки

Номер образца	Относительная погрешность, %							
	Метод Гревилля		Метод вейвлет-преобразования		Метод регуляризации Тихонова		Метод Годунова	
	$m=3$	$m=8$	$m=3$	$m=8$	$m=3$	$m=8$	$m=3$	$m=8$
	$p=4$	$p=2$	$p=4$	$p=2$	$p=4$	$p=2$	$p=4$	$p=2$
1	0,96	2,86	0,62	0,25	1,33	0,77	0,65	1,61
2	0,91	2,55	0,29	0,11	1,20	0,61	0,42	1,33
3	0,61	2,00	0,30	0,15	1,11	0,56	0,55	1,54

трами Байера  $S_R(\lambda_i)$ ,  $S_G(\lambda_i)$ ,  $S_B(\lambda_i)$ , СПЭЯ образцов  $L_e(\lambda_i)$  и функциям пропускания  $\tau_j(\lambda_i)$  дополнительных  $p$  фильтров ( $j = 1, 2, \dots, p$ ) – определяются величины сигнала пикселей стандартной  $RGB$  матрицы  $U_R \tau_j$ ,  $U_G \tau_j$ ,  $U_B \tau_j$ , ( $j = 0, \dots, p$ ) Процедура определения величин сигналов пикселей стандартной  $RGB$  матрицы проводится отдельно для каждого образца, т.е. для  $L_{e1}(\lambda_i)$ ,  $L_{e2}(\lambda_i)$ ,  $L_{e3}(\lambda_i)$ . Аналогично получают соответствующие модельные значения величин сигналов пикселей мультиспектрального ПИ. В этом случае используется другое количество  $p$  дополнительных оптических фильтров. Для обеспечения достаточной точности моделирования шаг разбиения по спектру для всех функций составил 1 нм, что для спектрального диапазона 400–650 нм соответствовало общему числу точек  $n = 251$ .

Второй этап моделирования заключался в определении СПЭЯ,  $L_{e1}^*(\lambda_i)$ ,  $L_{e2}^*(\lambda_i)$  и  $L_{e3}^*(\lambda_i)$ , каждого образца в  $n$  точках одним из приведённых выше методов решения обратной некорректной задачи (2). Кроме того, СПЭЯ образцов определялись отдельно для двух вариантов моделирования: с трёхканальным ( $m = 3$ ) и с восьмиканальным ( $m = 8$ ) матричными ПИ. Мерой соответствия восстановленного таким образом спектра исходному являлась относительная погрешность, выраженная в процентах.

## Результаты

Основные результаты математического моделирования методов определения СПЭЯ объектов выглядят следующим образом.

1. Решение обратной некорректной задачи по определению СПЭЯ объекта с точностью, характерной для гиперспектрометра среднего разрешения, без применения дополнительных оптических фильтров ни одним из предложенных методов не представляется возможным. Относительные погрешности восстановленной и исходной СПЭЯ образцов составляют десятки процентов. Это относится как к многоканальным, так и к  $RGB$  ПИ.

2. Использование при съёмке объекта дополнительных фильтров способствует увеличению точности определения СПЭЯ с требуемым спектральным разрешением. Для мультиспектральных систем в большинстве случаев в зависимости от числа каналов достаточно одного-двух дополнительных фильтров. При используемом в статье для расчёта восьмиканальном приёмнике излучения целесообразно использовать значение  $p = 2$ . Установлено, что метод изображающей спектрометрии на основе многока-

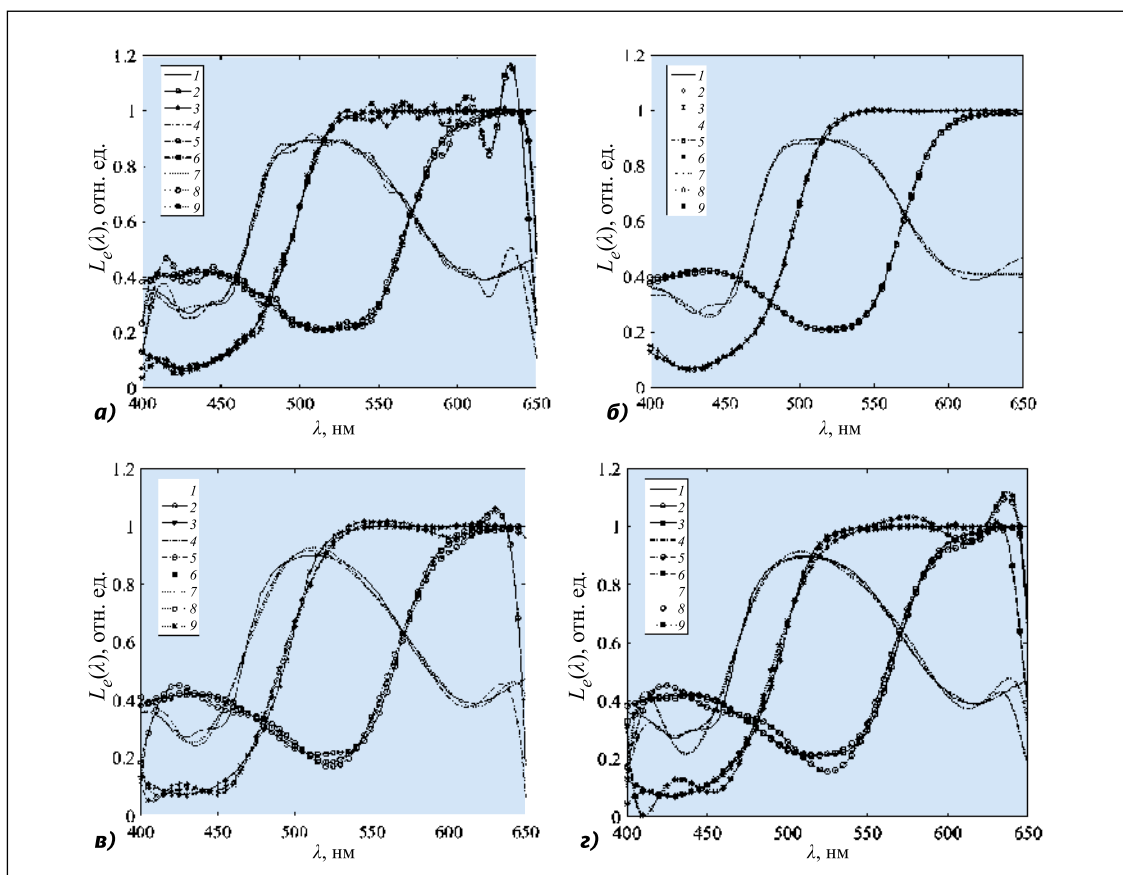
нальных ПИ даёт хорошие результаты не только для матричных ПИ с увеличенным, относительно стандартного, количеством каналов, что было ожидаемым [39], но и для широко распространённых трёхканальных матричных ПИ. В последнем случае количество оптических фильтров  $p$ , участвующих в многоканальной съёмке, увеличивается, но остаётся в технически реализуемых пределах, и представляется оправданным [40, 41]. В настоящей статье принято значение  $p = 4$ .

3. На рис. 3 проиллюстрированы результаты восстановления исходной СПЭЯ методами Гревилля, вейвлет-преобразования, Годунова и регуляризации Тихонова. Из графиков следует, что для определения СПЭЯ разных образцов все рассмотренные методы решения уравнения (2) представляются применимыми. На границах спектрального диапазона практически все методы обнаруживают некоторое расхождение исходной и восстановленной кривых, и это обстоятельство следует учитывать при практическом применении методов. Основная проблема при использовании метода Тихонова – расчёт оптимального значения параметра регуляризации  $\alpha$ . При моделировании значения этого параметра находились методом последовательных приближений Ньютона. Они составили 0,0616 при  $m = 3$  и 0,1481 при  $m = 8$ . Метод вейвлет-преобразований даёт более однозначное представление о виде кривой СПЭЯ, поэтому в задачах, требующих дальнейшего включения в расчёты значений в определённых точках восстановленных кривых, предпочтительно использовать метод вейвлет-преобразования ввиду меньшей относительной погрешности восстановления СПЭЯ этим методом.

4. В таблице представлены значения относительной погрешности восстановления СПЭЯ трёх объектов методами решения некорректных обратных задач, описанными выше. Из таблицы видно, что численное моделирование обсуждаемых методов многоканальной изображающей спектрометрии и методов последующей обработки данных даёт положительные результаты, и исходная СПЭЯ образцов восстанавливается с малой погрешностью. Может показаться, что приведённые в таблице результаты слишком оптимистичны, но следует подчеркнуть, что речь здесь идёт лишь о погрешностях восстановления спектральных кривых с точки зрения методов решения обратных задач. При использовании методов Гревилля и Годунова наблюдается ухудшение результатов с ростом количества каналов матрицы, что объясняется высокой чувствительностью этих методов к плохой обусловленности матри-



Рис. 3. Кривые относительных СПЭЯ: исходной и восстановленной методами Гревия (а), вейвлет-преобразования (б), регуляризации Тихонова (в) и Годунова (г). Исходные кривые образцов – 1, 2, 3; кривые, восстановленные по данным трёхканальной съёмки ( $m = 3$ ,  $p = 4$ ) – 4, 5, 6; кривые, восстановленные по данным восьмиканальной съёмки ( $m = 8$ ,  $p = 2$ ) – 7, 8, 9



цы  $S$ , входящей в расчёт, но метод Годунова показывает более предпочтительные результаты по сравнению с методом Гревия. С другой стороны, методы вейвлет-преобразования и регуляризации Тихонова лучше работают в условиях высокого числа обусловленности матрицы  $S$ , что служит важным фактором в решении некорректных задач, и с увеличением числа уравнений, входящих в систему (1+), относительная погрешность расчёта с помощью этих методов падает. При этом метод вейвлет-преобразования позволяет уменьшить число обусловленности ( $\mu$ ) матрицы  $S$  при  $m = 3$ ,  $p = 4$  с  $8,4 \cdot 10^2$  до  $0,3 \cdot 10^2$ , а при  $m = 8$ ,  $p = 2$  – с  $1,4 \cdot 10^3$  до  $0,1 \cdot 10^3$ , и получить усреднённое по трём образцам значение погрешности не более 0,40 % при  $m = 3$ ,  $p = 4$  и 0,17 % при  $m = 8$ ,  $p = 2$ , что, очевидно, является лучшим результатом.

### Обсуждения и заключение

В статье рассмотрены методы съёмки объектов изображающим спектрометром, построенным на основе многоканального ПИ, с соответствующей программной обработкой результатов съёмки, позволяющие проводить определение СПЭЯ объектов с повышенной спектральной разрешающей способностью при сохранении исходной пространственной разрешающей способности за счёт получения дополнительной информации о спектральных характеристиках объекта в процессе его съёмки через специальные оптические фильтры. Приведена математическая модель процесса съёмки, подтверждающая теоретическую обоснованность метода. В ходе работы выявлено, что задача обработки результатов нетривиальна, и потому в статье приведены результаты моделирования её решения

разными методами. Определено, что наиболее универсальный метод решения некорректной задачи восстановления кривых СПЭЯ объектов – метод вейвлет-преобразования. Установлено численным моделированием, что относительная погрешность восстановления СПЭЯ объектов по данным многоканальной съёмки предложенным методом составляет около 0,17 %, являясь удовлетворительной. Также показано, что обсуждаемый метод многоканальной изображающей спектрометрии работает как при использовании мультиспектральных восьмиканальных матричных ПИ, так и – широко распространённых стандартных трёхканальных матричных ПИ. В случае использования трёхканальных ПИ количество используемых в съёмке оптических фильтров представляется конструктивно достижимым и оправданным.

Основными достоинствами описанного метода многоканальной съёмки представляются простота его технической реализации, малая подверженность влиянию внешних факторов (повышенные вибрации, значительные изменения температуры и др.) и возможность получения изображающим спектрометром данных по трём координатам куба без организации сканирования с высоким спектральным и пространственным разрешением. Рассмотренный метод допускает большое количество вариаций его осуществления, (например, путём изменений количества каналов съёмки и участвующих в ней оптических фильтров, кривых пропускания этих фильтров и т.д.). Вследствие такой вариативности оптимизация значений указанных параметров и их комбинаций, а также учёт влияния погрешностей измерения на результаты восстановления СПЭЯ объектов по данным косвенных измерений должны явиться предметом дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин А.Д., Дёмин А.В. Имитационная модель многоканального гиперспектрометра Оффнера // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 521–528. Doi 10.18287/0134-2452-2015-39-4-521-528.
2. Larar Allen M. et al. Multispectral, hyperspectral, and ultraviolet remote sensing technology, techniques, and applications III // Proc. SPIE International Society for Optical Engineering. 13–14 October 2010. Incheon, Korea Republic, 2010. –Vol. 7857.
3. Родионов И.Д., Родионов А.И., Ведешин Л.А., Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П. Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования // Исследование земли из космоса. – 2013. – № 6. – С. 81–93.
4. Горбунов Г.Г., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Интерференционные гипер- и ультраспектральные видеоспектрометры для задач дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Т. 1, № 33. – С. 70–94.
5. Vilaseca M., Schael B., Delpueyo X., Chorro E., Perales E., Hirvonen T., Pujol J. Repeatability, reproducibility, and accuracy of a novel pushbroom hyperspectral system // Color Research & Application. – 2013. – Vol. 39, No. 6. – P. 549–558. Doi 10.1002/col.21851.
6. Pozhar V.E., Machikhin A.S., Gaponov M.I., Shirokov S.V., Mazur M.M., Sheryshev A.E. Hyper-spectrometer Based on an Acousto-optic Tuneable Filters for UAVS // Light & Engineering. – 2019. – Vol. 27, No. 3 – P. 99–104.
7. Палто С.П., Алпатова А.В., Гейвандов А.Р., Блинов Л.М., Лазарев В.В., Юдин С.Г. Фурье-спектроскопия как метод изучения фотоэлектрических свойств органических систем // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, № 2. – С. 210–220. Doi 10.21883/OS.2018.02.45526.209-17.
8. Заварзин В.И., Митрофанова Ю.С. Схемные решения для перспективной гиперспектральной аппаратуры // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 4. – С. 12–16.
9. Головин А.Д., Дёмин А.В. Имитационная модель многоканального гиперспектрометра Оффнера // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 521–527. Doi 10.18287/0134-2452-2015-39-4-521-528.
10. Балашов А.А., Вагин В.А., Голяк И.С., Морозов А.Н., Нестерук И.Н., Хорохорин А.И. Фурье-спектрометр видимого и ближнего ИК диапазонов // Радиостроение. – 2017. – № 6. – С. 27–38. Doi 10.24108/rdeng.0617.0000124.
11. Архипов С.А., Заварзин В.И., Ли А.В. // Зеркальные оптические системы для малогабаритной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования земли из космоса / В сб. Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Материалы 10-й Международной научно-технической конференции. –Российское НТОРЭС им. А.С. Попова, 2017. – С. 262–264.
12. Veys C., Davies P., Hibbert J., Grieve B. (2017). An Ultra-Low-Cost Active Multispectral Crop Diagnostics Device. 1005–1007. Paper presented at IEEE Sensors 2017 Conference, Glasgow, United Kingdom. Doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234211.
13. Burns P.D., Berns R.S. Analysis Multispectral Image Capture // Color Imaging Conf. – 1996. – № 1. – P. 19–22.
14. Хорохоров А.М., Введенская А.В., Ширанков А.Ф., Кобозев В.С. Алгоритм расширения возможностей матричных приёмников излучения с фильтрами Байера / Междунар. конф. «Прикладная оптика-2018». – СПб.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, 2018. – Т. 2.
15. Варенцова С.А., Трофимов В.А., Троциев Ю.В. Восстановление сигнала и динамики его спектральных характеристик при нерегулярном наборе измерений // Ж. техн. физ. – 2008. – Т. 78, № 7. – С. 57–68.
16. Жучко О.В., Пытьев Ю.П., Восстановление функциональной зависимости теоретико-возможностными методами // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2003. – Т. 43, № 5. – С. 767–783.
17. Hardeberg J. Acquisition and reproduction of color images: colorimetric and multispectral approaches. – USA: Dissertation.com, 2001.
18. Ванник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
19. Иванов В.К., Васин В.В., Танана В.П. Теория линейных некорректных задач и её приложение. – М.: Наука, 1978. – 206 с.
20. Сизиков В.С., Лавров А.В. Современные устойчивые математические и программные методы восстановления искажённых спектров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18, № 6.
21. Сыдыхов А.Ш., Аранов С.Ю., Аранова С.П. Псевдоинверсная обработка данных мультиспектральной фотосъёмки в стационарных зонах изображения / Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»: сб докл. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 179–185.
22. El-Rifai I. et al. Enhanced Spectral Reflectance Reconstruction Using Pseudo-Inverse Estimation Method // Int. J. Image Process. IJIP. – 2013. – Vol. 7, № 3. – P. 278–285.
23. Барлиани А.Г. Разработка алгоритмов уравнивания и оценки точности свободных и несвободных геодезических сетей на основе псевдонормального решения. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 135 с.
24. Морозов В.В., Гребенников А.И. Методы решения некорректно поставленных задач. Алгоритмический аспект. – М.: – Изд-во Моск. ун-та. – 1992. – 319 с.
25. Vogel C.R. Computational Methods for Inverse Problems. SIAM. Philadelphia. – 2002. – 179 p. Doi 10.1137/1.9780898717570.
26. Гурьлева А.В., Хорохоров А.М., Латышев В.И. Сравнительный анализ методов решения некорректных обратных задач для многоканальной гиперспектрометрии // Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 127, № 4. – С. 551–557. Doi 10.21883/OS.2019.10.48356.171-19
27. Аранов С.Ю., Аранова С.П., Дубинин И.С., Сергеев А.П. Восстановление спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъёмки / Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации: материалы международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 21–33.
28. Аранов С.Ю., Тарасов Д.А., Сергеев А.П., Колмогоров Ю.Н. Моделирование спектров отражения на основе базиса из функций типа интеграла ошибок // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 6. – С. 17–29.
29. Новиков Л.В. Спектральный анализ сигналов в базе вейвлетов // Научное приборостроение. – 2000. – Т. 10, № 3. – С. 70–77.
30. Тарасов Д.А. Моделирование спектров отражения суперпозицией полиномов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 5. – С. 59–66.
31. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
32. Calvetti D., Morigi S., Reichel L., Sgallari F. Tikhonov regularization and the L-curve for large discrete ill-posed problems // J. Comput. Appl. Math. – 2000. – Vol. 123. – P. 423–446.



33. Hansen C.A. Matlab Package for Analysis and Solution of Discrete Ill-Posed Problems // Numerical Algorithms. – 1994. – Vol. 6. – P. 1–35.

34. Морозов В.А. Линейные и нелинейные некорректные задачи // Итоги науки и техн. Сер. Мат. анализ. – 1973. – Т. 11. – С. 129–178.

35. Гончарский А.В., Леонов А.В., Ягола А.Г. Обобщённый принцип невязки // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1973. – Т. 13, № 2. – С. 294–302.

36. Годунов С.К., Антонов А.Г., Кирилюк О.П., Костин В.И. Гарантированная точность решения систем линейных уравнений в евклидовых пространствах. – Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1988. – 456 с.

37. Ванник В.Н., Михальский А.И. О поиске зависимостей методом упорядоченной минимизации риска // Автомат. и телемех. – 1974. – № 10. – С. 10–21.

38. Connah D., Alsam A., Hardeberg J.Y. Multispectral imaging: How many sensors do we need? // J. Imaging Sci. Technol. – 2006. – Vol. 50, No. 1. – P. 45–52. Doi 10.2352/j.imagingsci.technol. (2006)50:1(45).

39. Helling S., Seidel E., Biehlig W. Algorithms for spectral color stimulus reconstruction with a seven-channel multispectral camera / Proc. of CGIV (2nd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision). – 2004. – Vol. 2. – P. 254–258.

40. Imai F.H., Berns R.S. Spectral estimation using trichromatic digital cameras // Proc. Int. Symp. Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives. – Chiba: Society of Multispectral Imaging of Japan, 1999. – P. 42–48.

41. Masahiro Y., Hideaki H., Nagaaki O. Beyond Red–Green–Blue (RGB): Spectrum-Based Color Imaging Technology // J. Imaging Sci. Technol. – 2008. – Vol. 52, No. 1. – P. 1–15.



**Гурылёва Анастасия Валентиновна, инженер.** Окончила в 2017 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: фотоника, оптотехника, спектрометрия



**Хорохоров Алексей Михайлович, кандидат техн. наук.** Окончил в 1968 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы» МВТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный работник высшей школы РФ. Область научных интересов: фотоника, оптотехника, лазерная техника



**Кобозев Виталий Сергеевич, студент 5-го курса** кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: оптика, оптико-электронные приборы

## Перенос на 2021 год: новые даты выставки *Interlight Russia | Intelligent building Russia*

В связи с нестабильной эпидемиологической ситуацией в России и в мире компания Messe Франкфурт РУС приняла решение о переносе дат проведения 26-й Международной выставки освещения, автоматизации зданий, электротехники и систем безопасности – *Interlight Russia | Intelligent building Russia*.

Новые даты проведения выставки – 13–16 сентября 2021 года.

По словам организаторов выставки, решение было принято исходя из того, что прогнозировать ситуацию с проведением выставки этой осенью крайне сложно: международный опыт показывает, что ограничения на проведение массовых мероприятий будут отменены в последнюю очередь, существует высокий риск повторных запретов, связанных с большой вероятностью новых вспышек заболеваемости. Кроме того, весомой причиной переноса выставки послужило отсутствие гарантий её проведения в текущей ситуации на высоком уровне. Привлечение на выставку ведущих мировых и российских экспертов, а также целевой аудитории может стать невыполнимой задачей: специалисты отрасли, как и вся страна, в первую очередь заботятся о безопасности и здоровье близких. Организаторы полностью разделяют и поддерживают эти ценности.

«В сентябре 2020 года мы готовы были обеспечить на выставке все зависящие от нас меры безопасности и принять тот факт, что никто из иностранных партнёров и экспонентов не сможет присутствовать на мероприятии. Однако до выставки осталось чуть больше 3-х месяцев, а у нас до сих пор нет уверенности в возможности проведения выставки ввиду ограничительных мер, непредсказуемости развития эпидемии. Мы не можем обнадёживать участников выставки, откладывая это сложное для нас решение. Честность и доверительные отношения с экспонентами и посетителями для нас очень важны, поэтому мы объявляем о переносе дат выставки заранее, чтобы компании могли спланировать вторую половину года с учётом переноса выставки и участия в 2021 году», – Алексей Карамян, руководитель проекта *Interlight Russia | Intelligent building Russia*.

Билеты, полученные на выставку 2020 года, будут действительны для посещения выставки в 2021 году.

Организаторы выразили благодарность партнёрам и участникам выставки за понимание и призывали представителей отрасли поддерживать друг друга в это сложное время.

www.interlight-building.ru.  
messefrankfurt.com  
01.06.2020

# Сравнительная оценка основанных на законах распространения света интеллектуальных поисковых и оптимизационных алгоритмов<sup>1</sup>

Б. АЛАТАС, Х. БИНГОЛ

Университет Фират, Элязыг, Турция

E-mail: balatas@firat.edu.tr

## Аннотация

Классические поисковые и оптимизационные алгоритмы неэффективны в случае сложных нелинейных динамических крупномасштабных задач с неполными исходными данными. Поэтому в качестве рабочих вариантов были предложены интеллектуальные оптимизационные алгоритмы, в основу которых положены естественные процессы (физические, биологические, химические, математические и др.). Так что в основу многих интеллектуальных оптимизационных алгоритмов положены физические и биологические процессы, которые они моделируют. Концепция постоянного поиска наилучших решений и отсутствие общего для всех задач наиболее эффективного алгоритма обусловили появление абсолютно новых методов или новых вариантов существующих методов, которые позволили бы решать очень сложные задачи оптимизации. В основу двух предложенных недавно алгоритмов, а именно, алгоритма лучевой оптимизации (*Ray Optimization*) и алгоритма оптической оптимизации (*Optics Inspired Optimization*), был положен свет, вследствие чего в данной работе их называют основанными на законах распространения света интеллектуальными оптимизационными алгоритмами (*Light-based Intelligent Optimization Algorithms*). В основу этих относительно новейших поисковых и оптимизационных алгоритмов были положены законы преломления и отражения света. В данной работе впервые проведены в одинаковых условиях исследования этих основанных на законах распространения света интеллектуальных оптимизационных алгоритмов и проанализирована их эффективность применительно к свободным от ограничений базовым функциям (*benchmark functions*) и имеющим ог-

раничения реальным конструкторским задачам. Полученные результаты продемонстрировали преимущество лучевой оптимизации, которая, скорее всего, позволит решать многие сложные задачи.

**Ключевые слова:** оптимизация, основанная на законах оптики оптимизация, лучевая оптимизация, искусственный интеллект

## 1. Введение

Оптимизация охватывает все стороны нашей жизни, от конструирования до промышленного проектирования, от планирования бизнеса до планирования поездок [1]. В последние годы оптимизация приобрела даже большее значение. Эволюционные и популяционные (*population-based*) методы оптимизации очень популярны и применяются во многих областях техники [2]. Эти методы оптимизации позволяют осуществлять разумный выбор одного из нескольких вариантов и обеспечивают подходящую среду для решения разных задач [1]. Для большинства оптимизационных алгоритмов нужна математическая модель рассматриваемой системы. Создание математической модели сложной системы часто сопряжено с большими трудностями. Даже при наличии модели, на решение задачи может потребоваться непозволительно много времени [3]. Так что разработка оптимизационных алгоритмов является очень сложным процессом, основанным на физических явлениях, позволяющих получить глобальные и локальные операторы поиска [2].

Классические методы оптимизации могут оказаться недостаточными и неподходящими для решения сложных нелинейных крупномасштабных задач поиска и оптимизации. Классические методы нельзя эффективно приспособить для решения всех интересующих нас задач. Во многих случаях это требует ряда допущений, которые будет трудно обосновать. Часто из-за

того, что в основе классических методов поиска лежат естественные механизмы, рассматриваемую задачу моделируют так, чтобы с ней можно было справиться именно этими методами. При использовании классических методов стратегия решения обычно зависит от характера целей и ограничений и от типов параметров принятия решений. Эффективность этих методов существенно зависит также и от области поиска и количества ограничений и параметров принятия решений. Ещё один важный недостаток заключается в том, что они не предлагают общие стратегии решения задач с разными типами ограничивающих функций и переменных. Другими словами, классические методы решают задачи с целевыми и ограничивающими функциями определённого типа. Однако многие задачи оптимизации, например, в областях управления, спорта, конструирования, экономики, компьютеров и т.д., нуждаются в целевых и ограничивающих функциях и переменных разных типов одновременно. Интеллектуальные поисковые и оптимизационные алгоритмы эффективно применяются во многих областях благодаря присущим им вычислительным достоинствам и лёгкости их преобразования [3].

Интеллектуальные поисковые и оптимизационные алгоритмы общего назначения делятся на группы в соответствии с тем, что – биология, социология, химия, физика, музыка, математика, спорт, рой насекомых, растения, свет или вода – было положено в их основу. Их комбинации также можно рассматривать как отдельную категорию. Основанная на законах оптики оптимизация (*OIO*) (*Optics Inspired Optimization*) и лучевая оптимизация (*RO*) (*Ray Optimization*) являются новейшими интеллектуальными оптимизационными алгоритмами, в основу которых было положено распространение света. В основу *OIO* были положены оптические характеристики выпуклых и вогнутых зеркал, которые могут использоваться для поиска наилучших решений в случае различных поисковых и оптимизационных задач. Падающие на выпуклое зеркало лучи света отражаются в сторону, противоположную главной оси, то есть расходятся. Если же лучи падают на вогнутое зеркало, то они отражаются в направлении главной оси, то есть сходятся. Возмож-

<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского



ности *OIO* в части поиска в пределах всего пространства и поиска в пределах перспективных участков, выявленных при поиске в пределах всего пространства (далее – глобальный поиск и перспективный поиск соответственно (*exploitation and exploration*)), определяются законами отражения света выпуклыми и вогнутыми зеркалами [4, 5]. В соответствии с законом преломления света Снеллиуса, свет преломляется при прохождении границы сред с разными коэффициентами преломления. Исходя из этой особенности, в *RO* свет используется как возможное решение. Распространение лучей используется для получения оптимальных решений [6].

В 2013 г. *Kaveh* и *Khayatazad* использовали *RO* для минимизации веса балочной фермы с учётом необходимых ограничений [7]. В рамках этого исследования было проведено сравнение количественных результатов, полученных для пяти конструкций балочной фермы, показавшее, что полученный вес фермы оказался на приемлемом уровне. Использование *RO* привело к более хорошим результатам, чем использование алгоритмов *GA* [8], *ACA* [9], *BBBC* [10] и *PSO* [11]. Однако его эффективность оказалась несколько меньшей, чем у *HPSACO* [12], который является гибридным. *Kaveh* и др. разработали *RO* в 2013 г и применили этот новый подход для решения задач, в котором нет ограничений на количество переменных. Поэтому в *RO* уже не нужно было группировать переменные [13]. Разработка *RO* обеспечила улучшение баланса между глобальным поиском и перспективным поиском. Кроме того, этот алгоритм был улучшен в части ограничений на перенос (*transport constraints*) [14]. В 2014 г. при помощи *RO* был реализован эффективный гибридный метод оптимизации формы и размеров балочных ферм [14]. В этом гибридном методе были совместно использованы алгоритмы *PSO*, *HS* и *RO*, причём главную роль играл *PSO* [14]. При этом вектор перемещения формировался при помощи *RO*, тогда как *HS* использовался для усиления локальных поисковых возможностей. Результаты, полученные при использовании этого гибридного метода, показали, что он позволяет получить более хорошие результаты, чем существующие математические и интеллектуальные оптимизационные алгоритмы [14].

Алгоритм *OIO* был использован в 2015 г. применительно к задачам с ограничениями, а именно, к пяти реальным механическим инженерным задачам [5]. *OIO* был сопоставлен со многими интеллектуальными методами оптимизации, такими как *CPSO* [15], *PSRE* [16], *RSPSO* [17], *IHS* [18], *FSA* [19] и *SES* [20]. В результате *OIO* оказался лучшим из них [5]. В 2015 г. была опубликована магистерская диссертация на тему разработки основанного на *OIO* нового перестановочного метода решения комбинаторных оптимизационных задач [21], а в 2016 г. была опубликована магистерская диссертация на тему создания основанных на *OIO* методов обработки изображений [22]. В 2015 г. алгоритм *OIO* был использован для решения задачи коммивояжёра [23] и комбинаторной квадратичной задачи о назначениях [24], а в 2016 г. он был использован для маршрутизации и кластеризации в беспроводных сенсорных сетях [25]. Задача выбора и соединения главных узлов кластеров (*cluster head*) в случае беспроводных сенсорных сетей является хорошо известной оптимизационной задачей по причине своей вычислительной сложности в случаях больших сетей. В [25] *OIO* был приспособлен для решения задачи выбора главных узлов кластеров с учётом расстояний, энергии и уровней узлов.

Основанный на *OIO* метод маршрутизации был предложен для расчёта пути к станции от каждого из главных узлов кластеров с учётом тех же параметров, а именно, расстояния, энергии и уровней узлов. Эффективность *OIO* была проверена и сопоставлена с другими способами маршрутизации. В результате алгоритм *OIO* оказался более удачным, чем все остальные алгоритмы. Традиционные алгоритмы, такие как *HF* [26], *EADC* [27] и *DHCR* [28], оказались непригодными для решения задач выбора главных узлов кластеров и маршрутизации, так как производительность этих традиционных алгоритмов быстро уменьшалась по мере увеличения размера сети. В исследованиях последних лет было высказано предположение о возможности разработки основанного на искусственном интеллекте метода, позволяющего максимально увеличить область охвата и распределить узлы таким образом, чтобы свести их количество к минимуму [25]. В 2016 г. при помощи алгоритма *OIO*, использовавшего

гося применительно к охватывающей две области энергетической системе, была проведена оптимизация коэффициента усиления регулятора частоты с оптимальной нагрузкой. В этом случае *OIO* использовался для получения оптимальных параметров пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, регулирующего частоту в охватывающей две области энергетической системе [29]. Эффективность *OIO* при решении этой задачи сравнивалась с эффективностью алгоритмов *PSO* и *Bacteria Foraging Optimization Algorithm* [30]. *OIO* оказался более хорошим, чем эти алгоритмы, в части значений максимального времени отключения и урегулирования (*blackout and settlement time*). Было высказано предположение о возможности разработки оптимального ПИД-регулятора с функцией самонастройки, что продемонстрировало бы увеличение практической полезности *OIO* [30].

Интеллектуальные поисковые и оптимизационные алгоритмы были предложены для эффективного решения разных задач. Одна из важных современных тенденций в области интеллектуальных алгоритмов заключается в разработке новых методов поиска на основе законов распространения света. Связанные со светом концепции, явления и процессы используются при разработке эффективных оптимизационных алгоритмов. В данной работе делается попытка рассмотрения наиболее важных положений двух уже существующих новых интеллектуальных методов оптимизации, в основу которых были положены законы распространения света, а также их отличительных особенностей, применительно к решению сложных задач оптимизации. Эффективность основанных на законах распространения света интеллектуальных оптимизационных алгоритмов впервые сравнивается в одинаковых условиях применительно к свободным от ограничений базовым функциям (*benchmark functions*) и имеющим ограничения реальным конструкторским задачам.

## 2. Методы

Природа всегда была для людей хорошим учителем. Например, изобретение радиолокации стало возможным благодаря изучению поведения лету-

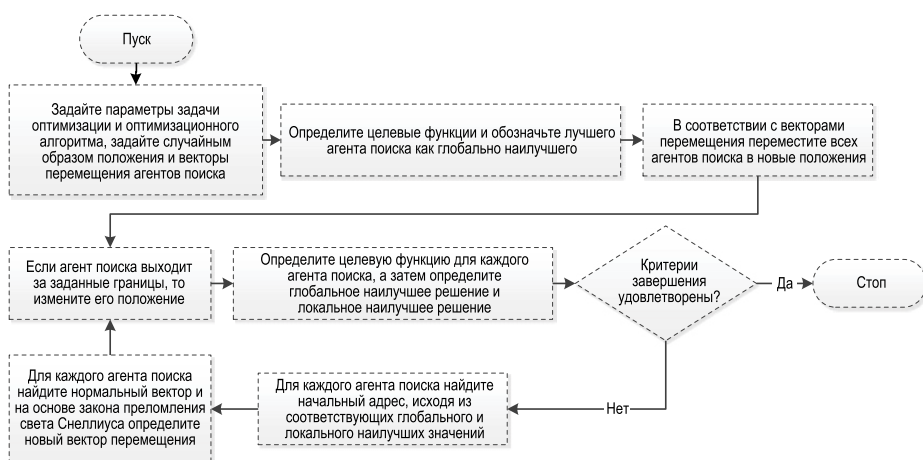


Рис. 1. Блок-схема RO [6]

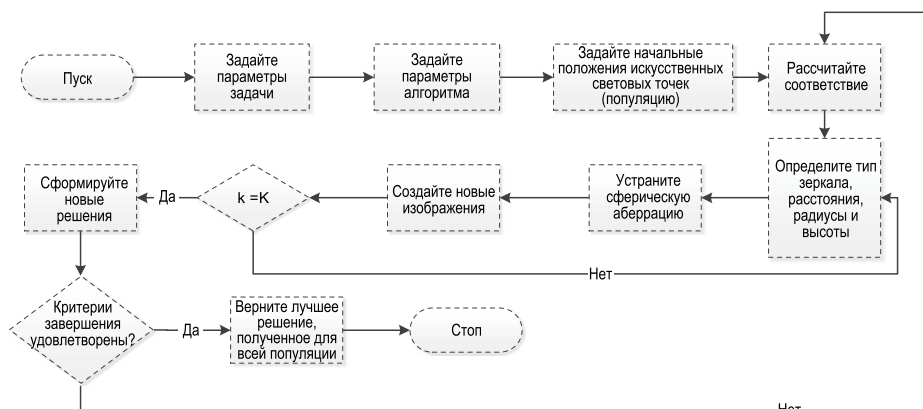


Рис. 2. Блок-схема O/O [4, 5]

чих мышей. Интеллектуальные методы оптимизации, в основу которых положены поведение живых существ или природные явления, используются для решения задач, отнимающих много времени или не допускающих формирование математических моделей. Для многих задач область поиска решения или бесконечна, или настолько велика, что невозможно рассмотреть все варианты их решения. Для получения приемлемого результата требуется оценить все решения и выбрать из них хорошее. Оценка решений, позволяющая найти приемлемое решение подобной задачи, на самом деле означает оценку только «некоторых решений» из всего пространства решений. Способ, используемый для отбора этих некоторых решений, и то, как осуществляется их выбор, зависит от метода применения искусственного интеллекта [31].

Решение задачи, полученное интеллектуальным оптимизационным методом, может рассматриваться как хорошее, глобальное или почти глобальное оптимальное решение [31]. Интеллектуальный оптимизационный алгоритм

представляет собой вычислительный метод, предназначенный для определения того, какое из возможных действий окажется эффективным для выполнения какой-то задачи или достижения поставленной цели.

Интеллектуальные оптимизационные алгоритмы группируют в зависимости от того, основаны они на природных явлениях или нет, от количества – один или несколько – вариантов решений, которые они рассматривают, от характера – динамическая или статическая – целевой функции, от того, используется или нет структура памяти, и от того, какая – единая или множественная – структура окрестности используется.

Причины потребности в интеллектуальной оптимизации заключаются в следующем:

- задача оптимизации может иметь структуру, при которой невозможно задать процесс поиска оптимального решения;
- с точки зрения наглядности, интеллектуальные поисковые алгоритмы могут быть намного более понятными для лиц, принимающих решения;

– интеллектуальные оптимизационные алгоритмы могут использоваться как часть процесса обучения и поиска точного решения;

– определения, сформулированные при помощи математических выражений, часто игнорируют наиболее сложные части реальных задач. Неточность данных, используемых для определения параметров модели, может привести к большим ошибкам, чем в случае субоптимального решения, которое может быть получено в рамках интеллектуальной оптимизации [32].

Интеллектуальные оптимизационные алгоритмы общего назначения делятся на группы в соответствии с тем, что – биология, социология, химия, физика, музыка, математика, спорт, рой насекомых, растения, свет или вода – было положено в их основу. Их комбинации также можно рассматривать как отдельную категорию.

Все эти популяционные итерационные методы при проведении вычислений поддерживают равновесие между глобальным поиском и перспективным поиском. В общем случае глобальный поиск будет более эффективным на начальных итерациях, а ближе к концу увеличится значимость перспективного поиска.

## 2.1. Лучевая оптимизация (RO)

RO представляет собой популяционный вероятностный интеллектуальный поисковый и оптимизационный алгоритм, который был предложен в 2012 г. [6]. Свет, который относится к естественным явлениям, изменяет направление своего распространения в соответствии с законами оптики при переходе из светлой среды в темную (*from the light environment into a dark environment*). Исходя из этой особенности света, в RO в качестве возможного решения используются лучи света. Такое поведение света помогает проводить перспективный поиск уже на первых итерациях и помогает обеспечить сходимость к оптимальному решению на последних итерациях [6]. Оптимизационный процесс завершается тогда, когда удовлетворены заданные условия. Если они не удовлетворены, то оптимизационный процесс продолжается, и возможные решения перемещают в новые точки. Итерации проводят до тех пор, пока не будут удовлет-



## Эффективность алгоритмов на примере базовых функций

Базовая функция	Оптимизационные алгоритмы				
	<i>GEN</i>	<i>GEN_S</i>	<i>GEN_S_M_LS</i>	<i>OIO</i>	<i>RO</i>
Гривонка, $n=2$	18838 (0,91)	3111 (0,91)	1652 (0,99)	1825,94	1091 (0,98)
Сферическая, $n=3$	9900	3040	1281	506,72	452
Гольдштейна-Прайса, $n=2$	1478	1478	1325	1071,4	451
Экспоненциальная, $n=2$	938	936	807	572,14	136
Экспоненциальная, $n=4$	3237	3237	1496	1376,18	382
Экспоненциальная, $n=8$	3237	3237	1496	2889,08	1287
Экспоненциальная, $n=16$	8061	8061	1945	28994,14	17236 (0,46)
Смешанная косинусная, $n=4$	2105	2105	1539	1673,7	802
Бохачевского-1, $n=2$	3992	3356	1615	567,36	677
Бохачевского-2, $n=2$	20234	3373	1636	620,7	582
Растригина, $n=2$	1533 (0,97)	1523 (0,97)	1381	753	1013 (0,98)

ворены заданные условия. Блок-схема *RO* приведена на рис. 1 [6].

## 2.2. Алгоритм оптической оптимизации (*OIO*)

*OIO* представляет собой основанный на законах оптики интеллектуальный оптимизационный алгоритм, который был предложен в [4, 5]. При этом свойства света и его поведение подчиняются законам оптики. Практическое применение этих законов охватывает зеркала, линзы, телескопы, микроскопы, технические устройства и т.д. Кривое или сферическое зеркало имеет искривлённую вогнутую или выпуклую отражающую поверхность. Большинство кривых зеркал имеют сферическую форму.

Попадая на вогнутое зеркало, лучи света отклоняются в направлении главной оси, то есть сходятся, а попадая на выпуклое зеркало, лучи света отклоняются в направлении от главной оси, то есть расходятся. Возможности *OIO* в части глобального и перспективного поисков определяются этими присущими зеркалам процессами. Другими словами, отражающая поверхность зеркала играет роль поисковой функции. Блок-схема *OIO* приведена на рис. 2 [4, 5].

## 3. Результаты

### 3.1. Результаты, полученные применительно к свободным от ограничений базовым функциям

Исследователи часто используют базовые функции для сравнения оп-

тимизационных и поисковых алгоритмов [33]. Существует большое количество базовых задач, которые называют одномодальными, многомодальными и смешанными. Помимо того, что базовые функции описываются сложными математическими выражениями, они могут иметь многочисленные локальные и глобальные минимумы. Из-за этих особенностей эффективность интеллектуальных оптимизационных алгоритмов оценивается в одинаковых условиях. В данном исследовании эффективность основанных на законах распространения света интеллектуальных поисковых и оптимизационных алгоритмов (*light-based intelligent search and optimization algorithms*) сравнивалась применительно к следующим базовым функциям: функция Гривонка, смешанная косинусная функция, функция Гольдштейна-Прайса, сферическая функция, экспоненциальная функция, функция Бохачевского-1, функция Бохачевского-2 и функция Растригина.

Сравнение эффективности *OIO* и *RO*, которые относятся к основанным на законах распространения света оптимизационным алгоритмам, проведено в табл. 1 применительно к базовым функциям. Там же проведено сравнение этих основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов с несколькими разновидностями генетического алгоритма [6]. В таблице также приведено количество оценок функций, обеспечивающее заданную точность ( $\epsilon = f_{min} - f_{final} = 10^{-4}$ ). Значения, приведённые в табл. 1 в круглых скобках, соответствуют относительному количеству

результативных прогонов алгоритмов, обеспечивших эту заданную точность. Отсутствие скобок говорит о том, что все прогоны алгоритма были результативными. При проведении расчётов размерность задачи в случае сферической и смешанной косинусной функций была равна 3 и 4 соответственно, тогда как для остальных функций она была равна 2. Размер популяций (*number of populations*) был равен 20, количество оценок функций (*NFE*) было равно 20000, а количество независимых прогонов было выбрано равным 50. Кроме того, для оценки эффективности основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов при решении задач большой размерности, были рассмотрены ещё и экспоненциальные функции порядка 2, 4, 8 и 16. В случае экспоненциальной функции при равной 16 размерности задачи и равном 100 размере популяций *NFE* оказалось равным 50000 (полученные результаты приведены в табл. 1). В этой таблице *GEN*, *GEN\_S* и *GEN\_S\_M\_LS* представляют собой варианты генетического алгоритма, которые были сочтены перспективными [10].

При подробном рассмотрении табл. 1 видно, что в случае функции Гривонка применение *RO* приводит к более хорошим результатам по сравнению со всеми остальными интеллектуальными оптимизационными алгоритмами. Более хорошие решения в части относительного количества результативных прогонов обеспечивал *OIO*. Основанные на законах распространения света оптимизационные алгоритмы представляются на-

Результаты оптимизации, полученные при использовании различных методов решения задачи конструирования пружины, работающей на растяжение/сжатие

Метод	Конструктивные параметры и наилучшие результаты ( $f_{cost}$ )			
	$x_1$	$x_2$	$x_2$	$f_{cost}$
<i>RO</i>	0,051370	0,349096	11,76279	0,0126788
<i>OIO</i>	0,054557	0,429089	8,053812	0,0128404
<i>Belegundu</i>	0,050000	0,315900	14,250000	0,0128334
<i>Arora</i>	0,053396	0,399180	9,185400	0,0127303

много более результативными, чем прочие алгоритмы, в случаях сферической функции, функции Гольдштейна-Прайса, функции Бохачевского-1, функции Бохачевского-2 и экспоненциальной функции с  $n = 2$  и  $n = 4$ . В случае экспоненциальной функции с  $n = 8$  оказалось, что лучше остальных алгоритмов работает *RO*. Однако нельзя считать, что основанные на законах распространения света методы всегда лучше всех остальных методов, так как применительно к экспоненциальной функции алгоритм *OIO* оказался хуже алгоритма *GEN\_S\_M\_LS*. Было замечено, что в случае смешанной косинусной функции наиболее результативным методом оказался *RO*. Алгоритм *OIO* оказался, однако, более результативным, чем алгоритмы *GEN* and *GEN\_S*, но менее результативным, чем *GEN\_S\_M\_LS*. В случае функции Растригина наилучшим алгоритмом представляется *OIO*.

### 3.2. Результаты, полученные применительно к реальным конструкторским задачам

#### 3.2.1. Пружина, работающая на растяжение/сжатие

Эта конструкторская задача была впервые рассмотрена в [7]. Целью при этом являлась минимизация веса работающей на растяжение/сжатие пружины при наличии ограничений в части минимального прогиба, частоты приложения нагрузки и напряжения сдвига [7]. У задачи были четыре ограничения в виде нелинейных неравенств и три непрерывные переменные.

При проведении расчётов размер популяций был равен 40, *NFE* было равно 10000, а количество независимых прогонов было равно 50. Эффективность основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов рассматривалась в оди-

Таблица 3  
Средние значения ( $f_{mean}$ ) и среднеквадратичные отклонения (*Std. Dev.*) результатов для задачи о растяжении/сжатии пружины

Метод	$f_{mean}$	<i>Std. Dev.</i>
<i>RO</i>	0,13547	0,001159
<i>OIO</i>	0,01326	0,000297

наковых условиях. Конструктивные параметры задачи и наилучшие результаты (*best cost values*) приведены в табл. 2, а в табл. 3 приведены средние значения и среднеквадратичные отклонения результатов, полученных при решении данной задачи при помощи разных алгоритмов.

Как следует из табл. 2, применительно к наилучшим результатам ( $f_{cost}$ ) *RO* работает лучше, чем *OIO*. А так как результаты, полученные при использовании *OIO*, оказались не лучше, чем при использовании *Belegundu* и *Arora* [34], то нельзя утверждать, что все основанные на законах распространения света оптимизационные алгоритмы лучше остальных алгоритмов. Однако как следует из приведённых в табл. 3 среднеквадратичных отклонений и средних значений параметров, *OIO* обеспечивает получение более стабильных результатов, чем *RO*.

#### 3.2.2. Сварная балка

Основная цель этой конструкторской задачи состоит в обеспечении минимальной стоимости изготовления сварной балки при наличии ограничений на напряжение сдвига, сосредоточенную нагрузку (*bulking load*), напряжение при изгибе, отклонение конца балки; имеется также и дополнительное ограничение (*side constraint*) [7, 30, 35]. В задаче имеются четыре непрерывные переменные.

При проведении расчётов размер популяций был равен 40, *NFE* было равно 10000, а количество независимых прогонов было равно 50. Эффективность основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов рассматривалась в одинаковых условиях. Конструктивные параметры задачи и наилучшие результаты приведены в табл. 4, а в табл. 5 приведены средние значения и среднеквадратичные отклонения результатов. При этом эффективность основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов сравнивалась и с эффективностью других математических оптимизационных алгоритмов.

Как показано в табл. 4 и 5, применительно к наилучшим ( $f_{cost}$ ) и средним ( $f_{mean}$ ) результатам *RO* работает лучше, чем *OIO*. Кроме того, из табл. 5 следует, что основанные на законах распространения света оптимизационные алгоритмы работают успешнее, чем другие методы, такие как итерационный, *David*, симплексный и случайных чисел [35]. А из приведённых в табл. 4 результатов расчётов следует, что если говорить о реальных конструкторских задачах, то по сравнению с прочими рассмотренными методами основанные на законах распространения света оптимизационные алгоритмы хуже подходят для поиска локальных минимумов и лучше сходятся к глобальным минимумам.



Оптимальные результаты для сварной балки

Метод	Конструктивные параметры и наилучшие результаты ( $f_{cost}$ )				
	$x_1$	$x_2$	$x_2$	$x_4$	$f_{cost}$
<i>RO</i>	0,2037	3,5285	9,0042	0,2072	1,7353
<i>OIO</i>	0,1914	3,8049	9,1382	0,2052	1,7605
Итераций	0,2444	6,2189	8,2915	0,2444	2,3815
<i>David</i>	0,2434	6,2552	8,2915	0,2444	2,3841
Симплексный	0,2792	5,6256	7,7512	0,2796	2,5307
Случайных чисел	0,4575	4,7313	5,0853	0,6600	4,1185

#### 4. Обсуждение

Таблица 5

Средние значения ( $f_{mean}$ ) и среднеквадратичные отклонения (*Std. Dev.*) результатов для сварной балки

Метод	$f_{mean}$	<i>Std. Dev.</i>
<i>RO</i>	0,13547	0,001159
<i>OIO</i>	0,01326	0,000297

Если говорить о реальных практических задачах оптимизации, то существует большое количество интеллектуальных методов, в основу которых положены природные и другие явления. Почти все интеллектуальные оптимизационные алгоритмы содержат основанные на популяциях метаэвристические поисковые процедуры, включающие в себя случайные выбор и изменения. Эти алгоритмы должны включать в себя две ключевые составляющие: глобальный поиск и перспективный поиск.

*RO* и *OIO* – это два метода, в основу которых были положены связанные со светом концепции, явления и процессы, вследствие чего в данной работе их называют основанными на законах распространения света оптимизационными алгоритмами. Согласно полученным экспериментальным результатам, алгоритм *RO* в целом лучше алгоритма *OIO* как в случае свободных от ограничений базовых функций, так и в случае имеющих ограничения реальных конструкторских задач. Однако если сравнивать с другими методами, то эти алгоритмы не всегда оказываются наилучшими. Согласно теореме «Бесплатного обеда не бывает» (*No-Free-Lunch theorem*), нет одного-единственного наиболее эффективного универсального метода решения оптимизационных задач всех типов. Несмотря на свою теоретическую обоснованность, теорема «Бесплатного обеда не бывает» имеет ограниченное практическое значение, так как на практике не требуется ни решение всех задач, ни усреднённое рассмотрение. На практике, одной из основных целей оптимизационных задач является получение за приемлемое

время высококачественного приемлемого или оптимального решения. При решении ряда задач некоторые методы могут оказаться лучше остальных. Более того, для хорошей работы метода необходимо обеспечить баланс между глобальным поиском и перспективным поиском. Однако задача обеспечения такого баланса до сих пор не решена, и ни один метод не может похвастаться его наличием. Достижение этого баланса является сверхсложной оптимизационной задачей, которая зависит от многих факторов, таких как механизм работы метода, задание его параметров и их контроль. Более того, подобный баланс может оказаться в принципе не универсальным, а зависящим от рассматриваемой задачи.

Исследователи не стремятся разработать один-единственный наиболее удачный метод решения задач всех типов. Они стараются предложить наиболее удачные варианты существующих методов и разработать новые методы, в основу которых будут положены ещё не опробованные природные явления. Кроме того, на эффективность алгоритмов влияют значения их параметров. Правильное задание точно подобранных значений параметров является необходимым условием хорошей работы алгоритма. Настройка параметров всё ещё остаётся открытой для проведения исследований.

#### 5. Заключение

В данной работе впервые проведён обзор основанных на законах распространения света методов оптимизации и посвящённой им литературы. Эффективность этих алгоритмов была исследована применительно к свободным от ограничений базовым функциям и имеющим ограничения реальным конструкторским задачам. Было также проведено сравнение основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов друг с другом и с другими интеллектуальными поисковыми и оптимизационными алгоритмами, такими как *GA* и его разновидности. Успешность основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов была подтверждена экспериментально.

Эффективность основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов была рассмотрена применительно к решению имеющих ограничения реальных конструкторских задач. При этом использовались задачи конструирования сварной балки и работающей на растяжение/сжатие пружины, и эффективность основанных на законах распространения света оптимизационных алгоритмов впервые сравнивалась в одинаковых условиях. В случае работающей на растяжение/сжатие пружины *RO* оказался лучше всех других

методов, включая *OIO*, причём при решении этой задачи *OIO* не продемонстрировал более хорошие результаты, чем другие методы. Так что применительно к задаче конструирования работающей на растяжение/сжатие пружины основанные на законах распространения света оптимизационные алгоритмы в целом проявили себя не лучше, чем другие описанные в литературе интеллектуальные методы. В случае сварной балки было установлено, что основанные на законах распространения света поисковые и оптимизационные алгоритмы сходятся к глобальным минимумам лучше, чем прочие алгоритмы. Важным следствием этого является то, что хотя интеллектуальные методы обеспечивают получение хороших результатов в случае имеющих ограничения реальных конструкторских задач, всё же не удаётся доказать, что они хороши и применительно ко всем свободным от ограничений и имеющим ограничения задачам и функциям.

Насколько нам известно, в литературе отсутствуют упоминания об отличных от *RO* и *OIO* основанных на законах распространения света интеллектуальных оптимизационных алгоритмов. Что касается эффективности основанных на законах распространения света алгоритмов, то если учитывать результаты, полученные применительно как к свободным от ограничений базовым функциям, так и к имеющим ограничения реальным конструкторским задачам, оказывается, что лучшую сходимость к глобальному решению обычно демонстрирует алгоритм *RO*. Основанные на законах распространения света оптимизационные алгоритмы появились совсем недавно, и полученные в данной работе результаты относятся к их классическим базовым вариантам. В дальнейшем более хороших результатов можно обеспечить, предложив новые распределённые, гибридные, адаптивные и параллельные варианты с оптимизированными параметрами. Для улучшения эффективности в эти методы можно включить элементы и возможности теории хаоса и квантовой вычислительной техники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hussain, K., Salleh, M.N.M., Cheng, S., Shi, Y. Metaheuristic research: a comprehensive survey // *Artificial Intelligence Review*. – 2018. – Vol. 49, No. 1. – P. 1–43.
- Nabaei, A., Hamian, M., Parsaei, M.R., Safdari, R. Samad-Soltani, T., Zarrabi, H., Ghassemi, A. Topologies and performance of intelligent algorithms: a comprehensive review // *Artificial Intelligence Review*. – 2018. – Vol. 49, No. 1. – P. 79–103.
- Alatas, B. Chaotic bee colony algorithms for global numerical optimization // *Expert Systems with Applications*. – 2010. – Vol. 37, No. 8. – P. 5682–5687.
- Kashan, A.H. A new metaheuristic for optimization: Optics inspired optimization // *Computers & Operations Research*. – 2015. – Vol. 55. – P. 99–125.
- Kashan, A.H. An effective algorithm for constrained optimization based on optics inspired optimization (OIO) // *Computer-Aided Design*. – 2015. – Vol. 63. – P. 52–71.
- Kaveh, A., Khayatazad, M. A new meta-heuristic method: ray optimization // *Computers & structures*. – 2012. – Vol. 112. – P. 283–294.
- Kaveh, A., Khayatazad, M. Ray optimization for size and shape optimization of truss structures // *Computers & Structures*. – 2013. – Vol. 117. – P. 82–94.
- Tsoulos, I.G. Modifications of real code genetic algorithm for global optimization // *Applied Mathematics and Computation*. – 2008. – Vol. 203. – P. 598–607.
- Camp, C.V., Bichon J. Design of space trusses using ant colony optimization // *Journal of Structural Engineering*. – 2004. – Vol. 130. – P. 741–751.
- Camp, C.V. Design of space trusses using big bang–big crunch optimization // *Journal of Structural Engineering*. – 2007. – Vol. 133. – P. 999–1008.
- Perez, R.E., Behdinan, K. Particle swarm approach for structural design optimization // *Computers & Structures*. – 2007. – Vol. 85. – P. 1579–1588.
- Kaveh, A., Talatahari, S. Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures // *Computers & Structures*. – 2009. – Vol. 87. – P. 267–283.
- Kaveh, A., Ghazaan, M.I., Bakhshpoori, T. An improved ray optimization algorithm for design of truss structures // *Periodica Polytechnica, Civil Engineering*. – 2013. – Vol. 57, No. 2. – P. 97–112.
- Kaveh, A., Javadi, S.M. Shape and size optimization of trusses with multiple frequency constraints using harmony search and ray optimizer for enhancing the particle swarm optimization algorithm // *Acta Mechanica*. – 2014. – Vol. 225, No. 6. – P. 1595–1605.
- He, Q., Wang, L. An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2007. – Vol. 20, No. 1. – P. 89–99.
- Yildiz, A. R. A novel particle swarm optimization approach for product design and manufacturing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 40, No. 5. – P. 617–628.
- Wang, J., Yin, Z. A ranking selection-based particle swarm optimizer for engineering design optimization problems // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2008. – Vol. 37, No. 2. – P. 131–147.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M., Damangir, E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems // *Applied mathematics and computation*. – 2007. – Vol. 188, No. 2. – P. 1567–1579.
- Hedar, A.R., Fukushima, M. Derivative-free filter simulated annealing method for constrained continuous global optimization // *Journal of Global Optimization*. – 2006. – Vol. 35, No. 4. – P. 521–549.
- Mezura-Montes, E., Coello, C.C., Landa-Becerra, R. Engineering optimization using simple evolutionary algorithm // *Proc. 15th IEEE International Conf. on Tools with Artificial Intelligence*, 2003. – P. 149–156.
- Badrloo, S. A new method for solving combinatorial optimization problems with permutation based solution structure using optics inspired optimization // *Azad University, Science and Research Branch*, 2015, Iran.
- Moghadasi, M. Design of image processing methods using league championship algorithm and optics inspired optimization // *Azad University, Science and Research Branch*, 2015, Iran.
- Badrloo, S., Kashan, A.H. A new method for the travelling salesman problem based on Optics Inspired Optimization // *Int. Conf. on Modern Research in Management and Industrial Engineering*, 2015, Iran.
- Badrloo, S., Kashan A.H. A new method for the quadratic assignment problem based on Optics Inspired Optimization // *Int. Conf. on Modern Research in Management and Industrial Engineering*, 2015, Iran.
- Lalwani, P., Banka, H., Kumar, C. CRWO: Clustering and routing in wireless sensor networks using optics inspired optimization // *Peer to Peer Networking and Applications*. – 2017. – Vol. 10, No. 3. – P. 453–471.
- Abdulla, A.E., Nishiyama, H., Kato, N. Extending the lifetime of wireless sensor networks: A hybrid routing algorithm // *Computer Communications*. – 2012. – Vol. 35, No. 9. – P. 1056–1063.
- Yu, J., Qi, Y., Wang, G., Gu, X. A cluster-based routing protocol for wireless sensor networks with non-uniform node distribution // *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. – 2012. – Vol. 66, No. 1. – P. 54–61.
- Sabet, M., Naji, H.R. A decentralized energy efficient hierarchical cluster-based



routing algorithm for wireless sensor networks // AEU-International Journal of Electronics and Communications. – 2015. – Vol. 69, No.5. – P. 790–799.

29. *Ozdemir, M.T., Ozturk, D.* İki bölge- li güç sisteminin optikten esinlenen optimizasyon algoritması ile optimal yük frekans kontrolü // Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2016. – Vol. 28, No. 2. – P. 57–66.

30. *Muller, S.D., Marchetto, J., Airaghi, S., Koumoutsakos, P.* Optimization based on bacterial chemotaxis // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6. – P. 16–29.

31. *Altay, E.V., Alatas, B.* Bird swarm algorithms with chaotic mapping // Artificial Intelligence Review. – 2020. – Vol. 53, No. 2. – P. 1–42.

32. *Alatas, B.* Sports inspired computational intelligence algorithms for global optimization // Artificial Intelligence Review. – 2019. Vol. 52, No. 3. – P. 1579–1627.

33. *Bingol, H., Alatas, B.* Chaotic league championship algorithms // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2016. – Vol. 41, No. 12. – P. 5123–5147.

34. *Belegundu, A.D., Arora, J.S.* A study of mathematical programming methods for structural optimization. Part I: Theory // Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1985. – Vol. 21, No. 9. – P. 1583–1599.

35. *Ragsdell, K.M., Phillips, D.T.* Optimal design of a class of welded structures using geometric programming // Journal of Engineering for Industry. – 1976. – Vol. 98, No. 3. – P. 1021–1025.



**Билал Алатас (Bilal Alatas), Ph.D., профессор. Заведующий кафедрой разработки программного обеспечения Университета Фират, Элязыг, Турция. Область научных интересов: искусственный интеллект,**

**поиск закономерностей в базах данных, анализ социальных сетей, метаэвристическая оптимизация и машинное обучение. Автор более 150 публикаций в известных международных журналах и редактируемых трудах конференций. Редактировал 12 журналов и рецензировал статьи для 60 журналов**



**Харун Бингол (Harun Bingol), M.S. (2016 г.). Аспирант (Ph.D.) Университета Фират, Элязыг, Турция. Область научных интересов: искусственный интеллект, оптимизация, поиск закономерностей в базах данных, анализ социальных сетей и машинное обучение**

### «Да будет свет» Библия

В 2017 году ЮНЕСКО провозгласила 16 мая ежегодным Днём Света.

Тем самым, наконец, была официально признана исключительная роль световой энергии Солнца в создании жизни на Земле, в создании растительности и животного мира, и в том числе человека на нашей планете.

Это развитие шло крайне медленно, в течение сотен тысячелетий, пока в конце XIX века не наступила эра электричества. С появлением электрической лампы и электрических сетей началась эпоха электрического освещения, придавшая мощный импульс быстрому развитию человеческого общества, расцвету образования, культуры, промышленности и транспорта – всего того, без чего не мыслимо существование человечества.

Именно освещение позволило человечеству использовать не только короткий световой день, но продлило условия для полезной творческой деятельности и отдыха.

Без современного освещения и световой сигнализации, то есть без современных зрительных световых технологий, оказалась бы невозможной жизнь городов и особенно городского транспорта, существование металлургических и химических заводов с непрерывным производственным циклом.

Что такое города-миллионники без метрополитенов, а станции и тоннели метро без электрического освещения?

Как могли бы существовать средства транспорта (автомобили, поезда, самолёты, корабли) без освещения внутренних помещений и путей следования? Каково было бы состояние людей без современной светотерапии, новых видов безоперационных методов лечения? Насколько бы ухудшилось состояние зрения учащейся молодёжи без хорошего освещения? Какой бы была производительность труда на заводах и качество продукции без специального освещения? А как бы делали сложнейшие полосные операции, для которых требуется освещённость в десятки тысяч люкс при старом керосиновом или свечном освещении?

На электрическое освещение в Москве и Санкт-Петербурге расходуется до 25 % от всей потребляемой в этих городах электроэнергии. В СССР работало более миллиарда световых точек преимущественно с лампами накаливания. За всё двадцатое столетие и 20 лет XXI века светотехники боролись за повышение эффективности осветительных установок, которое во многом зависит от световой отдачи (лм/Вт) и срока службы источников света. На наших глазах мы отошли от ламп накаливания (10 лм/Вт и 1000 час.), от

люминесцентных лампы (50–55 лм/Вт и 15–20 тыс.час.) и пришли к натриевым лампы высокого давления (120–130 лм/Вт, 20 тыс.час.) и, наконец, к светодиодам (160–180 лм/Вт, 50 тыс.час.). Это, а также развитие в стране электрогенерирующих мощностей, электростанций, позволило за последние 50 лет резко повысить уровень и качество освещения.

Надо ясно понимать, что свет (оптическое излучение) включает в себя не только видимое, но и не видимое излучение – в ультрафиолетовом и инфракрасном участках спектра. К незрительным световым технологиям надо, прежде всего, отнести использование ультрафиолетового излучения в облучательных установках. А это обеззараживание воздуха и поверхностей в помещениях, что так важно всегда, но особенно сейчас при пандемии коронавируса. К ним же относятся обеззараживание с помощью того же бактерицидного излучения воды, что позволяет превращать грязную воду, например, из Невы и Ладожского озера, в кристально чистую питьевую воду. Такие установки стоят на Главной водопроводной станции Санкт-Петербурга. Эту воду пьёт большая часть жителей этого города.

К незрительным световым технологиям относятся все облучательные установки в сельском хозяйстве в теплицах защищённого грунта.

Сюда же относятся солнечные электростанции, превращающие солнечную энергию в электрическую. А также световая локация облачности, и полей со злаками и другими растениями для определения степени их созревания.

Новые технологии пробивают себе дорогу. Впервые в мировой светотехнике найдены пути совершенно безопасного и надёжного освещения особенно взрывоопасных помещений насосных станций с помощью полых световодов (производство взрывчатки, освещения насосных станций нефтепроводов и газопроводов). Полые световоды позволяют осветить и такие новые производства, как термостатные цеха и помещения с особыми требованиями к частоте микрорелектронной промышленности и других.

Без света жизни НЕТ, прогресса человечества не будет.

Важно, чтобы все это понимали. Также важно создавать комфортную световую среду затраты на которую многократно окупятся благодаря сохранению здоровья людей, повышению производительности труда, качества продукции и исключения возможных техногенных катастроф.

**Академик АЭН  
Ю.Б. Айзенберг**

## Онлайн семинар Американского светотехнического общества (*IES*) на тему «Бактерицидное УФ облучение во время коронавируса *COVID-19*»



Эдвард Нарделл



Дэвид Слайни

Пол Дональд  
Форбс

Рольф Бергман



Ричард Винсент



Дин Сапута



Пол Дженсон

7 мая 2020 года состоялся онлайн семинар Американского светотехнического общества (*IES*) на тему «Бактерицидное УФ облучение во время коронавируса *COVID-19*». На семинаре было представлено 7 презентаций, подготовленных известными специалистами в области фотобиологии, медицины, УФ излучения и дезинфекции воздуха и поверхностей бактерицидным излучением.

Открыл семинар Эдвард Нарделл, профессор кафедры медицины и социальной медицины Гарвардской медицинской школы, доцент кафедр иммунологии, инфекционных заболеваний и гигиены окружающей среды Гарвардской школы общественного здравоохранения, с докладом на тему «Достижения в области бактерицидного УФ-облучения: снижение распространения *COVID-19*». В своем докладе он кратко рассмотрел вопросы истории УФ дезинфекции воздуха, существующие установки для подавления микобактерии туберкулеза, а также варианты использования открытых облучателей в системах, предназначенных для дезинфекции верхних слоев воздуха в помещениях. В докладе цитировались результаты наиболее интересных работ по данной проблеме, приведены некоторые параметры реализованных установок УФ установок и конструктивные идеи, в частности, для крупных помещений с постоянным пребыванием людей. В докладе рассмотрены перспективы применения УФ-светодиодов в бактерицидной области спектра и возможности дальнейших исследований бактерицидного действия УФ излучения в области дальнего УФ ( $\lambda = 207\text{--}222\text{ нм}$ ) с использованием эксимерных ламп.

Следующим с докладом «Основы бактерицидной УФ фотобиологии и безопасность» выступил Дэвид Х. Слайни, председатель комитета *IES* по фотобиологии, доктор философии в области

биофизики и медицинской физики. Помимо этого Дэвид Х. Слайни является членом, советником и председателем многочисленных комитетов, занимающихся разработкой стандартов безопасности для защиты от неионизирующего излучения (*ANSI, ISO, ACGIH, IEC, WHO, NCRP* и *ICNIRP*). В его докладе были рассмотрены фотобиологические аспекты действия бактерицидного излучения на патогенные микроорганизмы, а также вопросы безопасности человека при попадании УФ-излучения на кожу и органы зрения, приведены верхние значения допустимых доз УФ облучения для человека –  $60\text{ Дж/м}^2$  при 8 часовом режиме облучения.

Далее выступил Пол Д. Форбс, профессор Медицинской школы Университета Темпл, директор научно-исследовательской лаборатории фототоксикологии. В докладе «Спектры действия: источники руководства по фотоканцерогенезу» были освещены вопросы исследования эффекта фотоканцерогенеза, вызываемого УФ излучением; показано, что наиболее опасным и обладающим максимальной канцерогенной активностью является спектральный диапазон от 280 до 320 нм, который, как известно, присутствует в спектре ртутных ламп высокого давления. Отметим, что по данным Технического Отчета *CIE Ultraviolet Air Disinfection (CIE155, 2003)* вредное действие излучения с  $\lambda=253,7\text{ нм}$ , которое определяет бактерицидную эффективность ртутных ламп низкого давления, почти на 2 порядка ниже, чем у излучения с  $\lambda = 300\text{ нм}$ .

В докладе Рольфа Бергмана, доктора философии в области электротехники в Университете штата Миннесота, под названием «Источники излучения в бактерицидной УФ области спектра» были рассмотрены спектральные и энергетические характеристики и особенности применения для целей



УФ-дезинфекции различных типов традиционных источников ОИ: ртутных лампы низкого и высокого давления, а также шаровых и трубчатых ксеноновых ламп. Отмечался повышенный интерес для исследовательских задач, проявляемый в последние годы, к эксимерным лампам с хлоридом Кг, излучение которых в УФ-С области сосредоточено в узком диапазоне с  $\lambda = 222$  нм, что позволяет проводить исследования бактерицидной эффективности длин волн в короче  $\lambda = 253,7$  нм. Автор упомянул также о появлении первых образцов светодиодных УФ-С излучателей с  $\Delta\lambda = 264\text{--}280$  нм с КПД пока 1 %, перспективы которых расцениваются весьма высоко. В завершающей части доклада кратко рассмотрены вопросы измерений излучения в УФ-С области, которые являются сложной метрологической задачей и должны проводиться в соответствии с требованиями международного стандарта *ISO/IEC17025*.

Семинар продолжился презентацией Ричарда Винсента, специалиста по исследованиям воздействия бактерицидного УФ излучения, на тему «Применение системы бактерицидного УФ обеззараживания воздуха» Автор детально исследовал вопрос применения открытых и закрытых светильников в помещениях, привел рекомендации по использованию бактерицидных облучателей для помещений различных высот. Например, в помещениях с высотой потолка более 3 м он рекомендует использовать открытый тип светильников, при этом сам облучатель должен монтироваться на высоте не ниже 2,1 м от пола и выходящий поток должен охватывать, по возможности, большую часть верхнего объема помещения. Помимо этого, автор привел пример компьютерного расчета и моделирования системы обеззараживания воздуха в помещении с помощью УФ-облучателя и вентилятора, а затем представил реализуемый проект в Национальном институте респираторных туберкулезных заболеваний в Нью-Дели, Индия. Так же в докладе приводятся данные по коэффициентам отражения излучения линии  $\lambda = 253,7$  нм для различных материалов, в частности, для белой оштукатуренной стены – 40–60 %.

Следующим с докладом «Применение УФ-С в воздуховодах» выступил Дин Сапута, член нескольких технических комитетов Американского общества инженеров по отоплению, холодильной технике и кондиционированию воздуха (*ASHRAE*). В своем докладе он подробно описал применения УФ-ламп в системах вентиляции и кондиционирования, рассмотрел принципы работы и обеззара-

живания воздуха в системах воздуховодов. По рекомендациям *ASHRAE* необходимо устанавливать ртутные лампы низкого давления внутри воздуховодов и корпусов приточных установок для обеззараживания внутренних поверхностей самой системы и воздуха, подаваемого в помещение. При этом система воздуховодов конструируется таким образом, что 99 % воздуха дезинфицируется при однократном прогоне.

Завершила онлайн семинар презентация «Дезинфекция помещений и другие применения УФ-С излучения» Пола Дженсена, руководителя отдела по профилактике и контролю над воздушно-капельными инфекциями и лабораторной биобезопасности Центра США по контролю и профилактике заболеваний в Атланте (штат Джорджия). В докладе были рассмотрены примеры применения систем УФ дезинфекции воздуха в медицинских учреждениях (в коридорах и палатах) без присутствия людей. Также, в качестве нового направления была рассмотрена технология УФ дезинфекции с применением фотокатализатора на основе оксида титана ( $\text{TiO}_2$ ). В процессе облучения оксида титана длинноволновым УФ-излучением при взаимодействии с воздухом образуются сильные окислители, которые ускоряют процесс дезинфекции. В завершении своего доклада автор цитировал данные по снижению уровня контаминации воздуха при использовании одного из российских рециркуляторов: при непрерывной четырехчасовой работе концентрация патогенных микроорганизмов может быть уменьшена в 3 раза.

На обучающем семинаре в формате онлайн-презентаций, который был проведен Американским Светотехническим Обществом (*IES*), были описаны определенные задачи и выявлены имеющиеся проблемы в области УФ-обеззараживания. Широко освещены разрабатываемые пути и методы решения задач, в соответствии с различными требованиями рассматриваемой тематики. Также были показаны новейшие разработки, результаты исследований и перспективные направления развития применения УФ-бактерицидного излучения. Представленные материалы могут послужить хорошим примером для возможности перенять опыт зарубежных стран в борьбе с распространением коронавирусной инфекции *COVID-19* у нас в России.

**А.С. Зиничева,  
М.Д. Качалина  
ВНИСИ им. С.И. Вавилова**

ООО «Лихославльский завод  
светотехнических изделий»

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



**БАКТЕРИЦИДНЫЕ ОБЛУЧАТЕЛИ  
ОТКРЫТОГО ТИПА – ЭТО:**

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



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



galad.ru



(48261) 3-59-04

**Бактерицидный облучатель открытого типа «Нуклон»**



Наши преимущества:

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

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



Россия, г. Москва,  
проспект Мира, 106



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



(495) 785-37-40



Оформить подписку, купить журнал или статью можно на сайте  
журнала «Светотехника» [www.l-e-journal.com](http://www.l-e-journal.com)  
(периодичность издания 1 раз в 2 месяца)

**«Светотехника». Полугодовая подписка на 2020 г.**

«Светотехника»	бумажная	1 995 руб.
«Светотехника» для физ. лиц	электронная	1 800 руб.
«Светотехника» для юр. лиц	электронная	6 000 руб.

**«Светотехника». Годовая подписка на 2020 г.**

«Светотехника»	бумажная	3 990 руб.
«Светотехника» для физ. лиц	электронная	3 600 руб.
«Светотехника» для юр. лиц	электронная	12 000 руб.

**«Light & Engineering». Полугодовая подписка на 2020 г.**

«Light & Engineering»	бумажная	80 долл. США*
«Light & Engineering» для физ. лиц	электронная	70 долл. США*
«Light & Engineering» для юр. лиц	электронная	140 долл. США*

**«Light & Engineering». Годовая подписка на 2020 г.**

«Light & Engineering»	бумажная	160 долл. США*
«Light & Engineering» для физ. лиц	электронная	140 долл. США*
«Light & Engineering» для юр. лиц	электронная	275 долл. США*

**Стоимость журнала**

«Светотехника»	бумажная	680 руб.
«Светотехника»	электронная	600 руб.
«Light & Engineering»	бумажная	40 долл. США*
«Light & Engineering»	электронная	35 долл. США*

**Стоимость статьи**

«Светотехника»	электронная	400 руб.
«Light & Engineering»	электронная	6 долл. США*

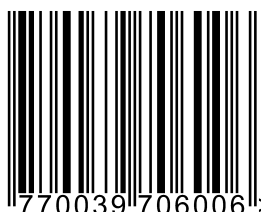
\*Примечание: по курсу ЦБ на дату оплаты

Купить журнал «Светотехника» для детей и их родителей можно  
на сайте журнала «Светотехника» [www.l-e-journal.com](http://www.l-e-journal.com)  
(периодичность издания 3 раза в год)

**Журнал «Светотехника» для детей и их родителей**

Бумажная	690 руб.
Электронная	300 руб.

ISSN 0039-7067



9 770039 706006 >

Адрес редакции: 129626, г. Москва, Проспект Мира, д. 106, офис 331  
Тел. (495) 682-58-46, 682-19-04, E-mail: bulgakova@l-e-journal.com