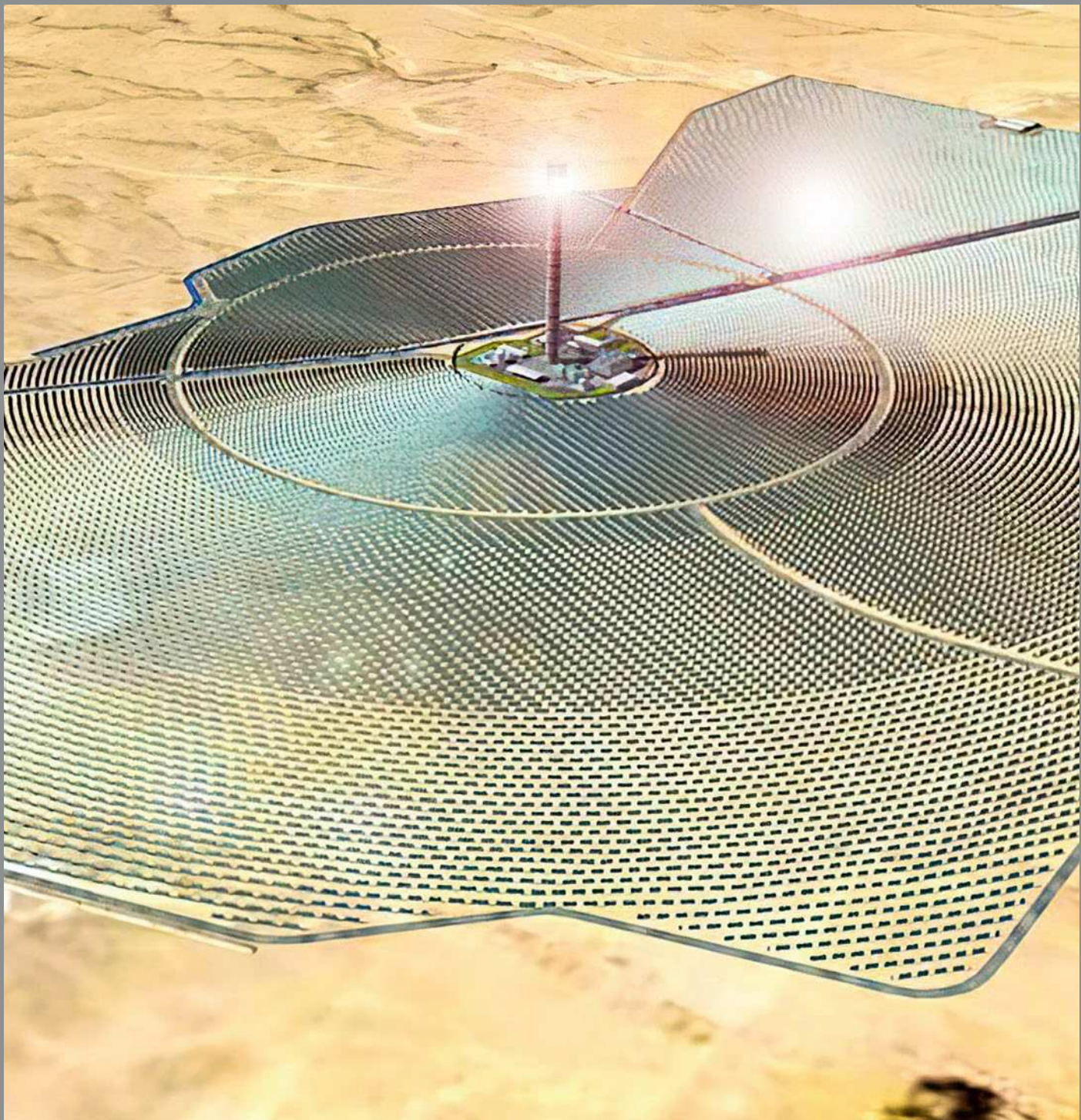


СВЕТО 2·2020 ТЕХНИКА



Лихославльский
завод «Светотехника»

Российское производство

с качеством мирового уровня

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



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

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

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



Уважаемые читатели!



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

В мудрой древнеиндийской притче группа слепых людей ощупывает слона, чтобы понять, что он собой представляет. Каждый из них трогает разные части слона, но только какую-то одну: бок, хобот, бивень, хвост или уши. После этого они описывают свои впечатления от прикосновений и начинают спор, и поскольку каждый описывает слона по-разному, ни одно из их описаний не является верным. Американский поэт Джон Годфри Сакс (*John Godfrey Saxe*, 2.06.1816–31.03.1887) облёк притчу в стихотворную форму «*The Blind Men and the Elephant*», где точно сформулировал мораль притчи:

*So, oft in theologic wars
The disputants, I ween,
Rail on in utter ignorance
Of what each other mean,
And prate about an Elephant
Not one of them has seen!*

Иными словами, только при синтезе всех направлений, исследующих тот или иной объект, при уважении ко всем точкам зрения возможно подлинное понимание объекта исследований.

Одним из важнейших и сложнейших объектов, с которыми всегда сталкивается человек, и пытается их постичь, является свет. Свет исследуют физики, инженеры, философы, художники, архитекторы, дизайнеры... Каждый своими методами, средствами и с разными целями. Представляется, что пришло время синтеза, «собираения камней», чтобы по-настоящему свет понять и оптимально использовать при решении разных задач.

5 февраля на заседании президиума Российской Академии естественных наук (РАЕН) по предложению её действительного члена Г.В. Бооса было принято решение тематического отделения «Световая среда». Оно открывает большие возможности по объединению усилий специалистов разных направлений по совместному изучению света. Именно возможности РАЕН, отличающейся от других научных организаций системным, многосторонним подходом, стали основой для создания отделения «Световая среда». При этом, что особенно важно, отделение открыто для присоединения других участников, среди которых прежде всего

хотелось бы видеть представителей Академии художеств.

Безусловно, трудно переоценить значение отделения прежде всего для светотехники. Как мы неоднократно указывали, светотехника как техника только освещения, создания некоторого среднего уровня освещения остаётся в прошлом. На первый план выходит непростое понятие «качество освещения», определяющее для человека комфортную световую среду, что приняло форму лозунга «Освещение, ориентированное на человека» (*Human centric lighting*). При всей важности инженерных критериев качества освещения сейчас на первый план выходит понимание светового дизайна как эстетического восприятия освещения, рационального сочетания визуальных и функциональных свойств световой среды. В ориентированном на восприятие световом дизайне человек с его потребностями рассматривается не как получатель визуального окружения, а как активный фактор в процессе восприятия. Качество светового дизайна основывается на психологии восприятия и содержит идеи театрального освещения. Равномерность освещения и количество света перестают быть главным критерием освещения. (Пolemически заостряя: всё чаще и больше «люксы не значат ничего».)

Сюда же примыкает активно развивающаяся область виртуальной реальности – создание техническими средствами мира, передаваемого человеку через его органы зрения, слуха, осязания, вкуса и других чувств. Виртуальная реальность имитирует как воздействие, так и реакции на воздействие. В разработке таких систем важнейшее место занимает светотехническая теория восприятия окружающего мира зрением человека, что на сегодня в колориметрии определяется *CAT / CAM (Chromatic Adaptation Transform / Color Appearance Models* – преобразование хроматической адаптации / модели цветового восприятия) моделями, которые пришли на смену принципиально нереализуемым равноконтрастным моделям.

Всё это делает невозможными создания простого числового критерия качества освещения. В этих сложнейших областях не существуют и вряд ли в ближайшее время появятся замкнутые системы уравнений, описывающие восприятие человеком световой среды. Здесь поэтому следует отдать предпочтение новому, активно развивающемуся направлению универсальной аппроксимации эмпирических данных – нейронным сетям, являющимся одной из основ искусственного интеллекта. Представляется, что именно на основе нейросетевых алгоритмов аппроксимации можно сформулировать инженерную теорию светового дизайна световой среды.

Всё сказанное заставляет революционно пересмотреть светотехническую науку, её основания, что, в свою очередь, ведёт к проблеме высшего образования в светотехнике. Проблема напоминает парадокс Мюнхгаузена «вытащить себя за волосы» – нужны новые учебники для воспитания новых специалистов, но кто их напишет? Наверное, стоит обратить внимание на англоязычную научную литературу, далеко ушедшую в указанном направлении. Конечно, официальный перевод предполагает значительные материальные расходы, и неясно, кто их сможет на себя взять. Поэтому оптимальным видится путь союза зрелых и молодых специалистов, способных совместно освоить мировые источники и на их основе создать свои. Важно, что этот процесс одновременно позволит вырастить и поколение новых специалистов, преподавателей в университетах.

При этом исключительно важным источником информации являются научно-технические журналы, и в том числе наш журнал «Светотехника / *Light & Engineering*», который стремится быть не только платформой представления новых научных результатов и дискуссий по ним, но и рупором новых направлений развития отрасли. Здесь хотелось бы отметить, что и тут в мире происходит удивительный прогресс. Компания *Clarivate analytics*, известная своей наукометрической системой «*Web of Science*», в настоящее время продвигает новый проект на сайте <https://publons.com/>, где сосредотачивается полная информация об исследователе (авторе). Важно, что, наряду со статистикой публикаций и определением разных параметров исследовательской активности, там вводится отслеживание рецензионной репутации исследователя.

Рецензия является не меньшей составляющей деятельности в науке, чем публикации: именно в дискуссии с рецензентом авторы окончательно и точно формулируют результаты своих исследований. Редакции журналов оперативно после публикации передают в указанную базу данных не только информацию о вышедшей статье, но и о рецензентах. Мы обязательно включимся в этот процесс.

Когда писалась эта колонка, в стране еще не был введён режим самоизоляции, и коронавирус казался экзотическим рассказом из жизни Китая. Но сегодня последствия распространения новой коронавирусной инфекции так или иначе затронули каждого в нашей стране. Поэтому в уже набранный номер была добавлена статья ведущего специалиста страны по УФ дезинфекции А.Л. Вассермана, которая и открывает этот номер. Хочется верить, что светотехника в этой борьбе может сказать и скажет свое весомое слово.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Генеральный директор
Н.С. Шерри; sherri@bl-g.ru
 Старший научный редактор
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

Выпускающий редактор
 Научный редактор

Т.В. Мешкова; mtv@l-e-journal.com

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

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

М.Д. Виноградова
 Секретарь редакции

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

А.М. Богданов
 Контент-менеджер

Е.С. Серый

ИНОСТРАННЫЕ КОРРЕСПОНДЕНТЫ

Аргентина

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

Франция

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

Индия

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

Словения

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

Турция

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

– Эрдал Шехирли (*Erdal 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 10.03.20. Подписано в печать 06.04.20
 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 2·2020

В НОМЕРЕ

МАРТ • АПРЕЛЬ

Колонка главного редактора.....	1	Бодроги П., Карелла Д., Кхан Т.К. Взвешивание значимости различных цветов на основе субъективных оценок цветовых предпочтений.....	82
Бизнес и инновации	4, 45, 102	Апресян Л.А., Власова Т.В. Асимметричное приближение эффективной среды для описания оптических характеристик случайно-неоднородных сред с дискретными включениями	90
Вассерман А.Л. Обеззараживание воздушной среды УФ бактерицидным излучением	6	Быстрянцева Н.В., Смилга И.С., Чиримисина Д.А., Лукинская В.В. Развитие образного мышления у студентов направления световой дизайн в рамках дисциплины «Принципы и методы светового моделирования»	94
Ван Боммель В. Знания, необходимые современным светотехникам	16	ХРОНИКА	
Воронов В.В., Щепетков Н.И. О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера (Часть II. Экспериментальные лабораторные исследования).....	33	Серый Е.С. Новое в техническом регулировании рынка	101
Леонидов А.В. Аналитическое представление взаимосвязи угловой высоты Солнца и местного времени при расчётах естественной облучённости и освещённости земной поверхности.....	37	ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИИ	
Коваленко О.Ю., Журавлева Ю.А. Анализ характеристик галогенных и светодиодных автомобильных ламп	42	Защита диссертации Т.В. Мешковой	103
Сенгиз М.С. Влияние угла наклона светильника и топологии осветительной установки на характеристики дорожного освещения	47	ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Кокаман Б. Энергоэффективность освещения исторических зданий на примере освещения караван-сарая Эль-Аман.....	56	Международная выставка <i>Interlight Russia Intelligent building Russia</i>	46
Кондратьева Н.П., Филатов Д.А., Терентьев П.В. Исследование режимов работы системы «светодиодный источник света с управляемым УУ – симисторный светорегулятор»	63	Светлые решения для умного города от МСК БЛ Групп (центральный разворот).....	40
Векленко Б.А. Энергия, информация и запредельные скорости в квантовой электродинамике	67	Умный свет для умного города. Светосервис-Волгоград	104
Кёсе Б., Казанасмаз Т. Применение призматических панелей для оптимизации размера окна, обращённого на юг, и глубины помещения для наиболее эффективного использования естественного света	72	Светильник со светодиодами производства Кадошкинского электротехнического завода	93
Николаева О.В. О вариантах основной формулы атмосферной коррекции	76	Солнечная тепловая электростанция «АШЛИМ» в Израиле.....	1 с. обл.
		Oroga Engineering: Качество, надёжность, оперативность	3 с. обл.
		Лихославльский завод «Светотехника»: российское производство с качеством мирового уровня	2 с. обл.
		Стоимость подписки	4 с. обл.

Выявлены причины положительного эффекта фотобиостимуляции растений

Исследователи из России приблизились к пониманию механизмов ускоренного роста растений при использовании светопреобразующих покрытий. Результаты работы учёных опубликованы в журнале «*Optics Express*» (2019. – Vol. 27, Is. 22).



Светопреобразующие текстильные покрытия для растений ранее разработали и испытали учёные из Института теоретической и экспериментальной биофизики РАН вместе с коллегами из Института фундаментальных проблем биологии РАН и Института синтетических полимерных материалов РАН. При прохождении через них солнечного света получается оптимальный спектральный спектр излучения, помогающий росту растений. Этот эффект достигается за счёт присутствия в составе агротекстиля фотолюминофорных частиц, которые преобразуют часть солнечного УФ излучения в свет красного цвета.

Укрытые таким материалом растения развиваются намного быстрее и набирают в среднем на 30–40 % биомассы больше культур, покрытых обычным спанбондом. Это получается за счёт более эффективного поглощения солнечного света. Помимо этого растения в эксперименте показали уменьшенную скорость транспирации листа, что может быть полезным при засушливом климате.

Исследователи провели анализ не только биологических и физических, но и биотехнологических данных. В итоге они пришли к выводу, что наиболее вероятный механизм «включения» процессов фотобиостимуляции растений может быть связан с фотоактивацией их микробиома. Однако, оставался открытым вопрос о том, как свет доходит до корней через почву и стимулирует бактерии не только в тонком слое на поверхности, но и в глубине.

«Более ранние работы показали, что стебли растения могут работать как световоды для дальнего красного света. При освещении растений такой свет достигает корней. Мы предположили, что проникновение света в корень приводит к тому, что микроорганизмы, живущие на нём или рядом с ним, каким-то образом могут воспринимать это излучение как сигнал и настраиваться на него», – поясняет один из авторов исследования, ведущий научный сотрудник ИТЭБ РАН Роберт Храмов.

Авторы новой работы показали значительную роль микробиома в фотобиостимуляции растений. Теперь исследователи планируют научиться управлять сообществами микроорганизмов с помощью света. Использование этого процесса откроет новые горизонты в самых разных областях науки и техники.

indicator.ru
20.02.2020

Новые искусственные крылья работают от солнечного света

Исследователи из КНР разработали искусственные крылья, которые приводят в движение солнечный свет. С помощью крошечных крыльев, которые способны работать быстрее крыльев бабочек, можно создавать летающих роботов или устройства для сбора солнечной энергии.

Приводы, которые преобразуют энергию солнечного света в механическую работу, привлекли внимание учёных своей работой без проводов и простотой в управлении. Однако для продолжения работы им обычно требуется источник света высокой интенсивности, который можно включать и выключать по необходимости, или дополнительное оборудование. Но не в случае с новыми искусственными крыльями: они могут преобра-

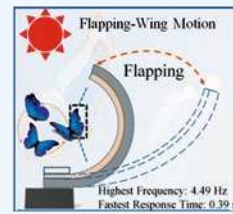


зовывать естественный солнечный свет в маховое движение (*flapping motion*) без дополнительных приспособлений.

Чтобы изготовить устройство, которое назвали «гибким биокрылом бабочки» (*flexible bio-butterfly-wing, FBBW*), исследователи покрыли тонкий лист из полимерного материала нанокристаллической металлической плёнкой. Когда команда зафиксировала один конец листовой полосы *FBBW* на опоре и на него падал искусственный солнечный свет, температура полосы увеличилась, и свободный конец свернулся из-за большой разницы в тепловом расширении между металлическим и полимерным слоями. Затем изогнутая часть *FBBW* перекрыла металлический слой ниже, что привело к падению температуры – и полоса раскрылась. Непрерывные циклы сворачивания и разворачивания производили маховое движение, частота которого даже могла превышать частоту взмахов крыльев бабочки.

Соответствующая научная статья опубликована в журнале «*ACS Appl. Materials & Interfaces*» (2020. – Vol. 12, No. 5).

eurekaalert.org
19.02.2020



Производство МСК «БЛ ГРУПП» для волейбольного центра в Новосибирске

В Новосибирске всё ближе к завершению строительство Регионального волейбольного центра, который станет самой крупной волейбольной площадкой на территории нашей страны от Урала. Комплекс из двух арен расположен недалеко от центра города. Большая спортивная арена в 4-этажном здании рассчитана на 5038 зрителей, а малая в 3-этажном – на 542 зрителя.



Создание центра осуществляется в рамках федеральной адресной инвестиционной программы и государственной программы «Развитие физической культуры и спорта в Новосибирской области на 2015–2021 годы». Уже известно, что большая арена станет домашней для ведущего волейбольного клуба Новосибирска – «Локомотива», который регулярно занимает высокие места в отечественных чемпионатах и европейских турнирах. Также Центр станет тренировочной базой не только для волейбола, но и для баскетбола и тенниса.

Сейчас уже выполнены работы по комплексному благоустройству прилегающей территории, включая набережную у находящегося рядом озера Надежда. Для наружного освещения использованы прожекторы «*GALAD*» серии «*ГСУ22 Юпитер*». Они размещены на гранёных фланцевых мачтах освещения «*OPORAENGINEERING*» с мобильной короной освещения на высоте 20 м. Проект реализован совместно с надёжным партнёром – компанией «Электромонтажсервис».

svetozone.ru
07.02.2020

«Светлый город» в Черногловке

В 2019 г. МСК «БЛ ГРУПП» стала участником множества проектов в рамках реализации программы «Светлый город» на территории Черногловки (Московская область). Модернизация наружного освещения охватила почти все улицы муниципального образования. Важную роль в выполнении строительно-монтажных работ сыграла компания «Светосервис-Подмосковье», входящая в состав Корпорации.

Влияние освещения на комфорт жителей и безопасность на улицах в Черноголовке находится во внимании городских властей и общественности. Преобразования настолько масштабны, что логичнее говорить не о конкретных объектах, а о комплексных решениях, в которых, в том числе, используются светильники «GALAD» и металлоконструкции «OPORA ENGINEERING».

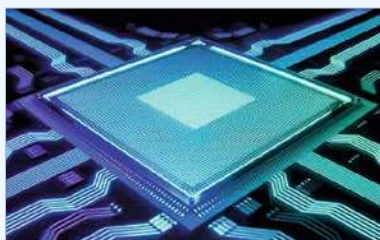


В ландшафтных зонах – садово-парковые светильники «Дон Кихот LED», установленные на декоративных опорах серии «Сокол». А задачи улично-дорожного освещения решают светильники «Виктория LED», размещённые на несилловых фланцевых гранёных опорах. Все осветительные приборы имеют коррелированную цветовую температуру 2700 К, давая тёпло-белый свет.

svetozone.ru
19.02.2020

Физики нашли способ реализации оптических вычислений

Исследователи из Гарвардской школы инженерных и прикладных наук Джона А. Полсона в сотрудничестве с исследователями из Университета Макмастера и Питтсбургского университета разработали новую платформу для полностью оптических вычислений, то есть вычислений, выполняемых исключительно с помощью пучков света.



Сегодня большая часть технологий оптических вычислений использует твёрдые материалы, такие как металлические провода, полупроводники и фотодиоды. Но идея оптических вычислений состоит именно в том, чтобы убрать все твёрдые электронные компоненты, присутствующие в стандартных схемах, и управлять светом с помощью излучения.

Способные на это платформы используют так называемые нелинейные материалы, которые изменяют свой показатель преломления в зависимости от интенсивности света. Когда свет проходит через эти материалы, их показатель преломления увеличивается, образуя свой собственный сделанный из света волновод.

В настоящее время большинство нелинейных материалов требуют мощных лазеров для создания такого эффекта или не позволяют создать волновод, «устойчивый» при прохождении излучения.

Теперь же создан принципиально новый материал, который использует обратимое набухание и сжатие гидрогеля при исключительно низкой мощности лазера для изменения показателя преломления. Синтезированный авторами материал представляет собой сополимер, состоящий из акриловой кислоты и акриламида. Кроме того, авторы добавили в него светочувствительные молекулы спиropирана.

Когда свет проходит через такой гель, область, на которую он попадает, немного сжимается, концентрируя полимер и изменяя показатель преломления. Когда свет выключен, гель возвращается в своё первоначальное состояние, а если через материал проходят несколько лучей, они влияют друг на друга, даже на больших расстояниях. Луч А может подавлять Луч Б, Луч Б может подавлять Луч А, оба они могут «отключать» друг друга или проходить через материал вместе, создавая оптический логический элемент.

nanonewsnet.ru
16.02.2020

Петербуржцев взволновали новые светильники на эскалаторах метро

Многих горожан взволновал вид новых эскалаторных светильников-торшеров на «Площади Ленина» и ряде других станций петербургского метро. До этого там использовались красивые медно-деревянные торшеры в форме старинного факела (рис. 1 а) типа ТЛ-2, с ртутными лампами, но они недостаточно освещали эскалаторные зоны. Специалисты службы электроснабжения метрополитена постоянно вели поиск альтернативных решений, чтобы достичь требуемой по СП 120.13330.2012 «Метрополитены» горизонтальной освещённости (100 лк) на гребёнках и ступенях эскалаторов, в целях травмоопасности, и одновременно повысить энергоэкономичность, экологичность и пожаробезопасность этих осветительных приборов. В результате сейчас эскалаторы освещаются простоватыми на вид приборами со светодиодами и корпусом из нержавеющей стали, типа ТС-1, по форме напоминающими очень длинный цоколь обычной лампы накаливания (рис. 1 б).

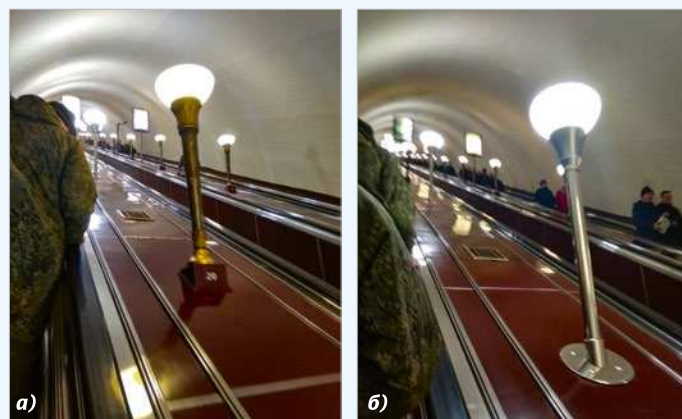


Рис. 1. Торшеры типов ТЛ-2 (а) и ТС-1 (б) на ст. метро «Площадь Ленина»

Да, так светлее, безопаснее и дешевле в эксплуатации, и, конечно, светильники-торшеры ТС-1 могут годиться для новых станций метро, но станции петербургского метро четырёх первых очереди строительства (включая неохранные КГИОП) представляют собой не железнодорожные полустанки, а произведения искусства, и потому такой подход (с подменой на новodelы) выглядит крайне странно.

С учётом сказанного было бы целесообразно:

- 1) скорректировать документ СП 120.13330.2012 в части требований к освещению с нормированием уровня освещённости на гребёнке и ступенях эскалаторов как рекомендуемое. (Это вызвано тем, что метрополитены страны, а особенно в Москве, Санкт-Петербурге, являются произведениями высокого архитектурно-эстетического и светотехнического мастерства. Поэтому скрупулёзная погоня за освещением без учёта всех звеньев оформления непонятна и вредна.);
- 2) прекратить замену существующих торшеров типа ТЛ-2 на первых четырёх очередях строительства петербургского метрополитена на новые – типа ТС-1;
- 3) уже демонтированные торшеры типа ТЛ-2, хранящиеся на складе, вернуть на прежние места;
- 4) чтобы СМИ помогли Петербургскому метрополитену добиться (как можно быстрее) изменения вышеуказанного требования СП 120.13330.2012.

Е.А. Лесман, инженер-энергетик, корреспондент журнала «Светотехника» в Санкт-Петербурге

Обеззараживание воздушной среды УФ бактерицидным излучением

А.Л. ВАССЕРМАН

E-mail: alexlvovzo@outlook.com

От редакции

Ниже мы публикуем заказанную редакцией статью кандидата технических наук, заслуженного машиностроителя РФ, инвалида Великой Отечественной войны, старейшины российского светотехнического сообщества А.Л. Вассермана.

Аннотация

В нашей стране с 2005 г. использование УФ бактерицидного излучения для обеззараживания воздушной среды помещений регламентируется руководством Р 3.5.1904–64 (на рекомендательном уровне). Это излучение опасно для человека – поражаются кожа и, особенно, глаза. Во избежание облучения людей при обеззараживании воздуха в помещении необходимо использовать закрытые облучатели (рециркуляторы) с бактерицидными лампами, а не открытые, излучение которых охватывает весь объём помещения, что требует удаления из него людей и соблюдения всех соответствующих мер безопасности.

К сожалению, на практике могут возникать – случайно или по незнанию правил эксплуатации открытых облучателей персоналом – нарушения правил безопасности, ведущие к тяжёлым последствиям. Для исключения таких нарушений необходимо повышать уровень знаний обслуживающего персонала, но специальной учебно-технической литературы нет. В настоящей статье делается попытка восполнить этот пробел.

Ключевые слова: УФ бактерицидное излучение, спектр действия, бактерицидная эффективность, производительность бактерицидного облучателя, поверхностный или объёмный излучатель, объёмная доза.

Предисловие

Первые исследования по использованию УФ излучения (УФИ) для уничтожения болезнетворных микроорганизмов имеют столетнюю давность. Изучением основ этого явления занимается фотобиология.

В решении задач по применению этой технологии в наши дни можно отметить три важных этапа:

- Разработка, освоение производства и выпуска УФ трубчатых ртутных ламп НД (РЛНД) мощностью 15 и 30 Вт с колбой из увиолевого стекла, блокирующего озонобразующее излучение. Этой работой руководил главный инженер Московского электролампового завода Р.А. Нилендер, выдающийся организатор ламповой промышленности СССР. Первые облучатели с этими лампами были открытыми, и ими можно было пользоваться только в отсутствие людей в помещении.

- Предложение врачом Я.Э. Нейштадтом облучателя закрытой конструкции, который мог применяться в присутствии людей – так называемого рециркулятора [1].

- Разработка, освоение производства и выпуск УФ трубчатых безозонных РЛНД нового типа мощностью до 1000 Вт и выше, с колбой из кварцевого стекла и с применением не жидкой ртути, а твёрдого раствора ртути в другом металле – амальгамы. Этой работой руководил генеральный директор НПО «ЛИТ» С.В. Костюченко [2, 3].

В настоящее время в России сформировалось научно-техническое направление по УФ технологии обеззараживания воздушной среды. При этом: организовано промышленное производство; появился широкий ассортимент бактерицидных ламп и облучателей; в 2012 г. издан фундаментальный труд высокого научного уровня [4], под редакцией Ф.В. Кармазинова, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцева, С.В. Храменкова.

Необходимо отметить большой вклад отечественных учёных в теорию и практику применения УФИ для

обеззараживания воздушной среды. К таковым в первую очередь следует отнести Г.М. Франка, Н.Ф. Галанина, Н.М. Данцига, Я.Э. Нейштадта, В.И. Вашкова, А.Л. Кошкина, Д.Н. Лазарева, В.Ф. Соколова, М.В. Соколова, М.Г. Шандалу, Т.И. Носкову, Г.С. Сарычева, Д.А. Шкловера, Р.А. Нилендера и др.

Отсутствие соответствующей технической литературы сдерживает практическое применение УФ обеззараживания воздушной среды помещений. При написании статьи автор использовал ранее опубликованные им материалы, часть из которых была написана в соавторстве с М.Г. Шандалой и В.Г. Юзбашевым [5, 6].

Автор надеется, что настоящая статья, рассчитанная на специалистов, улучшит взаимопонимание при решении практических задач работников и изготовителей бактерицидных ламп и облучателей, проектировщиков бактерицидных установок, санитарных врачей, осуществляющих эпидемиологический надзор и студентов-медиков.

Введение

Эпидемиологическое благополучие воздушной среды, как важнейшая составляющая защиты здоровья населения страны, является социально-экономической задачей нашего государства. Состояние и экологические условия среды обитания человека имеют существенное значение для его нормальной жизнедеятельности, особенно в закрытых помещениях ограниченного объёма, воздушная среда которых содержит болезнетворные микроорганизмы. Один из путей распространения инфекционных заболеваний – аэрогенный (или воздушно-капельный) относящийся к основному способу передачи распространения заболеваний, таких как грипп, туберкулёз, дифтерия и др. Это связано с тем, что воздушно-капельная бактериальная аэрозоль постоянно находится во взвешенном состоянии в воздушном объёме из-за движения воздуха, что увеличивает вероятность заражения людей и неупакованных продуктов питания.

УФ излучение и его бактерицидное действие

Для профилактики заболеваний и оздоровления среды обитания ис-

Функция относительной спектральной бактерицидной эффективности $S_{\text{БК}}(\lambda)$
 $[S_{\text{БК}}(\lambda)_{\text{max}}=1 \text{ при } \lambda = 265 \text{ нм}]$

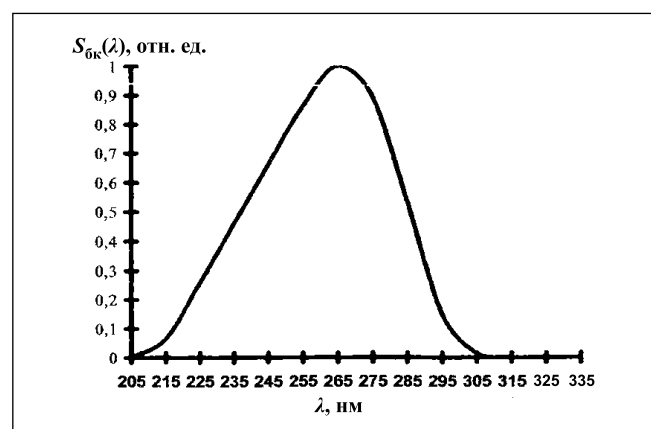
λ , нм	$S_{\text{БК}}(\lambda)$	λ , нм	$S_{\text{БК}}(\lambda)$
205	0,000	265	1
210	0,009	270	0,98
215	0,066	275	0,900
220	0,160	280	0,760
225	0,260	285	0,540
230	0,360	290	0,330
235	0,460	295	0,150
240	0,560	300	0,030
245	0,660	305	0,006
250	0,765	310	0,001
254	0,850	315	0,000

пользуются различные способы и средства, и в частности, применение УФИ, обладающего бактерицидным действием. Высокая эффективность этого способа обеспечивается его следующими особенностями: 1) широкий диапазон охвата патогенной микрофлоры в воздушной и водной средах, а также на поверхностях; 2) отсутствие необходимости использования дополнительных химических реагентов; 3) отсутствие запаха и образования токсичных вторичных продуктов; 4) относительно небольшое время обработки помещений для достижения требуемого уровня обеззараживания, в пределах 1 ч; 5) малые затраты на установку оборудования в помещениях и простота его эксплуатации.

Следует подчеркнуть, что использование УФИ как физического фактора воздействия на микроорганизмы может давать обеззараживание среды обитания в очень высокой степени – до 99,9 %. Кроме того, обработка воздуха помещений с помощью УФИ стоит завершающим звеном в перечне санитарно-гигиенических мероприятий, предусмотренных нормативными документами Федеральной службы по надзору в сфере защиты потребителей и благополучия человека.

Бактерицидное действие УФИ на микроорганизмы происходит в спектральном диапазоне 205–315 нм. Степень воздействия на микроорганизмы определяется функцией относительной спектральной бактерицидной эффективности $S_{\text{БК}}(\lambda)$. Её максимум приходится на длину волны 265 нм, соответствующую максимальной чувствительности микроорганизмов (их нуклеиновых кислот), как показано на рис. 1 и в табл. 1¹. Эту функцию также называют относительным бактерицидным спектром действия УФИ, т.е. микроорганизмы являются *селективными приёмниками излучения*, и применять к ним энергетические величины нецелесообразно. Из табл. 1 видно, что $S_{\text{БК}}(\lambda)$ в линии ртути 254 нм составляет 85 % от $S_{\text{БК}}(\lambda)$ в линии 265 нм. С учётом указанной селективности микроорганизмов, для

Рис. 1. Кривая относительной спектральной бактерицидной эффективности $S_{\text{БК}}(\lambda)$



измерения бактерицидного потока используют бактерицидные радиометры, спектральная чувствительность которых скорректирована под $S_{\text{БК}}(\lambda)$. Такие бактерицидные радиометры существуют – например, УФ радиометр «ТКА-ПКМ» (мод. 12 и 13), УФ спектрометрический радиометр «ТКА-ВД» и др. Эти радиометры измеряют бактерицидную облучённость ($\text{Вт}/\text{м}^2$) от источников УФИ со сплошным или линейчатым спектром излучения. При этом основной бактерицидной величиной является бактерицидный поток $\Phi_{\text{БК}}$. С учётом этого создана система бактерицидных величин и единиц измерения, используемая в УФ технологии обеззараживания воздуха (табл. 2). Рассматривая процесс уничтожения бактерий на поверхности при бактерицидной облучённости E_s ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и, соответственно, необходимой для этого дозы облучения H_s ($\text{Дж}/\text{м}^2$), можно за-

ключить, что расчётные оценки эффективной дозы объёмного облучения воздушного пространства H_v ($\text{Дж}/\text{м}^3$) не могут производиться по формулам, по которым рассчитываются H_s .

Установлено, что вид кривых $S_{\text{БК}}(\lambda)$ для разных видов патогенных микроорганизмов практически одинаков. **Более чувствительны к воздействию УФИ бактерии (в вегетативной форме) и вирусы. Менее чувствительны споры бактерий и простейшие. Наибольшей устойчивостью обладают грибы и плесени.**

Поглощение излучения микроорганизмом – это внутримолекулярный физический дискретный процесс взаимодействия между квантами излучения, молекулами и атомами по закону квантовой эквивалентности Эйнштейна-Штарка. Как следует из этого закона, каждый поглощённый квант способен активировать лишь одну молекулу

¹ Важно отметить, что бактерицидное УФИ опасно для человека, чревато ожогами на теле и поражением глаз. Поэтому в помещениях в присутствии людей допустимо применять только закрытые облучатели с бактерицидными лампами.

Бактерицидные величины и единицы измерения УФ излучения в спектральном диапазоне 205–315 нм

Величина	Обозначение и формула	Определение	Единица измерения
Энергия излучения	$W_{\text{бк}}$	Энергия, переносимая излучением	Дж
Поток излучения (мощность излучения)	$\Phi_{\text{бк}} = W_{\text{бк}}/t$	Отношение энергии излучения ко времени действия t	Вт
Спектральная плотность потока излучения	$\Phi_{\text{бк}}(\lambda)$	Отношение потока излучения в бесконечно узком интервале длин волн к этому интервалу	Вт/нм
Сила излучения	$I_{\text{бк}}$	Пространственная плотность потока излучения	Вт/см ²
Облучённость	$E_{\text{бк}} = \Phi_{\text{бк}}/S$	Отношение потока излучения к площади облучаемой поверхности	Вт/м ²
Поверхностная доза	$H_s = W_{\text{бк}}/S$	Отношение энергии излучения к площади облучаемой поверхности	Дж/м ²
Объёмная доза	$H_v = W_{\text{бк}}/V$	Отношение энергии излучения к объёму облучаемой части пространства	Дж/м ³

Таблица 3

Зависимость бактерицидных эффективности и объёмной дозы от класса чистоты помещения

Класс чистоты помещения	$J_{\text{бк}}, \%$	$H_v, \text{Дж/м}^3$
Особо чистые (А)	99,9	385
Чистые (Б)	99	257
Условно чистые (В)	95	167
Грязные (Г)	90	129

Таблица 4

Эффекты, вызываемые воздействием озона

Концентрация озона, мг/м ³	Время воздействия, ч	Эффект
0,03	8	Повреждение растений
0,2	1	Раздражительность, головная боль
0,3	8	Спазмы дыхательных путей, грудной кашель
2	2	Тошнота, кровотечение из носа, отравление

или атом, т.е. происходит одноударный процесс поглощения. При поглощении кванта излучения в случае совпадения частоты колебаний кванта с частотой колебания электронов в макромолекуле происходит резонансное поглощение с максимальной передачей энергии кванта. Это приводит к повреждению важных структур микроорганизма. В конечном счёте микроорганизмы в воздушном объёме становятся инактивированными и теряют способность к размножению. Максимум действия излучения приходится на $\lambda = 265$ нм, что соответству-

ет максимальной спектральной чувствительности нуклеиновых кислот микроорганизмов. При этом кванты бактерицидного УФИ недостаточно энергичны для ионизации молекул кислорода, т.е. при поглощении нейтральной молекулой кислорода одного кванта молекула не распадается на отрицательный электрон и положительный ион, и потому озон в воздухе не образуется. В связи с этим бактерицидное УФИ относят к типу неионизирующих излучений.

Далее, в случае бактерицидного облучения воздушной среды при со-

хранении постоянства уровня дозы H_v и малом времени облучения требуется увеличение объёмной плотности бактерицидного потока излучения (Вт/м³) вследствие необходимости увеличения числа квантов, повышающего вероятность удачного столкновения кванта бактерицидного излучения с атомами макромолекул. А снижение объёмной плотности излучения уменьшает вероятность удачного столкновения; для компенсации этого надо увеличивать время облучения, при сохранении H_v , т.е. соблюдается квантовая эквивалентность. Экспериментально установлено, что процесс гибели микроорганизмов в воздушной среде при их бактерицидном облучении характеризуется экспоненциальной зависимостью между числом выживших микроорганизмов N_v при их начальном числе N_0 и H_v :

$$N_v = N_0 \cdot \exp(-\sigma_v H_v), \quad (1)$$

где σ_v – константа, характеризующая значение fotocувствительности данного вида микроорганизма при объёмном облучении. Для контроля бактерицидной эффективности $J_{\text{бк}}$ в нашей стране принят микроорганизм *Staphylococcus Aureus*, значение σ_v которого равно 0,0179 м³/Дж (прил. 1).

$J_{\text{бк}}$ – это показатель уровня снижения микробной обсеменённости воздушной среды в результате воздействия УФИ, выражаемый как отношение числа погибших микроорганизмов $N_{\text{п}}$ к N_0 (в относительных единицах или

в процентах). Из равенства $N_{\text{п}} = N_0 - N_{\text{В}}$ и выражения (1) следует, что

$$J_{\text{БК}} = (N_{\text{п}} / N_0) \cdot 100 = \\ = [(1 - \exp(-\sigma_{\text{в}} H_{\text{в}})] \cdot 100, \%$$

$$H_{\text{в}} = -\ln(1 - J_{\text{БК}} \cdot 10^{-2}) / \sigma_{\text{в}}, \text{ Дж} / \text{м}^3. (2)$$

В табл. 3 приведены рекомендуемые режимы облучения воздушной среды в зависимости от класса чистоты помещения.

Повышение относительной влажности и запылённости в помещении снижают $J_{\text{БК}}$. При увеличении относительной влажности с 45–65 до 80–90 % $J_{\text{БК}}$ снижается на 30–40 %, т.к. на частички пыли оседают капли воды, оказывающие экранирующее действие на излучение. Установлено что чувствительность микроорганизмов к УФИ во влажном воздухе в 20–50 раз меньше, чем в сухом.

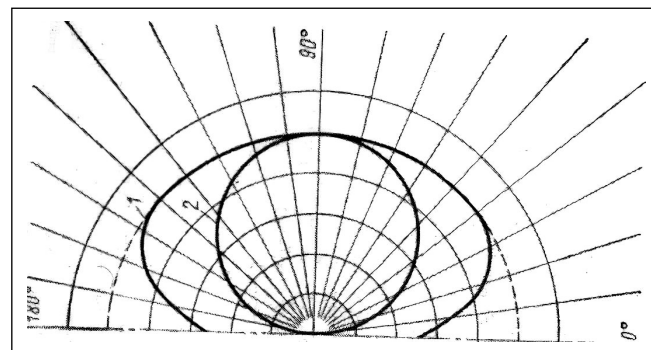
Следует заметить, если УФИ содержит спектральные линии на λ короче 200 нм, то в воздушной среде помещения образуется озон², чрезвычайно ядовитый газ (ядовитей угарного газа). По токсичным свойствам он относится к первому классу опасности. В табл. 4 приведены эффекты, вызываемые наличием озона в воздушной среде помещения.

Источники бактерицидного УФ излучения

Основными источниками бактерицидного УФИ являются ртутные трубчатые лампы, из которых наиболее эффективны ртутные лампы НД. Это связано с тем, что более 60 % от энергии излучения этих ламп приходится на резонансную линию 254 нм, лежащую в диапазоне максимального бактерицидного действия, что объясняет их высокую бактерицидную отдачу $\eta_{\text{БК}}$ — определяемую как $\eta_{\text{БК}} = (\Phi_{\text{БК}} / P_{\text{л}}) \cdot 100, \%$, где $P_{\text{л}}$ — мощность лампы — в 30–40 %.

По основным конструктивным особенностям ртутные лампы НД разделяются на две группы — лампы с колбой из увиолевого стекла и с колбой из легированного окисью титана кварцевого стекла. Эти колбы исключают вы-

Рис. 2. Индикатрисы излучения разрядных трубчатых ламп в продольной плоскости. Поверхностный излучатель — люминесцентная лампа, объёмный излучатель — ртутная трубчатая лампа НД



ход ознообразующей линии 185 нм в спектре излучения. По этому признаку они получили название безозонных. В увиолевых лампах ртуть находится в жидком состоянии, а в кварцевых она заменена на амальгаму. При работе лампы амальгама нагревается, и в разряд выделяются пары ртути. По этому признаку такие лампы получили название амальгамных. Давление паров ртути над твёрдой амальгамой на порядки ниже, чем над жидкой ртутью, поэтому при разрушении колб таких ламп в воздух могут попадать пары ртути в количествах существенно ниже ПДК, и не возникает необходимости в демеркуризации помещения. Амальгамные лампы механически прочнее увиолевых. Последние обладают малой единичной мощностью, в пределах 8–75 Вт, а амальгамные — большой, 100–1000 Вт. У большинства увиолевых ламп электрические характеристики при одинаковой мощности идентичны тому же у обычных ЛЛ, поэтому они эксплуатируются с аналогичными схемами включения (в настоящее время в большинстве случаев используются электронные ПРА с коэффициентом мощности ($\cos \varphi$), равным единице). Полезный срок службы при спаде $\Phi_{\text{БК}}$ на 20 % от начального составляет для амальгамных ламп 12000 ч., а для увиолевых — 8000 ч. Существует ряд основных параметров, характеризующих технические и эксплуатационные особенности разных источников излучения. К таковым относят: относительные или абсолютные спектры излучения; интегральные значения бактерицидных потоков или силы излучения в определённом спектральном диапазоне; индикатрисы из-

лучения (кривые распределения силы излучения) в продольной и поперечной плоскостях; мощность, ток и напряжение на лампе; напряжение сети; полезный срок службы; экологическую безопасность — наличие в спектре излучения ознообразующих линий и возможность выделения токсичных веществ в окружающую среду при разрушении колбы лампы.

По виду индикатрисы излучения трубчатые разрядные лампы разделяются на два типа — с покрытием и без покрытия колбы. По этому признаку первые относятся к поверхностным излучателям, а вторые — к объёмным. У поверхностных излучателей индикатриса излучения в продольной плоскости — окружность, а у объёмных — эллипс (рис. 2). (Индикатрисы некоторых других разрядных ламп приведены в прил. 2.)

Причина различия форм индикатрис излучения между двумя указанными типами ламп в том, что у первого типа разряд не прозрачен для собственного излучения, а у второго прозрачен (из-за слабого поглощения излучения в разряде). Плазма почти совершенно прозрачна для видимого и УФ излучения, а уровень её излучения вонне пропорционален объёму, занимаемому плазмой. Это не зависит от типа разряда в парах ртути НД и ВД или в других газах [7, 8].

В связи с этим мною предложен и опубликован [9] метод измерения потока излучения бактерицидных ртутных трубчатых ламп НД — альтернативный, в частности, гониофотометрическому методу [10] (реально малоприспособному для рядовых измерительных лабораторий). Метод базируется на трёх рабочих гипотезах (подтверждённых экспериментально): 1) форма индикатрисы излучения трубчатых ртутных ламп без покрытия колбы в продольной плоскости достаточно точно описывается эллипсом;

² Озон является аллотропическим видоизменения кислорода и состоит из трёх его атомов. При низких температурах распад озона происходит медленно, с повышением температуры он ускоряется, при комнатных температурах распад занимает несколько минут, а при 100 °С — менее секунды. Скорость распада озона зависит также от относительной влажности воздуха, при 50 %-ной озон распадается в два раза медленнее, чем при 80 %-ной.

Таблица 5

Коэффициенты отражения на длине волны 254 нм некоторых материала

Материал отражателя	ρ
Алюминий необработанный	0,4–0,6
Алюминий (обработанная поверхность)	0,6–0,9
Дюраль	0,16
Нержавеющая сталь	0,25
Хромированные покрытия	0,39
Чёрная эмаль	0,05

2) фотометрическое тело таких ламп представляет собой эллипсоидальный тор; 3) плазма электрического разряда бактерицидных ламп НД прозрачна для видимого и УФ излучений.

УФ бактерицидные облучатели

УФ бактерицидный облучатель представляет собой автономное электротехническое устройство, содержащее бактерицидные лампы (увиолетовые или амальгамные), отражатель, ПРА, конденсаторы (по подавлению радиопомех), электронный счётчик, фиксирующий наработку ламп, а также вспомогательные элементы крепления ламп и приспособления для установки прибора. Основная задача бактерицидного облучателя – производство обеззараживания воздушной среды помещения от патогенных микроорганизмов.

По конструктивному оформлению облучатели разделяются на следующие типы – закрытые (рециркуляторы) и открытые – напольные, настенные и потолочные, для размещения в помещениях или в модулях систем приточно-вытяжной вентиляции. У открытых облучателей прямой бактерицидный поток ламп, с участием отражателя или без него, «охватывает» широкую зону в пространстве. У закрытых облучателей бактерицидный поток ламп, расположенных в небольшой камере, выхода наружу не имеет, и обеззараживание воздуха осуществляется в процессе его непрерывной прокачки с помощью вентилятора через камеру и выхода в объём помещения. К типу закрытых облучателей можно отнести также модули с бактерицидными лампами, расположенными в системах приточно-вытяжной вентиляции.

По назначению – обеззараживание воздушной среды помещения при отсутствии или присутствии людей.

По эффективности использования бактерицидного потока ламп, учитываемой суммарным коэффициентом $Z = K_{\phi} K_o$, где K_{ϕ} – коэффициент использования бактерицидного потока ламп, учитывающий их взаимное экранирование, значения которого для открытого, потолочного открытого и закрытого облучателей, соответственно, примерно равны 0,8, 0,6 и 0,4; K_o – коэффициент многократных отражений бактерицидного потока от внутренней поверхности отражателя с коэффициентом отражения ρ на $\lambda = 254$ нм, определяемый для открытого, потолочного открытого и закрытого облучателей как $K_o = 1$, $K_o =$

$1/(1-0,3\rho)$ и $K_o = 1/(1-0,6\rho)$ соответственно. В табл. 5 приведены значения этого ρ некоторых материалов.

Основной параметр облучателя – его бактерицидная производительность $Pr_{\text{БК}}$ ($\text{м}^3/\text{ч}$), характеризующая снижение микробной обсеменённости воздушной среды до заданных уровней $J_{\text{БК}}$ или H_v для данного вида микроорганизма.

Уравнения математической модели $Pr_{\text{БК}}$ таковы:

$$Pr_{\text{БК}} = N_{\text{л}} \Phi_{\text{БК}} K_{\phi} K_o \sigma_v \times \\ \times 3600 / [-\ln(1 - J_{\text{БК}} \cdot 10^{-2})],$$

или

$$Pr_{\text{БК}} = N_{\text{л}} \Phi_{\text{БК}} K_{\phi} K_o \cdot 3600 / H_v, \text{ м}^3 / \text{ч},$$

где $N_{\text{л}}$ – число ламп в облучателе; $\Phi_{\text{БК}}$ – бактерицидный поток лампы, Вт.

Следует заметить, что эти формулы справедливы при работе облучателя в течение времени t , за которое дости-

гается заданный уровень $J_{\text{БК}}$ в помещении объёмом $V_{\text{п}} = Pr_{\text{БК}} \cdot t, \text{ м}^3$.

Конструктивные внутренние элементы закрытого облучателя оказывают определённое сопротивление воздушному потоку. Степень гидравлического сопротивления учитывается суммарным коэффициентом местного сопротивления μ , оценочное значение которого равно 1,1–1,3. При этом производительность вентилятора $Pr_{\text{в}} = \mu \times Pr_{\text{БК}}$. Фотографии разных типов облучателей приведены в прил. 3.

УФ бактерицидные установки

УФ бактерицидная установка – стационарная группа закрытых УФ бактерицидных облучателей в помещении или модулей с бактерицидными лампами в системе воздуховода приточно-вытяжной вентиляции, которые обеспечивают в помещении заданный уровень $J_{\text{БК}}$. Существуют различные методы использования облучателей в бактерицидных установках:

- *Непрерывное обеззараживание воздуха в помещении в присутствии людей*

Этот режим достигается с использованием закрытых стационарных облучателей (рециркуляторов) или бактерицидных модулей в системах приточно-вытяжной вентиляции. Такой режим облучения рекомендуется применять для обеспечения эффективности обеззараживания помещений с большим количеством людей, особенно, если их нельзя перемещать, например, в палатах с инфекционными больными, в школах, дошкольных учреждениях и т.п.

Число облучателей в помещении определяется проектом, согласно техническому заданию. В ТЗ указываются: $J_{\text{БК}}$, $V_{\text{п}}$, кратность воздухообмена $K_{\text{р}}$ (ч^{-1}), коэффициент надёжности $K_{\text{н}} = 1,2$. Затем определяется требуемая бактерицидная производительность рециркулятора в помещении: $Pr_{\text{БК}} = V_{\text{п}} K_{\text{р}} K_{\text{н}}$, с $J_{\text{БК}} = 99,9\%$, $H_v = 385$ Дж/ м^3 и время облучения $t = 1$ ч.

Для помещений неинфекционного профиля время работы рециркуляторов должно быть не менее 12 ч. Для помещений с инфекционными больными время работы рециркуляторов должно быть круглосуточным. Для кабинетов инфекционного профиля необходимо включать рециркулятор до начала приёма пациентов на время 15–20 мин. При этом $J_{\text{БК}}$ должна быть

не менее 99 %. Для этого выбирается режим работы рециркулятора при различных значениях Kp и $t < 60$ мин, и оцениваются дозы по формуле (2).

• *Повторно-кратковременный режим облучения*

При этом режиме облучение помещения осуществляется в течение рабочего дня с чередованием сеансов облучения по $t = 15$ мин = 0,25 ч и пауз между сеансами по 3 ч с помощью потолочных стационарных открытых облучателей. Во время 15-минутного сеанса облучения из помещения удаляются люди. За это время необходимо обеспечивать заданный уровень $J_{\text{БК}}$.

Число облучателей в помещении определяется по данным ТЗ, где указываются: $V_{\text{п}}$, $J_{\text{БК}}$, Kp и $Kн=1,2$. Затем, определяется требуемая бактерицидная производительность облучателя в помещении $Pr_{\text{БК}}$ по формуле $Pr_{\text{БК}} = V_{\text{п}} \cdot Kн \cdot Kp$. Из существующей номенклатуры выбирается облучатель с такой же $Pr_{\text{БК}}$ или с меньшей, $Pr_{\text{н}}$, но, однако, с заданным значением $J_{\text{БК}}$. Затем определяется число облучателей в помещении $N_{\text{ч}} = Pr_{\text{БК}} / Pr_{\text{н}}$. При этом число облучателей, производительность и доза пропорциональны Kp . Следует заметить, что с увеличением Kp увеличиваются затраты на бактерицидную установку.

Долгое время для обеззараживания воздушной среды помещений использовались открытые облучатели. Применение их в большинстве случаев усложняет эту процедуру из-за необходимости периодически удалять людей из помещения. Необходимо заметить, что наличие людей в помещении в период между сеансами облучения приводит к вторичной контаминации аэрогенными микроорганизмами воздуха в помещении за счёт людей-носителей инфекций. Это повышает уровень внутрибольничных инфекций. Кроме того, в период между сеансами облучения возникает так называемая фотореактивация погибших микроорганизмов, под воздействием видимого света, т.е. восстановление их жизнедеятельности. Из этого можно сделать вывод, что такой режим облучения является неэффективным для обеззараживания помещений с большим количеством людей, особенно если их нельзя перемещать. И этот режим применять не рекомендуется.

В отдельных случаях повторно-кратковременного режима облучения, для небольших помещений, можно

Таблица 6.1

Исходные данные	Значения
Вид микроорганизма (СПМ)	S. aureus
Бактерицидная эффективность $J_{\text{БК}}$	99,9 %
Константа fotocувствительности микроорганизма σ_v	0,0179 м ³ /Дж
Тип бактерицидной лампы	Амальгамная
Бактерицидный поток лампы $\Phi_{\text{БК}}$	50 Вт
Число ламп $N_{\text{л}}$	1
Коэффициент использования бактерицидного потока ламп Кф	0,4
Материал отражателя	Полированный алюминий
Коэффициент отражения отражателя ρ	0,7
Коэффициент многократных отражений $K_0 = 1/(1-0,6\rho)$	1,72
Коэффициент местного сопротивления воздушному потоку от вентилятора μ	1,2

Таблица 6.2

Исходные данные	Значения
Вид микроорганизма (СПМ)	S. aureus
Бактерицидная эффективность $J_{\text{БК}}$	99,9 %
Константа fotocувствительности микроорганизма σ_v	0,0179 м ³ /Дж
Тип бактерицидной лампы	Амальгамная
Бактерицидный поток лампы $\Phi_{\text{БК}}$	50 Вт
Число ламп $N_{\text{л}}$	1
Коэффициент использования бактерицидного потока ламп Кф	0,6
Материал отражателя	Полированный алюминий
Коэффициент отражения отражателя ρ	0,7
Коэффициент многократных отражений $K_0 = 1/(1-0,3\rho)$	1,265
Константа fotocувствительности микроорганизма σ_v	0,0179 м ³ /Дж
Тип бактерицидной лампы	Амальгамная
Бактерицидный поток лампы $\Phi_{\text{БК}}$	50 Вт
Число ламп $N_{\text{л}}$	1
Коэффициент использования бактерицидного потока ламп Кф	0,6

применять одиночные передвижные открытые облучатели. Требуемая бактерицидная производительность такого облучателя $Pr_{\text{БК}} = V_{\text{п}} \cdot Kн / t$, м³/ч.

• *Совмещённый режим облучения воздушной среды помещений*

Этот режим предусматривает применение как открытых, так и закрытых облучателей в операционных, кабинетах переливания крови и перевязочных. Облучатели включаются одновременно перед подготовкой по-

Таблица 6.3

Исходные данные	Значения
Вид микроорганизма (СПМ)	S. aureus
Бактерицидная эффективность $J_{\text{БК}}$	99,9 %
Константа фоточувствительности микроорганизма σ_v	0,0179 м ³ /Дж
Время облучения в сеансе t	0,25 ч
Тип бактерицидной лампы	амальгамная
Бактерицидный поток лампы $\Phi_{\text{БК}}$	50 Вт
Число ламп $N_{\text{л}}$	1
Коэффициент использования бактерицидного потока ламп Кф	0,8
Коэффициент многократных отражений Ко	1

Таблица 6.4

Исходные данные	Значения
Объём помещения $V_{\text{п}}$	400 м ³
Бактерицидная эффективность $J_{\text{БК}}$	95 %
Кратность воздухообмена Кр	2 ч ⁻¹
Коэффициент надёжности Кн	1,2

Таблица 6.5

Исходные данные	Значения
Объём помещения $V_{\text{п}}$	400 м ³
Бактерицидная эффективность $J_{\text{БК}}$	99,9 %
Время облучения в сеансе t	0,25 ч
Коэффициент надёжности Кн	1,2

Таблица 6.6

Исходные данные	Значения
Объём помещения $V_{\text{п}}$	400 м ³
Бактерицидная эффективность $J_{\text{БК}}$	99,9 %
Кратность воздухообмена Кр	2 ч ⁻¹
Коэффициент надёжности Кн	1,2
Коэффициент местного сопротивления воздушному потоку от вентилятора μ	1,2

мещения на 15 мин. Затем открытые облучатели выключаются.

Типовые примеры расчётов

Пример первый. Необходимо рассчитать $\text{Пр}_{\text{БК}}$ закрытого облучателя и производительность вентилятора Пр.в.

В таблицу (табл. 6.1) заносятся исходные данные для расчёта. По ним $\text{Пр}_{\text{БК}}$ и Пр.в. определяются как $\text{Пр}_{\text{БК}} = N_{\text{л}} \cdot \Phi_{\text{БК}} \cdot \text{Кф} \cdot \text{Ко} \cdot \sigma_v \cdot 3600 / [-\ln(1 - J_{\text{БК}} \cdot 10^{-2})]$

$\times 10^{-2})] = 1 \cdot 50 \cdot 0,4 \cdot 1,72 \cdot 0,0179 \cdot 3600 / [-\ln(1 - 99,9 \cdot 10^{-2})] = 321 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\text{Пр.в.} = \text{Пр}_{\text{БК}} \cdot \mu = 321 \cdot 1,2 = 385 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Пример второй. Необходимо рассчитать $\text{Пр}_{\text{БК}}$ потолочного открытого облучателя.

В таблицу (табл. 6.2) заносятся исходные данные для расчёта. По ним $\text{Пр}_{\text{БК}}$ определяется как $\text{Пр}_{\text{БК}} = N_{\text{л}} \cdot \Phi_{\text{БК}} \cdot \text{Кф} \cdot \text{Ко} \cdot \sigma_v \cdot 3600 / [-\ln(1 - J_{\text{БК}} \cdot 10^{-2})] = 1 \cdot 50 \cdot 0,6 \cdot 1,265 \cdot 0,0179 \cdot 3600 / [-\ln(1 - 99,9 \cdot 10^{-2})] = 351 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Пример третий. Требуется определить $\text{Пр}_{\text{БК}}$ передвижного открытого облучателя при $t = 0,25 \text{ ч}$.

В таблицу (табл. 6.3) заносятся исходные данные для расчёта. По ним $\text{Пр}_{\text{БК}}$ вычисляется по предыдущей формуле: $1 \cdot 50 \cdot 0,8 \cdot 0,0179 \cdot 3600 / [-\ln(1 - 99,9 \cdot 10^{-2})] = 373 \text{ м}^3/\text{ч}$. Окончательное значение $\text{Пр}_{\text{БК}}$ при длительности облучения $t = 0,25 \text{ ч}$ равно $373 \cdot 0,25 = 93,25 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Пример четвёртый. Необходимо обеспечить обеззараживание воздушной среды помещения закрытыми облучателями. По исходным данным из ТЗ, приведённым в таблице (табл. 6.4), определяется требуемая бактерицидная производительность облучателя $\text{Пр}_{\text{БК}}$ с $J_{\text{БК}} = 95 \%$: $\text{Пр}_{\text{БК}} = V_{\text{п}} \cdot \text{Кр} \cdot \text{Кн} = 400 \cdot 2 \cdot 1,2 = 960 \text{ м}^3/\text{ч}$. Такого облучателя в продаже нет, а имеется облучатель марки «ДЕЗАР» с $\text{Пр.в.} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $J_{\text{БК}} = 99,9 \%$. Определяется новый режим работы выбранного облучателя при $J_{\text{БК}} = 95 \%$ по формуле $\text{Пр.н} = \text{Пр.в.} \cdot [-\ln(1 - 0,999)] / [-\ln(1 - 0,95)] = 100 \cdot 6,9 / 3 = 230 \text{ м}^3/\text{ч}$. Следовательно, число облучателей в помещении $N_{\text{ч}} = \text{Пр}_{\text{БК}} / \text{Пр.н} = 960 / 230 \approx 4$, а их расположение в помещении определяется по проектной документации.

Пример пятый. Требуется обеспечить обеззараживание воздушной среды помещения открытыми потолочными облучателями. По исходным данным из ТЗ, приведённым в таблице (табл. 6.5), определяется требуемая $\text{Пр}_{\text{БК}}$ с $J_{\text{БК}} = 99,9 \%$ при длительности облучения $t = 0,25 \text{ ч}$: $\text{Пр}_{\text{БК}} = V_{\text{п}} \cdot \text{Кн} / t = 400 \cdot 1,2 / 0,25 = 1920 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $J_{\text{БК}} = 99,9 \%$. Такого облучателя в продаже нет, а имеется другой с $\text{Пр.в.} = 1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $J_{\text{БК}} = 99,9 \%$. Определяется новый режим работы выбранного облучателя при $t = 0,25 \text{ ч}$: $\text{Пр.н} = \text{Пр.в.} \cdot t = 1500 \cdot 0,25 = 375 \text{ м}^3/\text{ч}$. Следовательно, $N_{\text{ч}} = \text{Пр}_{\text{БК}} / \text{Пр.н} = 1920 / 375 \approx 5$, а расположение облучателей в помещении определяется по проектной документации.

Пример шестой. Следует определить бактерицидную производительность модуля Пр.м в системе приточно-вытяжной вентиляции в помещении. Исходные данные приведены в таблице (табл. 6.6). По ним определяется производительность вентилятора: $\text{Пр.в.} = V_{\text{п}} \cdot \text{Кр} \cdot \text{Кн} = 400 \cdot 2 \cdot 1,2 = 960 \text{ м}^3/\text{ч}$, и затем – требуемое значение Пр.м : по формуле $\text{Пр.м} = \text{Пр.в.} / \mu = 960 / 1,2 = 800 \text{ м}^3/\text{ч}$, с бактерицидной эффективностью 99,9 %.

Таблица 6.7

t , мин	K_p , ч ⁻¹	H_v , Дж/м ³	$J_{\text{бк}}$, %	$\text{Пр}_{\text{бк}}$, м ³ /ч
60	1	385	99,9	54
15	1	96,25	81,73	54
20	1	128,3	89,4	54
30	1	192,5	96,8	54
20	2	256,6	99	108
60	2	385	99,9	108

Пример седьмой. Требуется определить $\text{Пр}_{\text{бк}}$ рециркулятора в кабине инфекционного профиля за время работы 15–20 мин, до начала приёма пациентов. $J_{\text{бк}}$ должна быть не менее 99 %. Исходные данные: $V_{\text{п}} = 45 \text{ м}^3$, $K_p = 1 \text{ ч}^{-1}$, $K_n = 1,2$. Выбирается, из имеющихся в продаже, рециркулятор с $\text{Пр}_{\text{бк}} = V_{\text{п}} \cdot K_p \cdot K_n \cdot t = 45 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1 = 54 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $J_{\text{бк}} = 9,99 \%$, за время работы $t = 1 \text{ ч}$. Затем определяется новый режим работы рециркулятора вычисляется, при разных значениях K_p и t (≤ 60 мин), по формулам $J_{\text{бк}} = [1 - \exp(-\sigma_v \cdot H_v)] \cdot 100, \%$, где $H_v = 385 \cdot K_p \cdot t / 60$, Дж/м³, и результаты вычислений заносятся в таблицу (табл. 6.7).

Правила эксплуатации и техника безопасности

1. Реализация бактерицидных установок должна проводиться по согласованному ТЗ и проекту, утверждённым службами Роспотребнадзора.

2. Необходимое число облучателей для каждого помещения определяют расчётом согласно действующим нормам (требование СанПин 2.1.3.2630–10, п. 11.12).

3. УФ-И в бактерицидном диапазоне длин волн представляет опасность для человека, особенно для зрения.

4. При необходимости нахождения персонала в помещении, где установлены работающие открытые УФ бактерицидные облучатели или производится измерение бактерицидного потока УФ ламп, следует использовать лицевые маски, очки и перчатки.

5. Не допускается использование озонирующих УФ ламп для обеззараживания воздушной среды в помещении, где находятся люди. Остаточный озон при комнатной температуре распадается через 30–60 мин. Появление запаха озона может служить индикатором опасности для человека. При обнаружении того, что концентрация

озона в помещении превышает допустимую норму, следует прекратить работу облучателя и выявить озонирующие лампы.

6. При разрушении колбы ртутных ламп в воздух могут попасть пары ртути в количествах существенно выше допустимых норм, что в случае увиолевых ламп требует демеркуризации помещения, а в случае амальгамных ламп – его проветривания.

7. Подача и отключение питания открытых облучателей от электрической сети должны осуществляться с помощью выключателей, расположенных вне помещения у входной двери, которые заблокированы со световым табло над дверью: «Не входить! Опасно! Идёт обеззараживание помещения ультрафиолетом».

8. Бактерицидные лампы, отработавшие срок службы должны храниться в отдельном помещении до их утилизации, согласно действующим нормам.

9. Необходимо периодически осуществлять очистку от пыли отражающих поверхностей облучателей и колбу ламп, т.к. даже небольшой слой пыли заметно снижает значение бактерицидного потока. Протирка от пыли и замена ламп должны проводиться ежемесячно, строго при отключённой от сети бактерицидной установке.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1: табл. П. 1.

Приложение 2: рис. П. 1 и табл. П. 2.

Приложение 3: рис. П. 2–П.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нейштадт Я.Э.* Бактерицидное УФ излучение. – М.: Медгиз, 1956. – 120 с.
2. *Костюченко С.В., Красночуб А.Б., Кудрявцев Н.Н.* Новое поколение бактерицидных об-

лучателей для обеззараживания воздуха и воды на базе высокоэффективных амальгамных ламп // Светотехника. – 2004. – № 4 – С. 15–19.

3. *Васильев А.И., Красночуб А.Б., Кузьменко М.Е., Петренко Ю.П., Печеркин А.Я.* Анализ современных промышленных источников бактерицидного УФ излучения // Светотехника. – 2004. – № 6. – С. 42–45.

4. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: коллективная монография под ред. Ф.В. Кармазинова и др. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012, – 392 с.

5. *Вассерман А.Л., Шандала М.Г., Юзбашиев В.Г.* УФ излучение в профилактике инфекционных заболеваний. – М.: Медицина, 2003. – 204 с.

6. *Вассерман А.Л., Юзбашиев В.Г.* Математическая модель для расчёта производительности УФ бактерицидного рециркулятора // Светотехника. – 2015. – № 6. – С. 38–39.

7. *Арцимович Л.А.* Элементарная физика плазмы. – М.: Госатомиздат, 1963. – 98 с.

8. *Рохлин Г.Н.* Газоразрядные источники света. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 560 с.

9. *Вассерман А.Л.* Измерение бактерицидного потока УФ ртутных ламп низкого давления // Светотехника. – 2019. – № 1. – С. 69–72.

10. Справочная книга по светотехнике. 4-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Ю.Б. Айзенберга и Г.В. Бооса. – М.: 2019. – 892 с.

Перечень нормативных документов (по теме статьи)

I. ГОСТ Р 15013 «Система разработки и постановки продукции на производство. Медицинские изделия».

II. СанПиН 2.1.3.2630–10 «Санитарно-эпидемические правила и нормативы».

III. РЗ.5.1904–04 «Руководство. Использование УФ бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях».

IV. СН № 4557–88 «Санитарные нормы УФ – излучения в производственных помещениях».

V. Методические рекомендации по контролю за организацией текущей и заключительной демеркуризации и оценки её эффективности № 4545–87.

VI. Руководство по проектированию и эксплуатации ультрафиолетовых бактерицидных установок для обеззараживания воздушной среды помещений предприятий мясной и молочной промышленности. Разработано ЗАО Институтом «Гипромясомолпромом»

VII. Руководство МУ 2.3.975–10 «Применение УФ бактерицидного излучения для обеззараживания воздушной среды помещений организаций пищевой промышленности, общест-

Константы фоточувствительности для некоторых видов микроорганизмов при облучении поверхности
 $\sigma(\sigma_s, \text{м}^2/\text{Дж})$ и воздушного объема ($\sigma_v, \text{м}^3/\text{Дж}$)

Бактерии	σ_s	σ_v	Грибковые дрожжи	σ_s	σ_v
Bacillus anthracis	0,051	0,0195	Хлебопекарные дрожжи	0,060	–
<i>Bacillus megatherium</i> (veg)	0,084	0,034	Пивные дрожжи	0,070	–
<i>Bacillus megatherium</i> (spores)	0,178	0,0743	Дрожжеподобные грибы	0,038	–
Bacillus paratyphosus	0,072	0,0274	Saccharomyces cerevisiae	0,038	–
Bacillus subtilis (veg)	0,032	0,0123	Saccharomyces ellipsoideus	0,038	–
Bacillus subtilis (spores)	0,019	0,0073	Saccharomyces sp.	0,029	–
Campylobacter jejuni	0,209	0,0768	Споры плесени		
Clostridium tetani	0,019	0,0073			
Corynebacterium diphtheriae	0,069	0,026			
Бациллы дизентерии	0,105	0,040	Aspergillus flavus	0,003	–
Eberthella typhosa	0,108	0,041	Aspergillus glaucus	0,004	–
Escherichia coli	0,077	0,029	Aspergillus niger	0,0014	–
Klebsiella terrifani	0,089	0,034	Mucor racemosus	0,013	–
Micrococcus candidus	0,038	0,015	Oospora lactis	0,046	–
Phytomonas tumefaciens	0,023	0,0088	Penicillium expansum	0,018	–
Mycobacterium tuberculosis	0,038	0,015	Penicillium roqueforti	0,018	–
Micrococcus sphaeroides	0,053	0,020	Вирусы		
Pseudomonas aeruginosa	0,042	0,014			
Pseudomonas fluorescens	0,065	0,025			
Proteus vulgaris	0,086	0,035	Гепатит А	0,032	0,011
Salmonella enteritidis	0,058	0,022	Вирус гриппа	0,064	0,024
Salmonella paratyphi	0,072	0,068	MS-2 Coliphage	0,012	0,0045
Salmonella typhimurium	0,029	0,011	Полиовирус	0,040	0,015
Sarcina lutea	0,012	0,0045	Ротавирус	0,028	0,0107
Serratia marcescens	0,095	0,037	Простейшие		
Shigella paradysenteriae	0,141	0,051			
Shigella sonnei	0,077	0,029			
Staphylococcus aureus	0,10	0,0179	Cryptosporidium parvum	0,092	0,035
Staphylococcus faecalis	0,053	0,020	Giardia lamblia	0,209	0,0768
Staphylococcus haemolyticus	0,106	0,042			
Streptococcus lactus	0,037	0,014			
Streptococcus viridans	0,043	0,115			
Холерный вибрион (<i>V.comma</i>)	0,066	0,025	Хлорелла обыкновенная	0,019	–

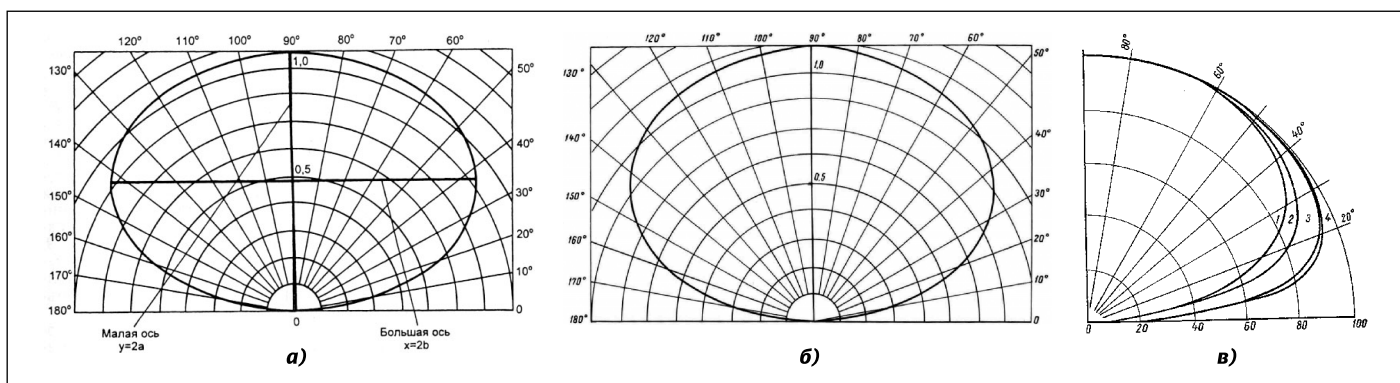


Рис. П. 1. Индикатрисы излучения в продольной плоскости разрядных трубчатых ламп-объемных излучателей: а – ртутная лампа ВД типа ДРРТ-400; б – ксеноновая импульсная трубчатая лампа ИСПТ 6000; в-трубчатые ксеноновые лампы: с водяным охлаждением – ДКсТВ 15000 (1) и ДКсТВ 6000 (2); с воздушным охлаждением – ДКсТ 5000 (3) и ДКсТ 1000 (4)

Таблица П. 2

Амальгамные лампы высокой интенсивности

Тип лампы	Мощность лампы, Вт	Бактерицидный поток, Вт	Длина дуги, мм	Полная длина, мм
ALC100/32	100	23	320	470
ALC120/45	120	30	445	595
ALC170/70	170	50	695	845
ALC215/95	215	65	945	1095
ALC240 / 107	240	75	1070	1220



Рис. П. 4. Модуль с бактерицидными лампами «МЕГАЛИТ-6» (НПО «ЛИТ», РФ), встраиваемый в систему приточно-вытяжной вентиляции

венного питания и торговли продовольственными товарами».

Предприятия-изготовители бактерицидных ламп, облучателей и УФ радиометров

1. ООО «НИИИС им. Л.Н Лодыгина», Саранск – Бактерицидные лампы.
2. НПО «ЛИТ» Москва – Бактерицидные лампы и облучатели.
3. ЗАО «КРОНТ», Москва – Бактерицидные облучатели.
4. ООО НТП «ТКА», Санкт-Петербург, ВНИИОФИ, Москва – Радиометры.

Рис. П. 2. Внешний вид промышленных образцов бактерицидных закрытых облучателей (рециркуляторов): а – «Stery box» (TissiMedica, США), производительность 20–50 м³/ч, 5 ртутных ламп НД мощн. по 25 Вт, 500×150×600 мм, 25 кг; б – «Дезар-5» («КРОНТ», РФ), производительность 100 м³/ч, 5 ртутных ламп НД мощн. по 15 Вт, 890×150×145 мм, 7,2 кг; в – «АЭРОЛИТ-200» (НПО «ЛИТ», РФ), производительность 200 м³/ч, 1 амальгамная лампа мощн. 170 Вт, 1100×285×150 мм, 15 кг

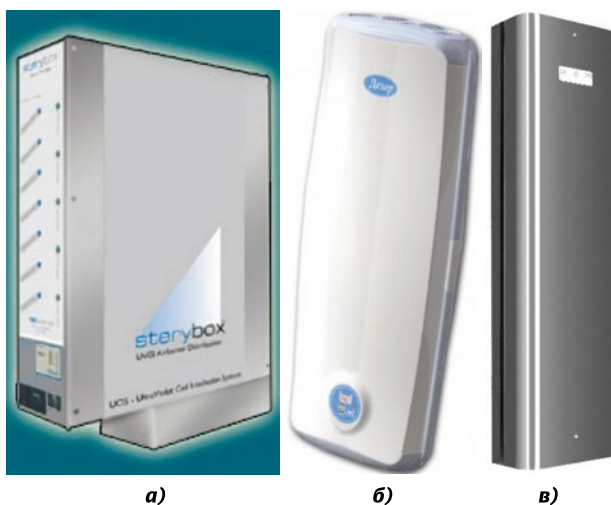
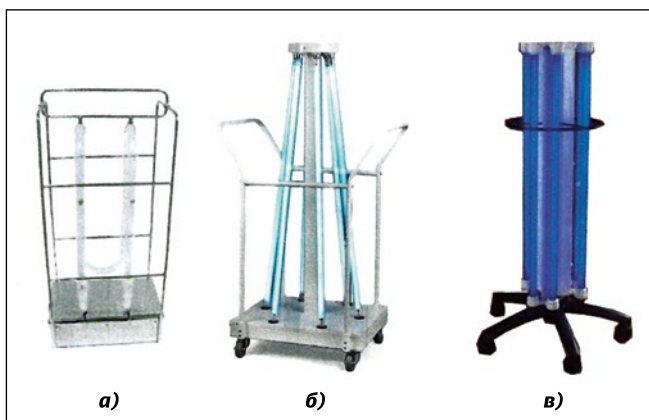


Рис. П. 3. Внешний вид промышленных образцов бактерицидных открытых облучателей: а – «СВЕТОЛИТ-90» (НПО «ЛИТ», РФ); б – ОБП-6×30–450 (ООО «СибЭСТ», РФ); в – ОБН-450П 6×55 (ООО ЦС «СЕНТЕХ», РФ)



Вассерман Александр Львович,
кандидат техн. наук.
Окончил в 1957 г.
электрофизический факультет ВЗЭИ.
Заслуженный машиностроитель РФ.
Инвалид Великой Отечественной войны

Знания, необходимые современным светотехникам¹

В. ВАН БОММЕЛЬ

Консультант в области освещения, Нюнен, Нидерланды
Email: wout@woutvanbommel.eu

Аннотация

Чтобы предотвратить разочарование в осветительных установках со светодиодами (СД), необходимо досконально знать типичные характеристики самых разных твердотельных источников света, и хорошо известные сведения о зрении и цвете следует при этом совместить с результатами новых фундаментальных исследований взаимосвязей между освещением с одной стороны и зрением, работоспособностью, комфортом и здоровьем людей и биологическим воздействием света на человека с другой стороны. Это воздействие влияет на «работу» нашего тела и тем самым на наше здоровье, самочувствие и бодрость. Современные установки внутреннего освещения следует проектировать таким образом, чтобы они обеспечивали одновременно и зрительное восприятие, и благотворное невизуальное биологическое воздействие, и при этом исключали неблагоприятные особенности освещения, такие как пульсации, опасность синего света и нарушение биоритмов.

СД можно использовать не только для освещения, но и для передачи данных. Использование СД освещения для передачи данных называют «свет не только для освещения». Передача данных видимым светом (*VLC*), *Li-Fi* и свет, который используется в качестве датчика, также относятся к обсуждаемой теме. Современные светотех-

ники должны ориентироваться в этих новых технологиях и областях применения.

Автор настоящей статьи опубликовал в 2019 г. книгу «Внутреннее освещение: основы, технические средства и применение» [1]. На её 500 страницах обсуждаются все вопросы, имеющие важное значение для современных специалистов в области внутреннего освещения. Данная обзорная статья основана именно на этой книге и повторяет её разделение на главы. В каждом из разделов статьи в качестве примера приводится более подробное описание одного-двух важных моментов.

Ключевые слова: внутреннее освещение, ориентированное на человека освещение, освещение и здоровье, освещение и возраст, зрительная работа, зрительная удовлетворённость, терапевтическое действие света, опасность света, СД, проектирование внутреннего освещения.

1. Основы

1.1. Работа зрительной системы

Зрительные ощущения возникают в результате процессов, протекающих в глазе и мозге. Попадающий в глаз свет проецируется на заднюю поверхность внутренней части глаза – сетчатку. Сетчатка содержит фоточувствительные клетки – колбочки и палочки. Содержащиеся в этих рецепторных клетках фотопигменты поглощают свет, генерируя в результате химико-электрические сигналы, которые передаются по нервам в зрительную зону коры головного мозга, где и формируется зрительное ощущение. Небольшой участок сетчатки, который расположен вокруг оси глаза и называется центральной ямкой или фовеа, содержит только колбочки. Другая, периферическая, часть сетчатки содержит небольшое количество колбочек и большое количество палочек. Каждая из расположенных в центральной ямке колбочек соединяется с мозгом

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

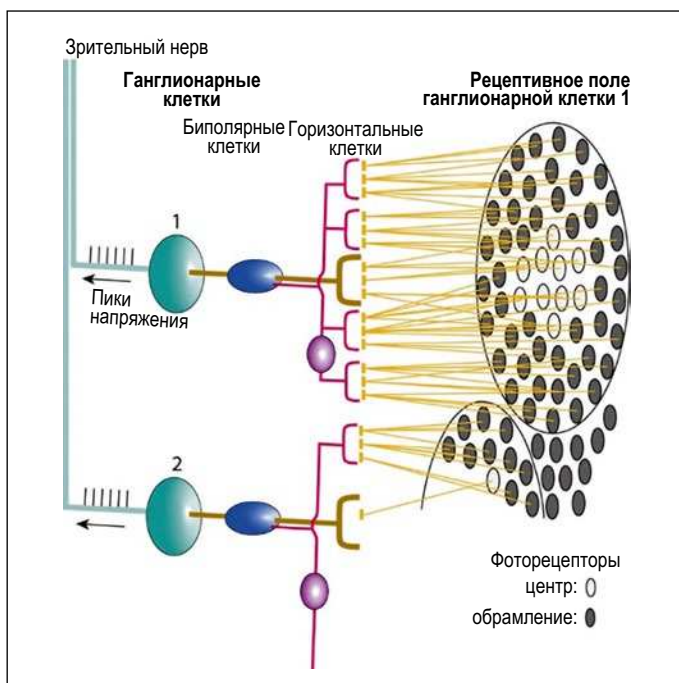


Рис. 1. Рецептивные поля двух ганглионарных клеток

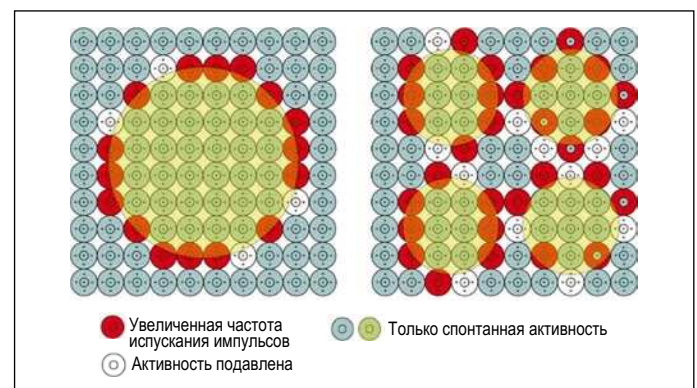


Рис. 2. Обнаружение краёв источника света. Источник света, имеющий равномерную яркость (а), возбуждает меньшее количество ганглионарных клеток, чем источник, имеющий неравномерную яркость (б)

отдельным нервом. Фоточувствительные палочки расположены на периферии сетчатки. Многие из них сходятся к одной ганглионарной клетке. В результате фoveальное зрение оказывается резким, а периферийное – нерезким.

Сигналы сходящейся к одной ганглионарной клетке совокупности палочек, которые называют рецептивным полем этой клетки (рис. 1), обрабатываются следующим образом. Ганглионарные клетки сравнивают сигналы, поступающие от внутренней круговой области рецептивного поля, с сигналами, поступающими от наружной кольцевой области (обрамления) этого же рецептивного поля. Осуществляемая ганглионарными клетками сетчатки обработка сигналов, поступающих из центра и обрамления, позволяет распознавать переход от света к темноте и тем самым обнаруживать контуры ярких объектов.

На рис. 2а это проиллюстрировано посредством демонстрации того, как имеющий постоянную яркость яркий кольцевой объект (или источник света) взаимодействует с несколькими рецептивными полями соседних ганглионарных клеток. Возбуждаются только клетки, выделенные красным цветом. Это означает, что информацию в мозг передают только края имеющих равномерную яркость участков. Имеющие постоянную яркость участки источника света информацию в мозг не передают, благодаря чему он нагружен меньше. Многочисленные маленькие яркие участки источника света (например, в случае светильника с СД матрицей, – рис. 2б) возбуждают большее количество ганглионарных клеток в связи с наличием большего количества краёв и, соответственно, больше нагружают мозг, что, в свою очередь, может объяснять большую дискомфортную яркость, создаваемую светильниками с СД матрицами. Это явление используется в настоящее время для разработки совершенно новой научной базы для прогнозирования дискомфортной блёскости. Предварительные результаты оказались многообещающими [2–5].

Цветное зрение возможно благодаря наличию трёх типов колбочек, одни из которых чувствительны к красноватому, другие – к зеленоватому, а третьи – к синеватому свету. Их сигналы сравниваются друг с другом, причём обработка сигналов осуществляется не в ганглионарных клетках сетчатки, а в ганглионарных клетках, расположенных в некоем участке центральной части мозга, который называют латеральным колленчатым ядром (*LGN*). Это сравнение пар цветов (жёлтого и синего, зелёного и красного и белого и чёрного) в значительной степени определяет наше восприятие цвета. Так как у нас имеются палочки только одного типа, то палочки не могут обеспечить цветное зрение.

Колбочки активны главным образом при уровнях освещения, превышающих примерно 5 кд/м². В этом случае зрение называют дневным. Кривая спектральной чувствительности глаза $V(\lambda)$, которая определена для дневного зрения, лежит в основе всех фотометрических единиц измерения.

1.2. Цвет

По сравнению с газоразрядными лампами, твердотельные источники света предоставляют гораздо больше возможностей в части формирования спектров, удовлетворяющих разным требованиям к качеству цвета. Поэтому вновь было обращено внимание на точное описание цве-

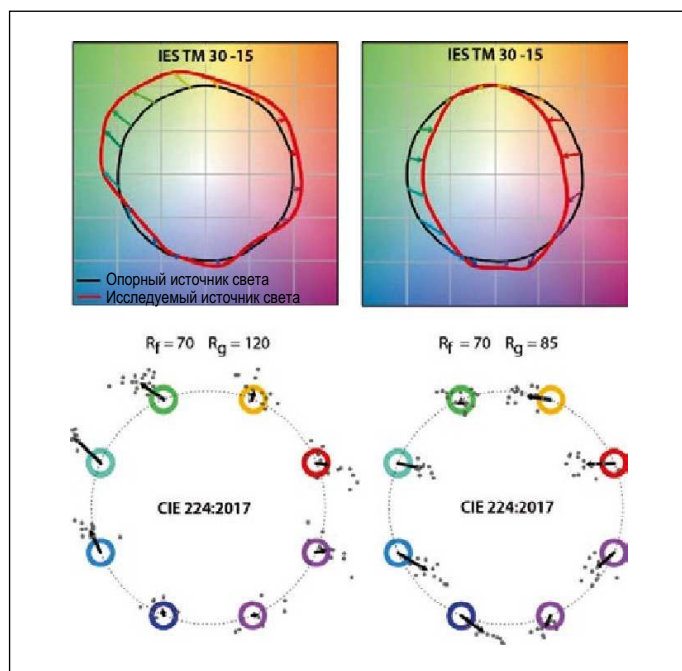


Рис. 3. Векторные отображения цветов согласно *IES TM 30-15* (вверху) и *CIE 224:2017* [11] (внизу), отображающие сдвиги цветов, полученные применительно к двум источникам света, по отношению к соответствующим им опорным источникам света

та лампы, основанное на восприятии цвета. Это в первую очередь относится к описанию разных типов источников белого света. А так как во внутренних пространствах всё чаще используются цветные СД, то имеется потребность в точном описании и цветных источников света.

Для цветного зрения большее значение имеет число «три». В качестве примеров можно привести три типа колбочек и трёхканальную систему цветного зрения, которая была описана в предыдущем разделе. В принципе, все цвета, которые могут быть сформированы тремя основными цветами, можно отобразить только в трёхмерном пространстве. Упрощённый переход к плоскому двумерному отображению возможен при пренебрежении влиянием отличий яркостей цветных стимулов и концентрации внимания только на цветовом тоне и насыщенности цвета. При помощи двух координат (x и y) прямоугольной системы координат был сформирован график цветности x - y МКО 1931 г. (хорошо известный «цветовой треугольник МКО»).

Коррелированную цветовую температуру (КЦТ) источника света, характеризующую оттенок белого цвета, легко определить на основе координат цветности x и y . Эллипсы Мак Адама в более равномерном пространстве u' - v' лежат в основе бинирования при изготовлении СД. Большая равномерность означает, что равным расстояниям на графике u' - v' соответствуют одинаковые воспринимаемые цветовые различия.

Огромное количество новых исследований в области цвета могут послужить основой для замены ряда подходов к описанию цвета, которые были разработаны в период между 1930-ми и 1960-ми годами. Было предложено новое равноконтрастное трёхмерное цветовое пространство. Цветовое пространство *CIECAM02-UCS* было предложено в отчёте *TM-30* Североамериканского светотехнического общества [6] как основа для новой двухмерной системы оценки цветопередачи, включающей в себя

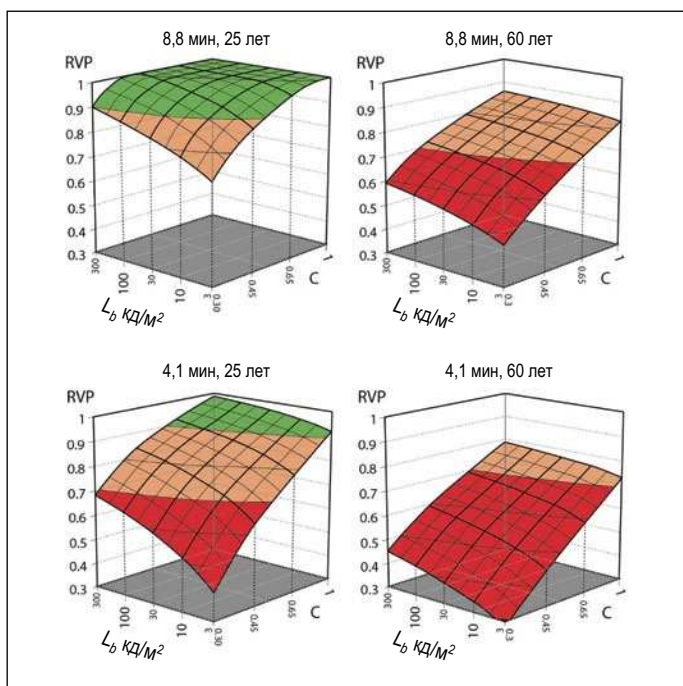


Рис. 4. Тела RVP: зависимости относительной зрительной работоспособности (RVP) от контраста объекта с фоном (C) и яркости фона (L_b) для наблюдателей возрастом 25 (слева) и 60 (справа) лет. Вверху: угол наблюдения 8,8 мин (такой же, как и при наблюдении буквы шрифта *Times New Roman* с кеглем 8,5 с расстояния 50 см); внизу: угол наблюдения 4,1 мин (такой же, как и при наблюдении буквы шрифта *Times New Roman* с кеглем 4 с расстояния 50 см)

индекс точности воспроизведения цвета R_f (fidelity index) и индекс цветовой гаммы R_g (gamut index). Многочисленные исследования продемонстрировали наличие относительно хорошей корреляции между R_f и общим индексом цветопередачи МКО R_a [7–10]. Однако при наличии возможности создания СД, которые излучают свет, спектр которого формируют небольшие спектральные линии с определёнными длинами волн (например, при помощи квантовых точек), индекс точности воспроизведения цвета R_f представляется более перспективным, чем основанный на R_a старый метод оценки цветопередачи. Вторая метрика этой двухмерной системы – индекс цветовой гаммы R_g – служит мерой насыщенности цвета. В некоторых областях применения источник света, смещающий конкретный цвет или конкретные цвета в определённом направлении, например, в сторону большей насыщенности и, тем самым, в сторону более колоритных цветов, может сделать сцену более приятной. Если индекс цветовой гаммы превышает 100, то цветовое смещение обычно направлено в сторону большей насыщенности, а если он меньше чем 100 – то в сторону меньшей насыщенности. Векторные отображения цветов наглядно отображают цветовые характеристики источников света. Они являются незаменимым новым инструментом проектировщика освещения эпохи СД. В верхней части рис. 3 векторные диаграммы, предложенные в *IES-TM-30* [6], приведены для двух различных источников света с одинаковыми индексами точности воспроизведения цвета, но разными индексами цветовой гаммы. Стрелкой (вектором) обозначен сдвиг цвета относительно чёрного круга, отображающего опорный источник света (без сдвига цвета). Концы векторов соединены красной линией, что позволяет продемонстрировать

как величину, так и направление сдвига цвета в каждой из частей диаграммы. Если эта линия расположена за пределами круга, соответствующего опорному источнику света, то насыщенность увеличивается, а если она расположена в пределах этого круга, то насыщенность уменьшается. Так что представленный в левой верхней части рис. 3 источник света сильно насыщает зелёно-жёлтые цвета и незначительно насыщает красно-оранжевые цвета. В среднем, этот источник света обеспечивает сильное насыщение, что следует и из его высокого индекса цветовой гаммы ($R_g = 120$). Источник света в левой верхней части рис. 3 приводит к сильному уменьшению насыщенности значительной части цветов ($R_g = 85$). В публикации МКО [11] для отображения сдвигов цвета была разработана альтернативная диаграмма (рис. 3 внизу), которая содержит больше информации о разбросе результатов, что может оказаться важным с научной точки зрения. Диаграмма *IES-TM-30* является более понятной и тем самым лучше подходит для общего пользования.

1.3. Зрительная работоспособность

Зрительная работоспособность (*visual performance*), определённая применительно к объектам разного размера и с разными контрастами в функции яркости фона, информирует о том, какие минимальные уровни освещения рабочих мест внутри зданий обеспечивают условия для эффективной работы людей. Для обеспечения возможности эффективной работы почти во всех областях человеческой деятельности зрительная работоспособность должна быть гораздо выше соответствующей порогу видимости. Эффективность зависит от того, с какой скоростью и точностью могут быть замечены и идентифицированы зрительные задачи. Многие исследователи проводили сверхпороговые исследования связи между уровнем освещения и точностью выполнения работ. Используя в их исследованиях задачи охватывали кольца Ландольта [12, 13], поисковые задачи с использованием листов со случайным распределением всех чисел от 1 до 100 [14], задачи верификации, в которых сравнивались два напечатанных списка номеров [15, 16], и задачи с входными данными компьютеров [17]. МКО сравнила эти разные методы и установила, что наилучшее прогнозирование зрительной работоспособности в условиях офисов обеспечивает модель, основанная на данных, полученных применительно к кольцам Ландольта [18]. Так что мы использовали работы [12, 13] в качестве основы для расчёта относительной зрительной работоспособности (RVP) при разных контрастах между объектом и фоном и для разных яркостей фона. На рис. 4 приведены так называемые тела RVP, рассчитанные для наблюдателей возрастом 25 и 60 лет при углах наблюдения 8,8 мин (таком же, как и при наблюдении буквы с кеглем 8,5 с расстояния 50 см) и 4,1 мин (таком же, как и при наблюдении буквы с кеглем 4 с расстояния 50 см). Для облегчения выполнения задач средней сложности, которые выполняются во многих офисах, показано, что зрительная работоспособность не является ключевым параметром при определении того, какой уровень освещения требуется для молодых людей. В случаях выполнения более трудных зрительных задач зрительная работоспособность приобретает важное значение. Зрительная работоспособность существенно уменьшается

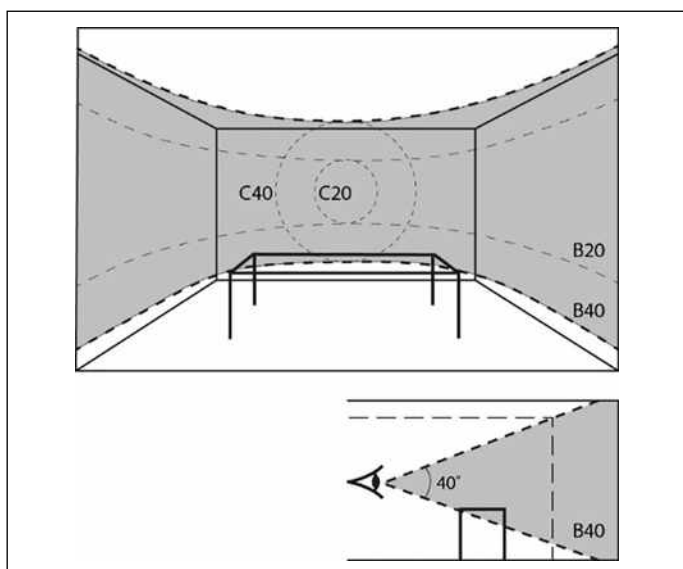


Рис. 5. Макет конференц-зала с указанием различных основных участков, который использовался в [20]

с возрастом, и работоспособность людей зрелого возраста следует учитывать при задании уровней освещения.

Слепящая блёскость, представляющая собой разновидность блёскости, которая отрицательно сказывается на зрительной работоспособности, в большинстве условий внутреннего освещения оказывает пренебрежимо малое влияние. Во внутренних помещениях блёскость следует лимитировать, ограничивая дискомфортную блёскость. О дискомфортной блёскости речь пойдёт в разделе 1.4 «Зрительная удовлетворённость».

Влияя на размер зрачка, спектральный состав света влияет и на остроту зрения, являющуюся мерой зрительной работоспособности. Однако во многих рабочих условиях это влияние оказывается незначительным, так как большая часть зрительных задач выполняется в условиях существенного превышения порога видимости, а при этом спектр вряд ли играет какую-либо роль [19].

1.4. Зрительная удовлетворённость

Описанная в предыдущем разделе зрительная работоспособность относится к освещению объектов. В то же время, для оценки удовлетворительности зрительного восприятия общего облика пространства решающее значение имеет освещение этого пространства в целом. Зрительная удовлетворённость зависит от светлоты пространства, пространственного распределения яркости, направленности света, уровня дискомфортной блёскости и цветового оттенка света.

Для описания зрительного облика помещения были предложены две метрики: средняя яркость горизонтальной полосы шириной 40° [20–23] и средняя светимость поверхностей помещения [24–26]. На рис. 5 показан макет помещения, использовавшийся в [20] для исследования того, как различные «доминирующие» участки влияют на зрительную удовлетворённость помещением. Наилучшее соответствие имело место в случае B40.

Облик расположенных в воспринимаемом пространстве трёхмерных объектов и поверхностей зависит от направленности освещения. Концепция потока освещения (*flow*

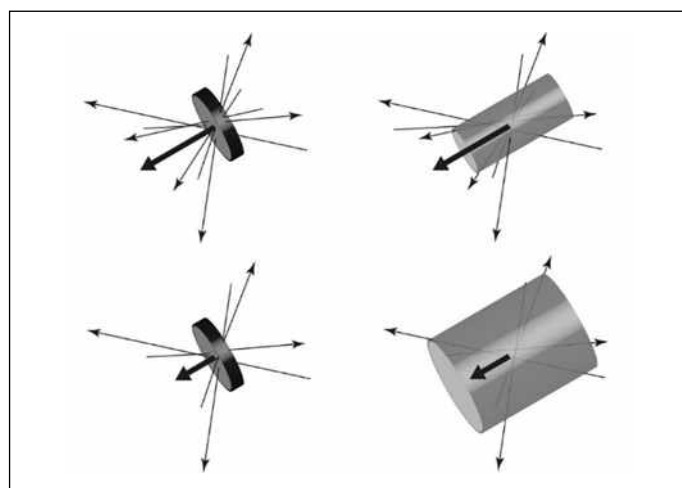


Рис. 6. Различие между световыми лучами и потоком освещения: небольшими стрелками обозначены световые лучи, а широкими стрелками обозначены векторы освещения. Диаметр световой трубки обратно пропорционален абсолютной величине вектора. Вверху: большой вектор освещения и, соответственно, маленькая световая трубка. Внизу: меньший вектор освещения и, соответственно, более широкая световая трубка. Примечание: расположенные слева диски на самом деле имеют бесконечно малые размеры

of lighting), которая проиллюстрирована на рис. 6, позволяет рассчитать основные направления освещения и его интенсивность для точки пространства на основе рассмотрения всех лучей света, попадающих в эту точку. Векторно-скалярное отношение (*vector-to-scalar ratio*) позволяет количественно описать поток освещения, а световые трубки обеспечивают его визуализацию. Последние позволяют детально проанализировать пространственные и формообразующие возможности проекта освещения. Возможности, предоставляемые современной компьютерной графикой, позволили разработать методы основанной на световых трубках визуализации осветительных установок [27–33]. Соответствующее программное обеспечение становится незаменимым инструментом современного проектировщика освещения, позволяя оценить освещение буквально в каждой точке пространства.

Объединённый показатель дискомфорта *UGR* используется в качестве меры дискомфортной блёскости. Однако *UGR* нуждается в изменении в случае источников блёскости с неравномерным распределением яркости, к которым относятся многие светильники с СД матрицами. Как упоминалось в разделе 1.1 (рис. 1), некоторые исследователи в последнее время основывают свою оценку дискомфортной блёскости на реакции нервной системы на яркий свет и на работе рецептивных полей. Процесс осуществляемого в ганглионарных клетках преобразования сигналов нервной системы в сигналы регистрации краёв объектов (рис. 2) является многообещающим кандидатом на использование для количественной оценки дискомфортной блёскости с фундаментальной физиологической точки зрения. Один из технических комитетов МКО совсем недавно ввёл временное изменение методики определения *UGR*, которое будет действовать до тех пор, пока не будут получены практические результаты применения фундаментального подхода, основанного на физиологических и психологических механизмах. Этот комитет пришёл к выводу, что предпочтительным изменением методики

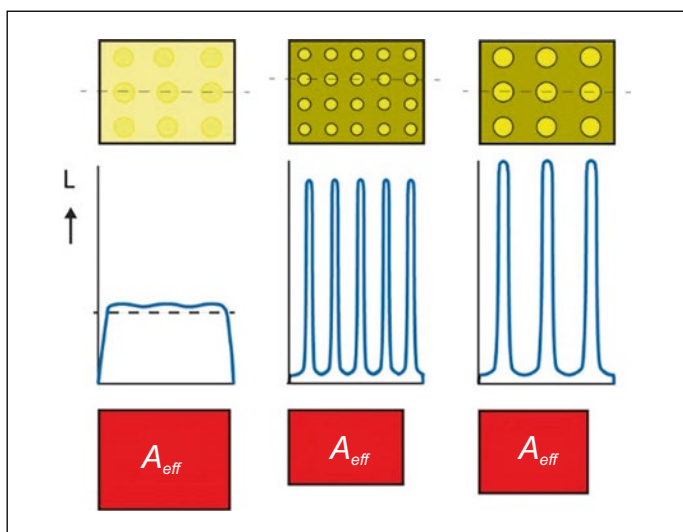


Рис. 7. Примеры эффективной площади излучающей свет области светильника с неравномерной яркостью A_{eff} , введённой МКО в 2019 г. [34] для использования в стандартной формуле для расчёта дискомфорта блёскости (UGR)

определения UGR является использование «эффективной площади излучающей свет области» в стандартной (не изменённой) формуле для расчёта UGR [34]. Эффективная площадь излучающей свет области A_{eff} определяется на основе имеющего высокое разрешение изображения распределения яркости светильника. У имеющих неравномерную яркость светильников эффективная площадь излучающей свет области меньше, чем её реальная площадь (рис. 7). Порядок проведения измерений и расчётов подробно описан в соответствующей публикации МКО [34].

На дискомфортную блёскость влияет и спектр излучения источника блёскости: коротковолновые источники света создают большую дискомфортную блёскость, чем длинноволновые.

Основанное на КЦТ правило Круитхофа [35] недостаточно совершенно, чтобы его можно было использовать для прогнозирования зрительной удовлетворённости источниками, генерирующими свет с различными оттенками белого цвета.

1.5. Невизуальное биологическое воздействие света

Суточные (циркадные) ритмы организма, являющиеся неотъемлемой особенностью жизнедеятельности людей, синхронизируются естественным 24-часовым чередованием светлых и тёмных периодов, и подгонка к изменению освещения является одним из последствий невидуального биологического воздействия света. Без этой подгонки ритмы организма будут отклоняться от 24-часовых. Подобное рассогласование будет отрицательно сказываться на здоровье человека, в частности, на качестве сна. Оно также приведёт к снижению бодрости и работоспособности в дневное время.

В 2020 г. была открыта неизвестная до этого разновидность фоторецепторов – фоточувствительные ганглионарные клетки сетчатки $pRGC$, связанные с супрахиазмальными ядрами (SCN), формирующими расположенную в мозгу структуру, которая выступает в роли главных би-

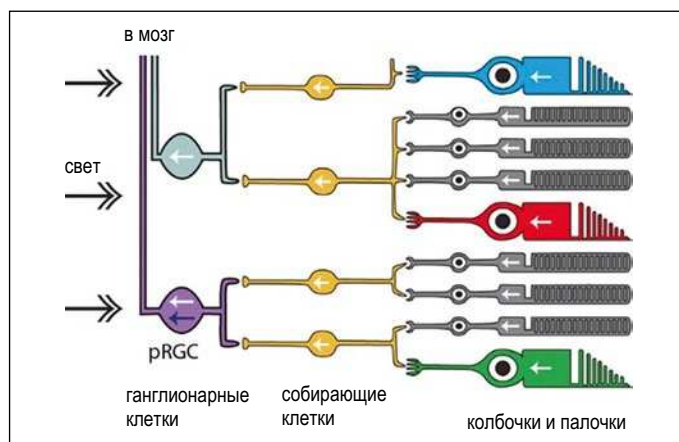


Рис. 8. Часть сетчатки с фоточувствительными клетками, включая фоточувствительные ганглионарные клетки сетчатки $pRGC$ (обозначены пурпурным цветом). Белыми стрелками обозначены сигналы, поступающие в мозг в результате преобразования света, падающего на колбочки и палочки, а синей стрелкой обозначен сигнал, генерируемый под воздействием света содержащимся в $pRGC$ меланопсином

ологических часов [36]. В свою очередь, SCN соединены с шишковидной железой, в которой вырабатывается мелатонин, и с корой надпочечников, отвечающей за выработку кортизола. Гормоны мелатонин и кортизол управляют сном и активностью. Кортизол увеличивает содержание глюкозы для обеспечения организма энергией. В быту его иногда называют гормоном энергии. Мелатонин замедляет протекающие в организме процессы и вызывает сонливость. Содержание мелатонина, который в быту называют гормоном сна, при нормальном суточном ритме достигает максимума в середине ночи и, опять же при нормальном суточном ритме, почти полностью обнуляется в дневное время. Кортизол, который обеспечивает образование глюкозы, снабжает организм энергией. Его количество должно находиться на достаточно высоком уровне днём и достигать минимума ночью.

Помимо влияния на циркадные ритмы, свет может оказывать прямое мгновенное фотобиологическое воздействие, которое непосредственно влияет на бодрость и работоспособность.

Спектральная чувствительность $pRGC$, определяемая содержащимся в этих клетках фотопигментом меланопсином, отлична от спектральных чувствительностей палочек и колбочек. Пики спектральной чувствительности $pRGC$ расположены в синей области спектра. Палочки и колбочки имеют нейронную связь с ганглионарными клетками, и, соответственно, их сигналы взаимодействуют с сигналами, поступающими от самих $pRGC$ (рис. 8). Многие из этих нейронных соединений пока что неизвестны. В первую очередь из-за этого невозможно определить одну-единственную функцию спектральной чувствительности или спектр действия для всех невидуальных воздействий света. КЦТ может использоваться лишь для примерной оценки спектра ламп применительно к их невидуальному биологическому воздействию. Облучённости, спектрально взвешенные применительно к пяти фотопигментам организма человека в целом, обеспечивают наилучшую оценку невидуального воздействия света. Из этих пяти пигментов наиболее важным с точки зрения невидуального воздействия света является содержащийся в $pRGC$ меланопсин.

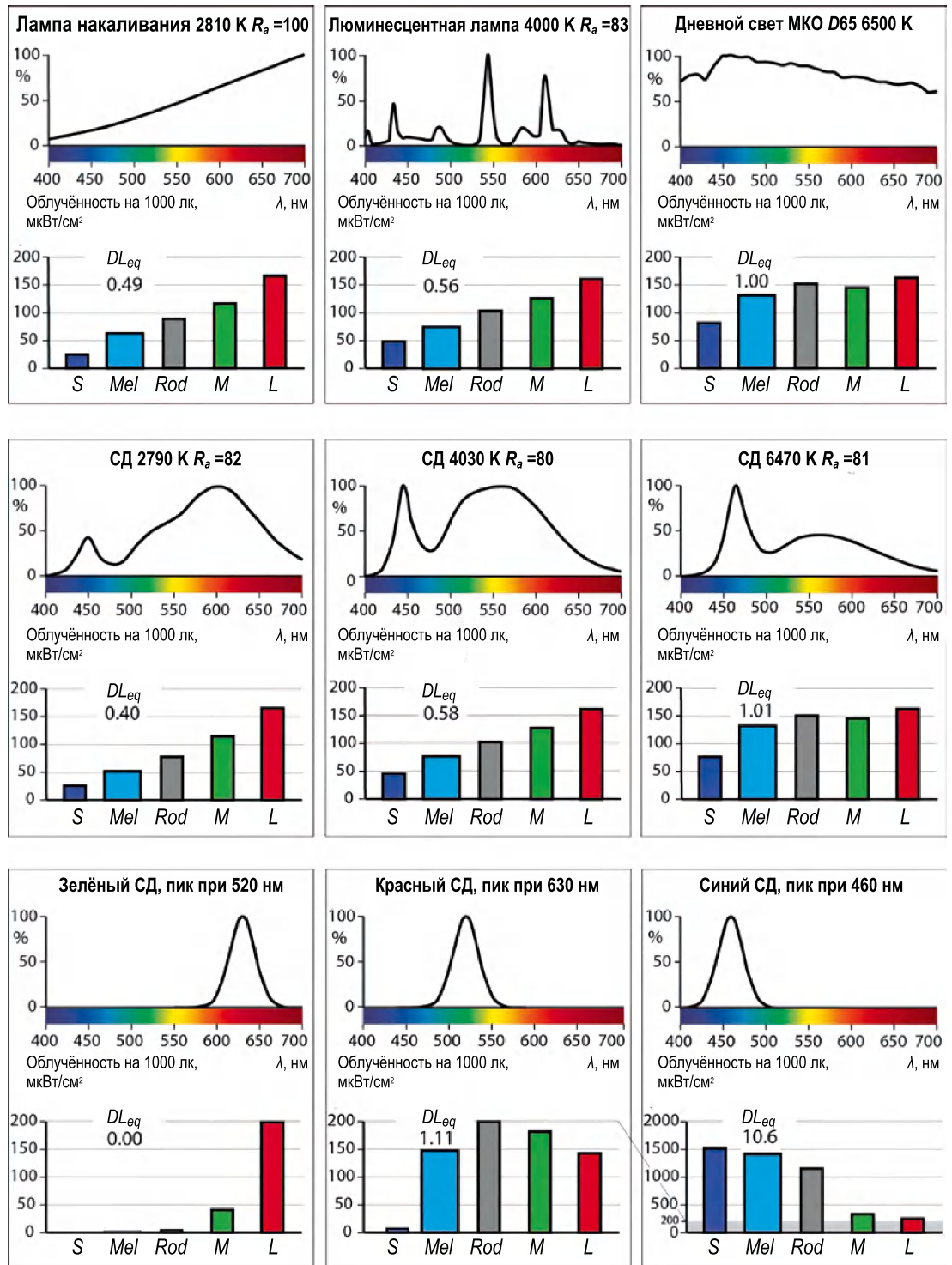


Рис. 9. α -опические облучённости, создаваемые лампами разных типов при равной 1000 лк освещённости на внешней поверхности глаза (*S* – цианопическая облучённость, *Mel* – меланопическая облучённость, *Rod* – родопическая облучённость, *M* – хлоропическая облучённость, *L* – эритропическая облучённость, DL_{eq} – показатель меланопической эффективности дневного света (*D65*). Чтобы выделить меланопическую облучённость соответствующие столбики сделаны немного шире

Спектры поглощения колбочек и палочек давно известны. В своём международном стандарте *CIE 026:2018* [37] МКО ввела спектральную «меланопическую чувствительность» (*melanopic sensitivity*), воспользовавшись для этого результатами измерений спектра поглощения фотопигмента меланопсина.

Эти пять спектрально взвешенных облучённостей получили общее название « α -опическая облучённость» (*α -opic irradiance*). Каждую из пяти различных α -опических облучённостей назвали по имени соответствующего фотопигмента. Это меланопическая облучённость (*pRGC*), палочковая или родопическая (*rhodopic*) облучённость (па-

лочка), цианопическая (*cyanopic*) облучённость (колбочки *S*-типа), хлоропическая (*chloropic*) облучённость (колбочки *M*-типа) и эритропическая (*erythropic*) облучённость (колбочки *L*-типа). На рис. 9 для ламп нескольких типов приведены рассчитанные для пяти фоторецепторов значения α -опических облучённостей при равной 1000 лк освещённости на внешней поверхности глаза. Эти пять «облучённостей на 1000 лк» дают хорошее представление об эффективности ламп применительно к вызываемой ими реакции этих пяти фоторецепторов. В областях применения, связанных с не визуальным биологическим воздействием, часто интересно сравнить меланопическую облучённость,

Три причины несогласованности циркадных ритмов сменных работников

Освещение в ночное время	Равная 500 лк горизонтальная освещённость не влияет на сдвиг циркадных фаз
Освещение в дневное время до и после дневного сна	Яркий дневной свет помогает сохранять настройку на естественное чередование дня и ночи
Выходные	Возврат от «ночной работы и «дневного сна» к естественному ритму чередования дня и ночи

создаваемую конкретным источником света, с меланопической облучённостью, создаваемой дневным светом (при том же уровне освещённости глаза). Соответственно, на рис. 9 приведены значения показателя меланопической эквивалентности по сравнению с дневным светом ($D65$) DL_{eq} (*melanopic equivalent daylight ratio* ($D65$)), представляющего собой отношение меланопической облучённости, создаваемой рассматриваемой лампой, к меланопической облучённости, создаваемой дневным светом с КЦТ 6500 К ($D65$, стандартное небо МКО). Это отношение называют также *melanopic daylight* ($D65$) *efficacy ratio* [37].

1.6. Свет, сон, бодрость и работоспособность

В основе классической модели сна лежит взаимодействие двух разных процессов. Для гомеостатических процессов характерны увеличение или уменьшение сонливости (*sleep pressure*) после пробуждения и во время сна соответственно. Второй процесс относится к циркадным и обеспечивает возможность засыпания в то время, в кото-

рое человек обычно отходит ко сну (*sleep window*). На последний процесс сильное влияние оказывают свет и темнота, обеспечиваемые в нужное время: свет, присутствующий в дневное время, влияет на возможность засыпания следующей ночью. При этом значение имеют как уровень освещения, так и спектральный состав света. Холодный белый свет эффективнее тёплого белого света.

Свет влияет на сонливость, бодрость и работоспособность в дневное время двояким образом (рис. 10). Варианты 1 соответствуют описанные выше циркадные процессы, тогда как вариант 2 является полностью фотобиологическим. Реализация варианта 1 начинается при наличии дневного света в предшествующий день (вчера). Вчерашний дневной свет влияет на качество вчерашнего ночного сна, о чём говорилось в предыдущем разделе. Так что вчерашнее дневное освещение влияет на сегодняшние сонливость, бодрость и работоспособность. Варианту 2 соответствует прямое фотобиологическое воздействие света, который оказывает сильное возбуждающее воздействие, напрямую обуславливающее протекание фотобиологических процессов и продолжающееся всё то время, в течение которого наличествует освещение. На рис. 11 предложен динамический сценарий освещения дневных рабочих мест, при котором реализуется динамическое изменение как уровня, так и цвета освещения с целью обеспечения положительного результата действия обоих упомянутых факторов. Этот сценарий обеспечивает оптимальный баланс между выполнением энергетических требований с одной стороны и требований к визуальному и невизуальному воздействию освещения с другой стороны.

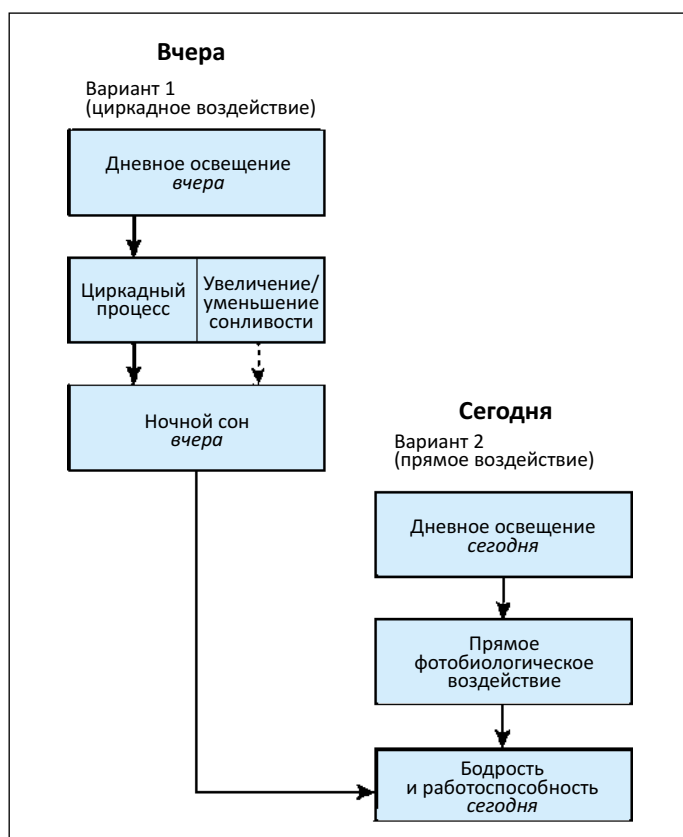


Рис. 10. Два варианта влияния дневного освещения на бодрость и работоспособность в дневное время

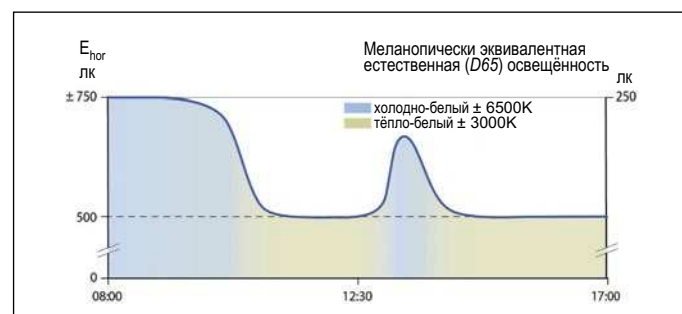


Рис. 11. Сценарий ориентированного на человека освещения офисов, в основу которого положена равная 250 лк меланопически эквивалентная естественная ($D65$) освещённость (*melanopic equivalent daylight* ($D65$) *illuminance*), которая примерно соответствует равной 750 лк горизонтальной освещённости (для 6500 К и общепринятых распределения света и расположения светильников). При 3000 К равная 500 лк горизонтальная освещённость примерно соответствует равной 85 лк меланопически эквивалентной естественной ($D65$) освещённости

1.7. Сменная работа, освещение, сон и работоспособность

Циркадные ритмы большинства работающих в ночную смену в условиях не слишком яркого освещения сдвигаются незначительно [38–42], хотя такое освещение и приводит к несогласованности циркадных ритмов организма и режима «работа в ночное время – сон в дневное время». Если говорить о циркадных фазах, то при этом организм функционирует в режиме «биологическая ночь» в тот период, когда он должен работать, и в режиме «биологический день» в тот период, когда он должен спать. В табл. 1 перечислены наиболее важные причины подобного несогласованности. Этот фазовый сдвиг и соответствующая несогласованность циркадных ритмов организма и чередования работы и сна отрицательно сказываются на здоровье работающих посменно людей. Он также плохо влияет на сон, бодрость и работоспособность. Освещение, специально спроектированное для работающих посменно, может способствовать уменьшению этих проблем. Ночную смену считают наиболее деструктивной.

Задачи освещения для сменной работы меняются в зависимости от продолжительности, времени и частоты изменения графика сменной работы и от степени опасности выполняемой работы. Для постоянной работы в ночную смену и медленного изменения графика сменной работы целью должна являться полная перенастройка циркадных ритмов. В случае часто изменяющегося графика сменной работы, когда изменения происходят через 3–7 дней, частичное или компромиссное изменение фаз предоставляет возможности, которые позволяют сменным работникам сохранять относительно нормальный образ жизни. Циркадные ритмы работающих в одну ночную смену или в режиме частого чередования смен предпочтительнее было бы не менять по фазе. Эти цели можно реализовать при разных режимах освещения. Для выбора подходящих режимов можно воспользоваться результатами новейших исследований. Некоторые режимы освещения основаны на использовании яркого белого света с плавно изменяющейся КЦТ, тогда как другие режимы освещения основаны на использовании повторяющихся сравнительно кратковременных импульсов очень яркого света или на свете с отфильтрованными короткими длинами волн (белый свет с малым содержанием коротких длин волн).

1.8. Возрастные изменения

Возрастные изменения оптической системы и сетчатки глаза и обеспечивающих связь с мозгом зрительных нервов были всесторонне исследованы и подробно описаны [43–45]. Эти изменения отрицательно сказываются на зрении и циркадной системе. На рис. 12 перечислены как сами эти вредные изменения, так и их отрицательные последствия для зрения и циркадной системы.

Возрастные изменения оптической системы глаза приводят к вызванному пожелтением хрусталика уменьшению его прозрачности, структурным изменениям роговой оболочки глаза и глазного яблока (помутнение) и уменьшению размера зрачка вследствие потери эластичности. Всё это отрицательно сказывается на количестве света, попадающего на сетчатку. Пожелтение хрусталика глаза

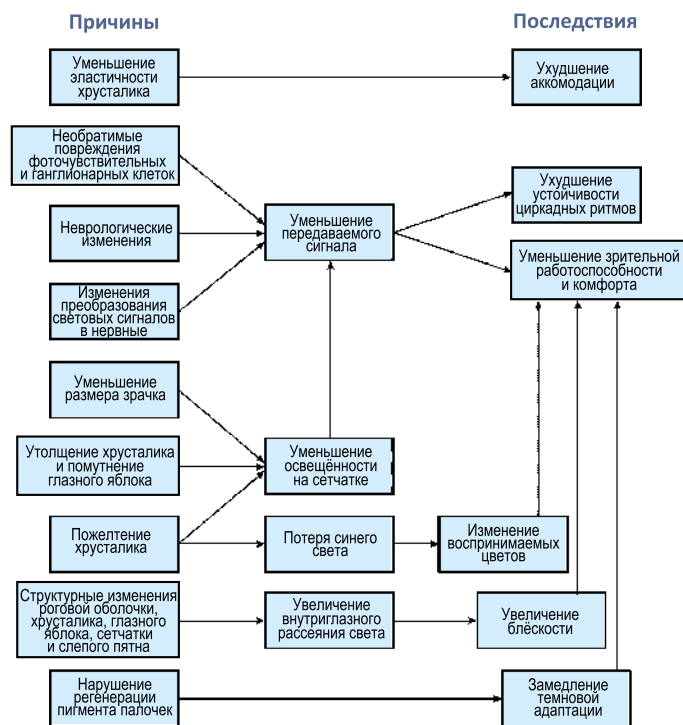


Рис. 12. Причины вредных возрастных изменений глаз и их последствия

приводит также к уменьшению количества синего света, что особенно сильно сказывается на мгновенном и циркадном не визуальном воздействии света. Структурные изменения роговой оболочки, хрусталика, стекловидного тела, сетчатки и слепого пятна приводят к увеличению рассеяния света этими структурами в сторону центральной ямки и, соответственно, к увеличению ослеплённости пожилых людей. С возрастом на восстановление пигмента палочек уходит больше времени, и соответственно, замедляется темновая адаптация.

В табл. 2 для СД с люминофором с КЦТ, равными 2700 и 6500 К ($R_a > 80$), приведены совокупные последствия уменьшения размера зрачка и прозрачности глаза вследствие пожелтения хрусталика при яркостях адаптации от 10 до 100 кд/м².

1.9. Терапевтическое действие

Свет иногда может использоваться для лечения нарушений работы циркадной системы. Светотерапия, то есть осуществляемое по специально подобранному графику воздействие света, является одним из видов хронотерапии. Иногда светотерапия не излечивает саму болезнь, а лишь помогает уменьшить её негативные симптомы.

Зимняя депрессия была первой болезнью, для лечения которой светотерапия успешно применялась уже 35 лет назад [46]. Зимняя депрессия представляет собой один из видов аффективного расстройства (расстройства настроения), при котором психически здоровые люди впадают в сильную депрессию в какое-то время года, в частности, осенью или зимой. Связанные с зимней депрессией проблемы обычно исчезают после двух недель светотерапии с ежедневным воздействием белого света в течение от 2 до 3 часов при освещённости 2500 лк или в течение от 30 до 45 минут при освещённости 10000 лк [47].

Совокупное влияние уменьшения размера зрачка и прозрачности глаза вследствие пожелтения хрусталика на количество света, попадающего на сетчатку глаз пожилых людей, по сравнению с количеством света, попадающим на сетчатку глаз молодых людей, для СД с люминофором с КЦТ от 2700 до 6500 К при яркостях адаптации 10 и 100 кд/м²

Возраст	Прозрачность в случае 2700 К		Прозрачность в случае 6500 К	
	$L_{adapt} = 10$ кд/м ²	$L_{adapt} = 100$ кд/м ²	$L_{adapt} = 10$ кд/м ²	$L_{adapt} = 100$ кд/м ²
50 лет по сравнению с 25 годами	0,84	0,91	0,83	0,90
65 лет по сравнению с 25 годами	0,75	0,86	0,72	0,83
80 лет по сравнению с 25 годами	0,65	0,78	0,63	0,76

В ряде случаев особое внутреннее освещение можно использовать не только для обеспечения выполнения его основной задачи создания подходящих условий для зрительной работы, но и для светотерапии. Примерами может служить использование светотерапии для лечения депрессии (сезонной и несезонной), нарушений сна, в том числе связанных с болезнями Альцгеймера и Паркинсона, синдрома дефицита внимания и гиперактивности и расстройства приёма пищи. У пациентов с психическими расстройствами, особенно у пациентов с болезнью Альцгеймера, часто наблюдается нарушение обычных циркадных ритмов сна и бодрствования. Ночной сон становится фрагментарным, а дневная активность перемежается с дремотой. Эти симптомы часто сопровождаются блужданием в ночное время и агрессивностью в дневное время. Все эти побочные симптомы болезни Альцгеймера часто можно сравнительно успешно лечить при помощи светотерапии, создавая подходящее освещение в комнате пациента [48–50]. Измеренные при помощи счётчика активности (*action watch*) данные об активности пациента с болезнью Альцгеймера, которые приняли участие в классическом исследовании, посвящённом этому вопросу [51], приведены на рис. 13, где по вертикальной оси отложено измеренное количество проявлений активности реального пациента в час, а по горизонтальной оси отложены моменты времени на протяжении пяти последовательных дней. Верхний график, полученный до лечения пациента, демонстрирует типичный для болезни Альцгеймера не-

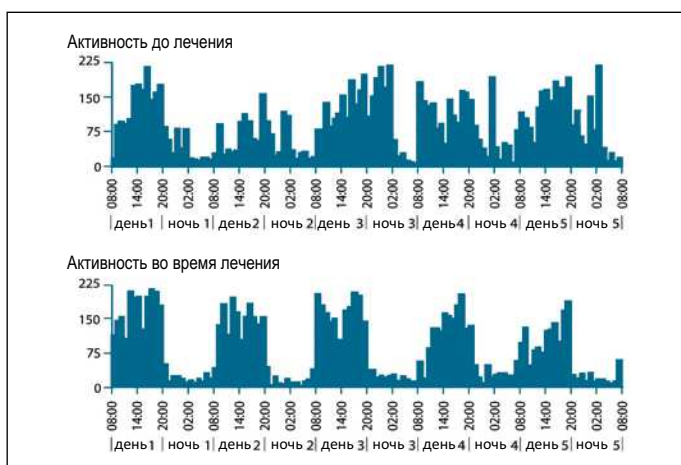


Рис. 13. Количество проявлений активности пациента с болезнью Альцгеймера в час на протяжении пяти последовательных дней до начала (вверху) и по истечении (внизу) 2-х недель ежедневного лечения светом при равной 1140 лк освещённости глаза [51]

порядоченный ритм сна-бодрствования, а на нижнем графике отражена ситуация, имевшая место в конце лечения этого же пациента ежедневным (утром и вечером) воздействием белого света при средней освещённости глаза 1140 лк (4100 К). Изменчивость картины активности пациента существенно уменьшилась, причём наблюдается повышение активности в дневное время и её уменьшение в ночное время.

В палатах больниц часто имеет место неупорядоченный ритм смены света и темноты. Специально подобранное искусственное освещение в дневное время, которое дополняет попадающий в палату естественный свет, может улучшить качество сна и настроение пациента и уменьшить продолжительность его пребывания в больнице.

1.10. Опасное воздействие

1.10.1. Пульсации света ламп

Неблагоприятные визуальные последствия пульсации света ламп делятся на три категории: видимые пульсации (фликер), стробоскопический эффект и эффект фантомного массива (*phantom array effect*).

Видимыми пульсациями света называют раздражающее зрительное ощущение непостоянства освещения, вызванное светом, яркость которого изменяется во времени. Тер-

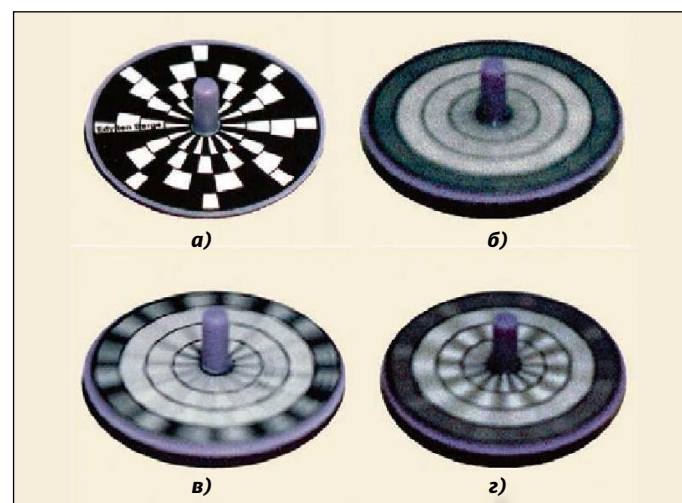


Рис. 14. Волчок, используемый для проверки пульсации света (а); размытые при всех скоростях вращения кольца, что говорит об отсутствии пульсаций (б); неподвижные при некоторых скоростях вращения бело-серые прямоугольники, что говорит о наличии пульсаций (в, г) (дизайн верхней поверхности – *Edy ten Berge*)

мин «видимые пульсации» обычно сокращают до просто «пульсаций». Стробоскопический эффект связан с изменением восприятия движущихся объектов при пульсирующем освещении. Когда неподвижный наблюдатель смотрит на непрерывно движущийся объект, то этот объект обычно воспринимается как движущийся непрерывно и плавно. Однако при определённой пульсации освещения такой объект воспринимается как движущийся рывками, то есть как бы прыжками в ритме стакато. Если стробоскопический эффект связан с движущимися объектами, то эффект фантомного массива может быть обусловлен неподвижными модулированными во времени огнями при перемещении взгляда по этим огням. В дополнение к реальным огням могут появляться ещё и несуществующие фантомные или призрачные огни. Типичная ситуация, при которой может проявить себя эффект фантомного массива, – это движение позади автомобиля, у которого два задних фонаря излучают плохо модулированный свет. При этом лампы выглядят как совокупность гораздо большего, чем два, количества ярких красных огней, выходящих за пределы автомобиля.

Метрикой для описания степени опасности видимых пульсаций (фликера) служит «кратковременная доза фликера» (*short-time flicker severity*) P_{st} . В [52] содержатся описание функциональных и конструктивных требований МЭК к предназначенным для измерения P_s приборам – фликерметрам.

Метрикой для описания стробоскопического эффекта служит «мера стробоскопической видимости» *SVM* (*stroboscopic visibility measure*) [53, 54].

Эффект фантомного массива может проявляться в случае большого контраста между источником света и фоном при непосредственном наблюдении источника света размером меньше чем 2° . Эти ситуации типичны для наружного освещения в ночное время и не встречаются во внутреннем освещении.

Современные яркометры и спектрофотометры позволяют производить измерение пульсаций в осветительных установках, причём некоторые из них могут наглядно отобразить графики зависимости освещения от времени. Разработаны точные приборы для измерения P_{st} и *SVM*. Детский волчок можно с лёгкостью переделать в простое устройство для проверки того, ли пульсирует ли свет конкретной лампы. Для этого на верхнюю поверхность волчка следует нанести небольшие белые прямоугольники,

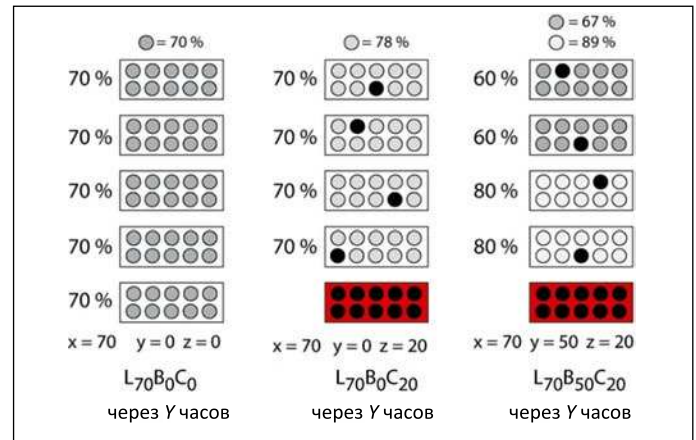


Рис. 15. Примеры соответствующих разным $LxByCz$ состояний СД модуля

расположенные в пределах одного или нескольких колец на чёрном фоне (рис. 14).

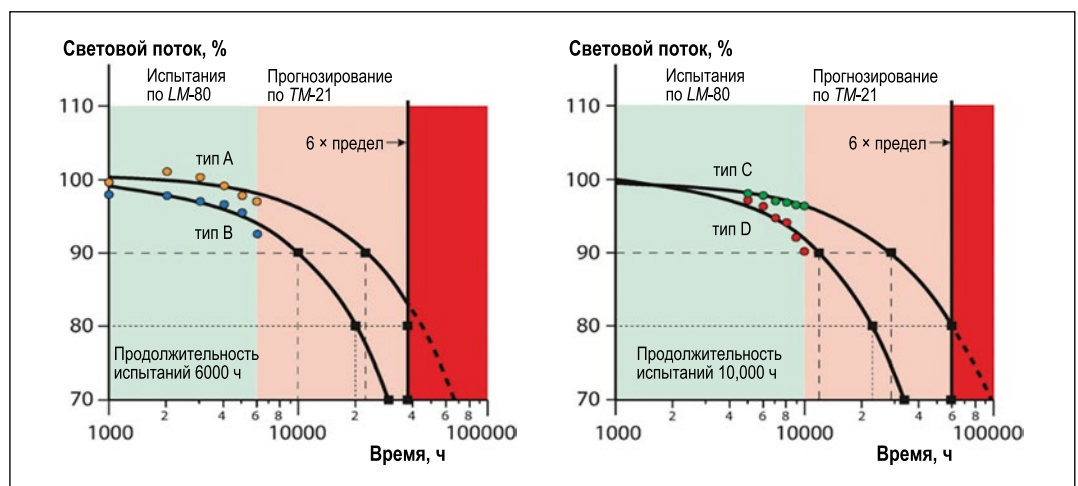
1.10.2. Опасность синего света

Свет, излучаемый в диапазоне длин волн 400–500 нм, оказывает сравнительно сильное фотохимическое воздействие на ткани сетчатки. Этот диапазон соответствует синему свету. Поэтому возможную опасность, связанную с этим видимым диапазоном длин волн, называют «опасностью синего света». МКО ввела для источников света систему групп риска для опасности синего света [55]. Эта система основана на спектре действия (спектре чувствительности) для повреждения сетчатки видимым светом с различными длинами волн. Обзор последних публикаций по этому вопросу показал, что опасность синего света не присуща общему освещению, в котором используются белые источники света, в том числе и белые СД [56–59].

1.10.3. Яркий свет ночью

В ночное время яркий свет способен нарушить циркадные ритмы, что, в свою очередь, может отрицательно сказаться на здоровье, приводя к нарушениям со стороны желудочно-кишечного тракта, сосудисто-сердечным заболеваниям, нарушениям обмена веществ (диабет и ожирение) и, возможно, раку. В рамках этой статьи под ярким светом

Рис. 16. Примеры экстраполированных в соответствии с IES TM-21 графиков сохранения светового потока для СД четырёх разных типов, рассчитанных на основе результатов измерений по IES LM-80; окрашенные кружки соответствуют точкам измерений, а чёрные квадраты соответствуют прогнозируемым срокам службы для L_{90} , L_{80} и L_{70}



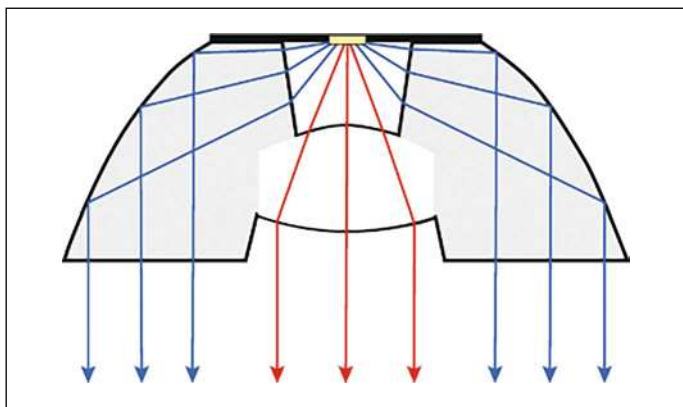


Рис. 17. Вверху: графики КЕО для офиса размером 5,4 x 3,6 м для окна, отмеченного красным цветом на приведённом в [1] рис. 12.7. Внизу: соответствующие проценты времени, в течение которого в июне и декабре горизонтальная освещённость превышает 500 лк (получено на основе результатов измерений естественного света, проведённых в Братиславе [1, рис. 12.3 справа])

понимается не меньший чем 300 лк уровень горизонтальной освещённости. В [1] приведены результаты исследований, проведённых на животных, и эпидемиологических исследований с участием людей, направленных на получение информации о возможной связи между раком и ярким освещением в ночное время.

2. Техника

2.1. Лампы, пускорегулирующие аппараты и устройства управления

Сегодня почти во всех областях применения освещения СД пришли на смену традиционным источникам света, включая газоразрядные лампы. В первую очередь причинами этого являются эффективность и большие сроки службы СД источников света.

В настоящее время качественные СД источники света имеют настолько большие сроки службы (50000 и более часов), что то, насколько долго СД источник света продолжает обеспечивать отвечающее требованиям освещение, определяется не частотой отказа этих источников света. Эксплуатационный срок службы СД источников света определяется параметром «световой поток». Когда световой поток становится настолько малым, что СД источник света нуждается в замене, то это называют параметрическим отказом, хотя при этом СД источник света может продолжать работать намного дольше. МЭК определяет срок службы СД на основе параметрического отказа: «слишком маленький световой поток» [60]. Момент, в который СД источник света полностью перестаёт работать, называют внезапным или катастрофическим отказом. Срок службы СД (в соответствии с критерием «слишком маленький световой поток») определяют как Y часов полезной работы, исходя при этом из условия $Lx B_{50}$, где Y – выраженное в часах время, по истечении которого у 50 % (B_{50}) начального количества СД модулей имеет место параметрический отказ, связанный с невозможностью обеспечить по меньшей мере x процентов от начального светового потока. Если задано только значение Lx (как это обычно и бывает), то B считается равным 50, что означает, что 50 % СД одного и того же типа не обеспечивают

заданный процент x светового потока лампы, т.е. B_{50} . То, какой спад светового потока является важным, зависит от области применения. Важными могут быть значения L_{90} , L_{80} и L_{70} , и указание срока службы без подобной конкретизации Lx не имеет смысла.

Важной особенностью стандарта МЭК является то, что он учитывает вклад отдельных СД, входящих в состоящий из большого количества СД модуль, в постепенное уменьшение светового потока этого модуля. Этот эффект учитывается при определении спада светового потока и, тем самым, в Lx . Внезапные, катастрофические и полные отказы СД модулей обозначаются как Cz , представляющее собой промежуток времени, в течение которого z % первоначального количества СД модулей одного и того же типа оказываются неспособными генерировать какой бы то ни было световой поток. На рис. 15 приведены типичные примеры соответствующих разным $LxB_{50}Cz$ состояниям СД модуля.

Отраслевым стандартом на испытание партии СД на сохранение светового потока является документ Американского светотехнического общества (*IES*) *LM-80* [61, 62]. В *LM-80* регламентируются метод отбора образцов СД, лабораторные условия испытаний, протокол фотометрических измерений и условия работы (электрические и температурные) испытываемых СД. Испытания одной партии должны продолжаться не менее чем 6000 ч со сбором данных как минимум каждые 1000 ч. Однако для улучшения прогнозирования предпочтительными являются 10000 ч (или более). Типовые испытания СД должны проводиться при по меньшей мере двух температурах корпуса СД, которые должны быть указаны производителем на основе рекомендуемых условий эксплуатации. При этом одна из этих двух температур корпуса должна быть равна 55 или 85 °C для обеспечения возможности сравнения результатов испытаний, в том числе и изделий разных производителей.

Испытания, проводимые в соответствии с *LM-80*, не обеспечивают получение значений сроков службы СД испытываемого типа. Полученные в результате данные используются в другом документе *IES – TM-21* [63], который обеспечивает возможность прогнозирования полезного срока службы посредством экстраполяции полученных в соответствии с *LM-80* данных. *TM-21* позволяет прогнозировать сохранение светового потока за время, в шесть раз превышающее длительность испытаний (при размере выборки, не меньшей чем 20 шт.). Более долгосрочные прогнозы нереальны из-за присущих экстраполяции ограничений и отсутствия уверенности в полученных в этих случаях данных. При равной 6000 ч длительности испытаний, предусмотренной *LM-80*, прогнозирование может осуществляться для 36000 ч максимум. При продолжительности испытаний 10000 ч этот период увеличивается до 60000 ч максимум. Для прогнозирования используются точки измерения, соответствующие последним 5000 ч испытаний по *LM-80*. (При большей чем 10000 ч продолжительности испытаний используются данные, соответствующие последним 50 % общей продолжительности испытаний.) Конечно, меньшие, чем 1000 ч, промежутки между измерениями обеспечивают большую точность и поэтому являются предпочтительными. На рис. 16 приведён пример экстраполяции для выборок из 20 СД четырёх разных типов. Два из них испытывали в течение 6000 ч (рис. 16 слева), и два – в течение 10000 ч (рис. 16

Сроки службы приведённых на рис. 16 СД четырёх типов, соответствующие L_{90} , L_{80} и L_{70}

Тип СД	Продолжительность испытаний, ч	Срок службы для L_{90} , ч	Срок службы для L_{80} , ч	Срок службы для L_{70} , ч
A	6000	22000	> 36000	> 36000
B	6000	10000	20000	30000
C	10000	28000	60000	> 60000
D	10000	12000	22000	33000

справа). В табл. 3 для каждого типа СД приведены спрогнозированные значения L_{90} , L_{80} и L_{70} .

2.2. Естественный свет

Свет излучает внешняя оболочка солнца. Благодаря земной атмосфере мы получаем ещё и непрямой солнечный свет, который рассеивается микроскопическими частицами земной атмосферы, что делает небо ярким и синеватым. Естественное освещение зависит от положения солнца, которое, в свою очередь, зависит от дня года и времени суток и от местоположения точки наблюдения на поверхности земли. Погодные условия влияют на состояние неба и тем самым на уровень и спектр естественного освещения.

МКО задала спектры ряда стандартных иллиюминантов, которые соответствуют спектрам естественного света с разными КЦТ [64, 65]. Наиболее известен естественный свет D_{65} с КЦТ, равной 6500 К. КЦТ зависит не только от положения солнца, но и от наличия и положения облаков и направления взгляда наблюдателя. В табл. 4 приведены примеры КЦТ естественного света при разных условиях.

Кроме того, МКО задала несколько стандартных распределений яркости неба, предназначенных для проведения

расчётов [66]. Стандартное пасмурное небо МКО обычно служит для определения коэффициента естественной освещённости (КЕО), позволяющего прогнозировать естественное освещение в зданиях с учётом внешних препятствий, световых проёмов и многократных отражений внутри помещений. Во многих точках земного шара были проведены измерения, позволившие получить количественные данные о наличии естественного света. Совмещая эти зависящие от местоположения данные с КЕО, можно получить подробное представление о том, на протяжении какого времени и в каких точках освещаемого пространства естественное освещение будет достаточным. КЕО определяют как отношение освещённости в точке заданной плоскости внутри здания, обусловленное светом неба с заданным распределением яркости (исключая прямой солнечный свет), к освещённости на горизонтальной плоскости вне здания под полностью открытым небосводом (без препятствий). КЕО зависит от размеров и местоположения световых проёмов здания и от положения самого здания. Обычно в качестве стандартной ситуации используют пасмурное небо МКО и горизонтальную плоскость. Для примера на рис. 17 приведены графики КЕО для типичного офисного помещения для одного или двух человек. КЕО в заданной точке помещения отражает потенциальные возможности здания в части естественного освещения в этой точке при наихудшем состоянии неба, которому соответствует пасмурное небо МКО. Что касается реальной освещённости в этой точке, то она будет зависеть от времени суток, дня года и реального местоположения точки на поверхности земли (положения солнца). Для примера, приведённые в верхней части рис. 17 графики КЕО были преобразованы на основе полученных применительно к Братиславе данных о наличии естественного света в процент времени, в течение которого в июне и декабре горизонтальная освещённость превышает 500 лк (рис. 17 внизу).

2.3. Светильники

Оптическая система светильника может включать в себя зеркала (отражатели), микролинзы (преломлятели) и рассеиватели. С появлением СД появилась и другая возможность обеспечения высокой точности управления генерируемыми лучами, основанная на использовании полного внутреннего отражения. Полное внутреннее отражение имеет место в случае, когда свет распространяется из среды с более высокой оптической плотностью в среду с меньшей оптической плотностью, то есть из среды с большим коэффициентом преломления в среду с мень-

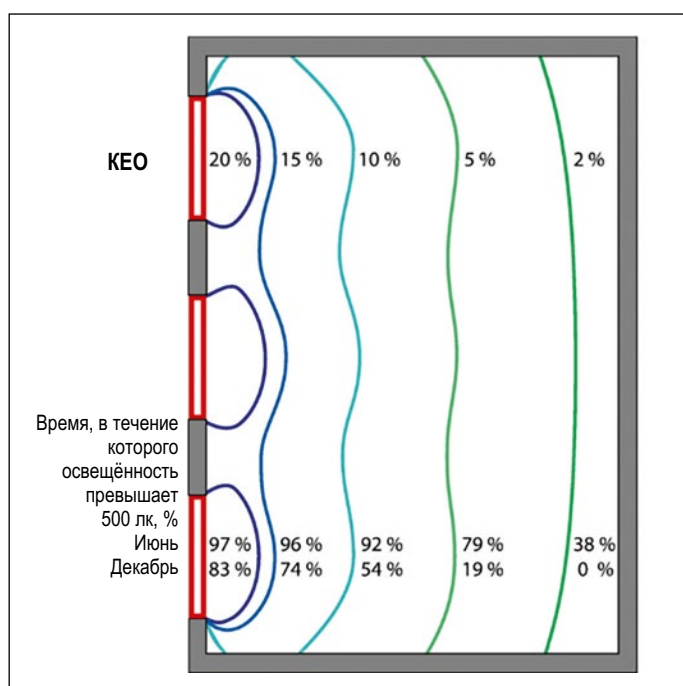


Рис. 18. Отражение и полное внутреннее отражение (при $\theta > \theta_{crit}$)

Примерные значения КИТ естественного света в день летнего солнцестояния при различных условиях

Условия	КИТ, К
Незадолго перед восходом солнца	± 4000
Вскоре после захода солнца	± 4000
Восход и закат	± 2000
Прямой солнечный свет в день летнего солнцестояния (полдень)	5800
Пасмурное небо	5500–6000
В тени при чистом небе (полдень)	9000–30000
Чистое небо (полдень)	9000–30000

шим коэффициентом преломления. Стекло и пластмасса имеют более высокие коэффициенты преломления, чем воздух. Это означает, что на границе между подобной средой и воздухом преломлённый свет отклоняется от нормали к поверхностному слою, как это показано на рис. 18 слева. В средней части рис. 18 показана ситуация, при которой свет падает под таким углом, что угол преломления равен 90° , так что преломлённый свет направлен параллельно границе. Этот угол падения (θ_{crit}), соответствующий равному 90° углу преломления, называют углом полного внутреннего отражения. В зависимости от типа пластмассы или стекла, он меняется в пределах от 30° до 40° . Если угол падения света превышает угол полного внутреннего отражения, то свет не может покинуть среду и отражается почти полностью (почти 100-процентно), как это показано на рис. 18 справа.

Полное внутреннее отражение с его чрезвычайно высоким коэффициентом отражения часто используется в сочетании с СД для получения эффективных и с высокой точностью управляемых лучей в светильниках направленного вниз света типа даунлайт и в небольших прожекторах заливающего света. Очень часто эти оптические устройства с полным внутренним отражением совмещают с коллиматорными линзами. Пример такой гибридной оптической системы приведён на рис. 19. Часть с полным внутренним отражением управляет большей частью света, излучаемого кристаллом СД, тогда как встроенная коллиматорная линза, расположенная в центре системы, управляет светом, излучаемым кристаллом в центральном направлении.

2.4. Объединённое интеллектуальное (умное) освещение

Под объединённым интеллектуальным (умным) освещением (*connected smart lighting*) понимают осветительные установки, в которых используются светильники со встроенными датчиками, объединённые в проводную или беспроводную сеть для обеспечения возможности управления освещением и контроля за ним. Микроконтроллеры и многие датчики, такие как датчики освещённости, присутствия, температуры, влажности и шума, имеют достаточно небольшие размеры, позволяющие встраивать их в светильники. В результате светильник становится источником не только света, но и информации. Объединённые интеллектуальные осветительные установки с подобными светильниками могут использоваться в разных целях,

а не только для экономии энергопотребления. Например, при помощи сбора данных о реальном использовании пространства и перемещениях людей можно организовать автоматизированное управление пространством, удовлетворяя при этом потребителей. Датчики, которые используются в сетях интеллектуального освещения, могут быть дополнены датчиками, измеряющими параметры, знание которых требуется другим установкам здания, такими как датчики температуры, влажности и качества воздуха. При этом сеть интеллектуального освещения становится «сердцем» умного здания.

Интеллектуальные сети могут использовать самые разные протоколы для связи между всеми соединёнными устройствами. Для проводных сетей используются протоколы $0-10\text{ V DC}$, *DALI*, *DMX 512* и *DMX 512-RDM*, а для беспроводных сетей – такие протоколы, как, например, *ZigBee*, *Bluetooth* и *Wi-Fi*. На рис. 20 приведён пример сети *ZigBee*.

Кабели передачи данных в сети *Ethernet* могут одновременно использоваться для передачи данных и для подвода питания к присоединённым электрическим устройствам, включая светильники с СД: питание через *Ethernet (PoE)*. Последний стандарт Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (*IEEE*) 2018-го года повысил мощность подключённых устройств до 90 Вт. Это стало возможным потому, что этот стандарт допускает передачу данных по всем четырём парам проводов *Ethernet*. Так как мощность – это мощность постоянного тока, а передача данных осуществляется высокочастотными сигналами, то не возникает интерференции между передаваемыми по одним и тем же кабелям данными и питанием. Равный 90 Вт предел мощности позволяет подводить питание к светильникам по сети *Ethernet* во многих интеллектуаль-

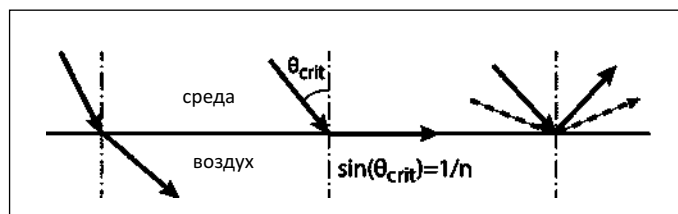


Рис. 19. Примеры предназначенных для СД круглосимметричных линз с полным внутренним отражением. Синие лучи – результат полного внутреннего отражения, красные лучи – результат действия встроенной коллиматорной линзы (обозначенной более светлым тоном)

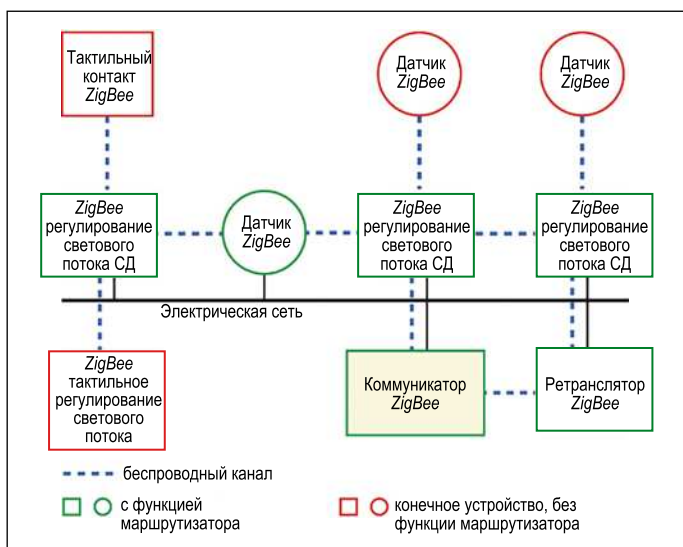


Рис. 20. Беспроводная сеть ZigBee с координатором, устройствами с функцией маршрутизатора в отношении соседних с ними устройств, встроенных в «умные» лампы и датчики, а также оконечные устройства без функции маршрутизатора

ных осветительных установках. Так что это позволяет отказаться от отдельной сети электропитания, что приводит к существенному уменьшению стоимости кабелей и капитальных затрат, делает установку более надёжной и упрощает техническое обслуживание и внесение изменений.

2.5. Свет не для освещения

Свет светильников с СД может одновременно использоваться и для освещения помещения, и для беспроводной передачи данных в пределах этого помещения. Эта развивающаяся разновидность беспроводной передачи данных получила название «передача данных видимым светом – VLC». Для осуществления VLC свет кодируют и модулируют без ухудшения качества освещения. Из всех источников света для передачи данных видимым светом подходят только СД. Причина заключается в том, что при изменении протекающего через СД тока световой поток СД изменяется практически мгновенно. И только поэтому свет можно модулировать с большой скоростью, то есть состояния «свет включён» и «свет выключен» могут быть реализованы с чрезвычайно высокой частотой.

VLC может быть расширена до двунаправленной системы передачи данных с прямыми и обратными каналами связи. Эту систему называют *Li-Fi*. Это очень нужная альтернатива перегруженной беспроводной системы связи *Wi-Fi* или дополнение к ней. Конечно, использование распространяющегося по обратным каналам видимого света будет вызывать неудобство, так как мешающие лучи света будут при этом излучаться всеми подключёнными к *Li-Fi* устройствами, которые находятся в помещении, такими как персональные компьютеры, ноутбуки и смартфоны. Так что если в случае *Li-Fi* в прямых каналах связи используется видимый свет, то в обратных каналах используется или невидимое инфракрасное излучение, или *Wi-Fi* (рис. 21).

Двойные возможности СД позволяют использовать их не только для освещения, но и во многих новых областях применения. В качестве примеров можно привести использо-



Рис. 21. Двунаправленная сеть передачи данных Li-Fi с использованием видимый свет прямым каналом и использующим инфракрасное излучение обратным каналом

вание внутреннего освещения для навигации внутри помещений и для обнаружения находящихся в помещении объектов. Использование света самого по себе позволяет определить контуры объектов и даже позы и движения людей (сидящих, стоящих, лежащих и идущих). Эта информация в свою очередь может использоваться в качестве входных данных для всевозможных автоматических действий.

3. Применение

3.1. Качество освещения и стандарты

Качество установок внутреннего освещения следует оценивать при помощи фотометрических величин, влияющих на зрительную работоспособность, зрительный комфорт и не визуальное биологическое воздействие света. Фотометрические параметры, которые можно использовать для описания, проектирования и измерения качества установок внутреннего освещения, охватывают освещённость и равномерность освещённости, яркости пола и потолка, ограничение блёскости, распознавание трёхмерных объектов и лиц, моделирование, цветовой облик и цветопередачу. Однако пока что не существует никаких международных стандартов и рекомендаций, разработанных авторитетными организациями, занимающимися стандартизацией в области освещения, которые бы нормировали освещение применительно к его не визуальному биологическому воздействию. МКО выпустила стандарт, в котором задана зависимость спектральной чувствительности фоточувствительных ганглионарных клеток сетчатки от меланопической облучённости [37]. В опубликованном в 2019 г. официальном заявлении МКО предлагается учитывать не визуальную реакцию на свет при помощи меланопически эквивалентной естественной (*D65*) освещённости [67]. Этот показатель рекомендуется использовать

Таблица 5

Пять этапов процесса проектирования освещения

Номер этапа	Содержание этапа
1	Анализ стоящих перед освещением задач
2	Определение нужных характеристик качества освещения и их значений
3	Выбор систем освещения и управления
4	Выбор типов ламп и светильников
5	Определение количества и местоположения светильников

в будущем при разработке рекомендаций в части не визуального биологического воздействия света.

3.2. Проектирование

Процесс проектирования освещения изменяется в зависимости от области применения и характера проектировщика. Что касается технических сторон процесса проектирования освещения, то можно выделить пять этапов, общих для большинства областей применения освещения (табл. 5).

При выборе системы освещения следует рассмотреть преимущества как общего освещения, локализованного освещения и их комбинаций, так и преимущества прямого и отражённого освещения и их комбинаций. Для офисов и промышленных предприятий следует также определить сценарии динамического освещения, позволяющего оптимизировать работоспособность, здоровье и самочувствие людей. В случае освещения классных комнат возможно динамическое освещение с автоматическим управлением, предоставляющее учителю переводить освещение в режимы усиления внимания и расслабления. На рис. 22 приведена схема, демонстрирующая влияние большинства благоприятных особенностей освещения на работоспособность и самочувствие учащихся.

Освещение, обеспечивающее надёжное поддержание циркадных ритмов пациентов, может положительно повлиять на выздоровление пациентов, содержащихся в палатах и реанимационных отделениях больниц. Динамическое освещение в домах для престарелых может не только обеспечить поддержание циркадных ритмов, но и оказать терапевтическое воздействие на многих пациентов с болезнью Альцгеймера в части ритма смены сна и бодрствования.

Аварийное освещение следует проектировать таким образом, чтобы обеспечить безопасность пользователей зданий и посетителей при внезапном отключении нормального освещения.

3.3. Расчёты и измерения

Для получения решения, удовлетворяющего предъявляемым требованиям, проектировщик освещения должен произвести светотехнические расчёты. Для этого имеются универсальные компьютерные программы. Основанный на световом потоке метод расчёта уровня освещения на рабочей плоскости представляет собой упрощённый вариант



Рис. 22. Влияние освещения на работоспособность и хорошее самочувствие школьников и студентов [68]

метода расчёта «вручную». Он предоставляет неопытным проектировщикам освещения инструмент для понимания того, как размеры помещения и коэффициенты отражения влияют на среднюю горизонтальную освещённость в помещении при разных распределениях света.

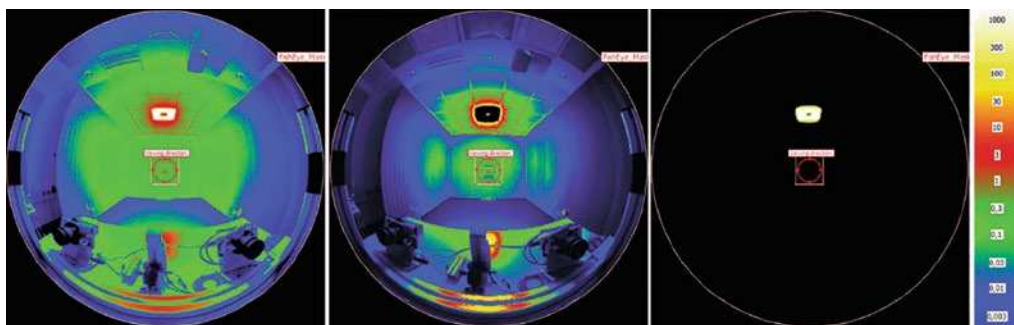
Измерения, осуществляемые применительно к внутреннему освещению, делятся на три категории, связанные в определением характеристик ламп, характеристик светильников и характеристик осветительной установки. Измерения, относящиеся к двум первым категориям, проводятся главным образом в лабораториях. Они связаны с измерениями световых потоков ламп и светильников, распределений силы света и размеров излучающих свет поверхностей светильников и спектральных характеристик ламп.

Полевые измерения проводятся применительно к новым осветительным установкам в целях проверки удовлетворения требований к качеству освещения, а также применительно к давно эксплуатируемым осветительным установкам для выявления необходимости их технического обслуживания, модификации или даже замены. При этом проводятся измерения освещённости, яркости и блёскости. Для сбора информации о том, какие дозы света люди получили при разных условиях, используются регистраторы освещения.

Сегодня при наличии СД самых разных цветов важное значение имеет обеспечение специалистов в области освещения возможностью контроля цветовых характеристик освещения в полевых условиях. К счастью, сейчас имеются сравнительно дешёвые спектрофотометры без движущихся элементов (в отличие от большинства лабораторных приборов). Большинство этих измерительных приборов имеет встроенное программное обеспечение, позволяющее на основе измеренного спектра рассчитать всевозможные цветовые характеристики, такие как координаты цветности x и y , положение на графике цветности, КЦТ и значения R_a , R_f и R_g . Эти характеристики могут демонстрироваться на экране прибора сразу же после проведения измерений вместе с самим измеренным спектром.

Для получения подробной картины распределения яркости освещаемой сцены всё чаще используется метод картографирования яркости, основанный на использовании фотокамер на приборах с зарядовой связью. На пиксельную матрицу из приборов с зарядовой связью проецируется перспективное изображение подлежащей

Рис. 23. Картографирование яркости для измерения UGR. Слева: карта для всего офиса; посередине: карта с источником блёскости, исключённым для определения яркости фона; справа: карта с источником блёскости, изолированным для определения яркости источника блёскости и излучающей свет области. Красные кружки в центре карты обозначают направление наблюдения (фотография: Christoph Schierz)



измерению сцены. Сигнал каждого из пикселей пропорционален яркости соответствующего элемента сцены. В зависимости от местоположения и ориентации прибора по отношению к сцене, перспективное изображение может быть преобразовано при помощи сложного математического программного обеспечения в плоское неперспективное изображение, в котором всем пикселям соответствуют имеющие одинаковые размеры небольшие участки сцены. На основании результатов одного измерения программное обеспечение рассчитывает среднюю яркость и равномерность яркости сцены. Фотокамеры, включающие в себя программное обеспечение для картографирования яркости, называют также фотояркомерами. Иногда требуется провести на месте измерения блёскости. Для этого также можно использовать фотояркомеры. На рис. 23 приведён соответствующий пример в случае офиса с одним светильником.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Bommel, W.J.M. Interior Lighting, fundamentals, technology and application // Switzerland: Springer Nature, 2019.
2. Donners, M.A.H., Vissenberg, M.C.J.M., Geerdinck, L.M., Van Den Broek-Cools, J.H.F., Buddemeijer-Lock, A. A psychophysical model of discomfort glare in both outdoor and indoor applications // Proc. 27th CIE Session, Manchester, 2015. – P. 1602–1611.
3. Sajdar, M., Luo, M.R., Mughal, M.F., Kuai, S., Yang, Y., Fu, L., Zhu, X. A neural response-based model to predict discomfort glare from luminance image // Lighting Res. Technol. – 2018. – Vol. 50. – P. 416–428.
4. Scheir, G.H., Hanselaer, P., Ryckaert, W.R. Pupillary light reflex, receptive field mechanism and correction for retinal position for the assessment of visual discomfort // Lighting Res. Technol. – 2019. – Vol. 51, No. 2. – P. 291–303.
5. Scheir, G.H., Donners, M., Geerdinck, L.M., Vissenberg, M.C.J.M., Hanselaer, P., Ryckaert, W.R. A psychophysical model for visual discomfort based on receptive fields // Lighting Res. Technol. – 2018. – Vol. 50. – P. 205–217.
6. IES TM-30-18: IES method for evaluating light source color rendition // IES, New York, 2018.
7. Smet, K., Ryckaert, W.R., Pointer, M.R., Deconinck, G., Hanselaer, P. Correlation between colour quality metric predictions and visual appreciation of light sources // Opt. Exp. – 2011. – Vol. 19. – P. 8151–8166.
8. Houser, K.W., Wei, M., David, A., Kramer, M.R., Shen, X.S. Review of measures for light-source colour rendition and considerations for a two-measure system for characterizing colour rendition // Opt. Exp. – 2013. – Vol. 2. – P. 10393–10411.
9. Gu, H.T., Luo, M.R., Liu, X.Y. (2017) Testing different colour rendering metrics using colour difference data // Lighting Res. Technol. – 2017. – Vol. 49. – P. 539–560.

10. Teunissen, C., van der Heijden, F.H.F.W., Poort, S.H.M., de Beer, E. (2017). Characterising user preference for white LED light sources with CIE colour rendering index combined with a relative gamut area index // Lighting Res. Technol. – 2017. – Vol. 49. – P. 461–480.
11. CIE224:2017. CIE2017 Colour fidelity index for accurate scientific use // Vienna, 2017.
12. Weston, H.C. The relation between illumination and visual performance // Reprint IHRB Rep. No. 87 (1945) and Joint Rep. (1935). Medical Research Council, HMSO, London, 1953.
13. Weston, H.C. Rationally recommended illuminance levels // Trans. Illum. Eng. Soc. (Lond). – 1961. – Vol. 26, No. 1. – P. 1–16.
14. Muck, E., Bodmann, H.W. Die Bedeutung des Beleuchtungsniveaus bei praktische Sehtätigkeit // Lichttechnik. – 1961. – Vol. 13. – P. 502–507.
15. Rea, M.S. Visual performance with realistic methods of changing contrast // J. Illum. Eng. Soc. – 1981. – Vol. 10, No. 3. – P. 164–177.
16. Rea, M.S. Toward a model of visual performance: foundations and data // J. Illum. Eng. Soc. – 1986. – Vol. 15. – P. 41–57.
17. Eklund, N.H., Boyce, P.R., Simpson, S.N. (2001) Lighting and sustained performance: modelling data-entry task performance // J. Illum. Eng. Soc. – 2001. – Vol. 30. – P. 126–141.
18. CIE145:2002. The correlation of models for vision and visual performance. CIE, Vienna, 2002.
19. Houser, K.W. To use or not to use TM-24 // Leukos. – 2014. – Vol. 10, No. 2. – P. 57–58.
20. Loe, D.L., Mansfield, K.P., Rowlands, E. Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: experimental study // Lighting Res. Technol. – 1994. – Vol. 26, No. 3. – P. 119–133.
21. Kirsch, R.M. Lighting quality and energy efficiency in office spaces // Doctoral thesis, Department of Lighting Technology, Technical University, Berlin, 2014.
22. Oi, N., Mansfield, K.P. Lighting quality: possibility of luminance distribution as its determinant // Proc. CIE28th Session, Manchester, 2015. – P. 1111–1120.
23. Loe, D.L. Light, vision and illumination: the interaction revisited // Light Res. Technol. – 2016. – Vol. 48. – P. 176–189.
24. Cuttle, C. Lighting by design, 2nd edition. Oxford: Architectural Press, 2008.
25. Cuttle, C. Towards the third stage of the lighting profession // Lighting Res. Technol. – 2010. – Vol. 42. – P. 73–93.
26. Cuttle, C. A fresh approach to interior lighting design: the design objective-direct flux procedure // Lighting Res. Technol. – 2018. – Vol. 50. – P. 1142–1163.
27. Mury, A.A., Pont, S.C., Koenderink, J.J. Representing the light field in finite three-dimensional spaces from sparse discrete samples // Applied Opt. – 2009. – Vol. 48. – P. 450–457.
28. Huang, A., Sanderson, A. Light field modelling and interpolation using Kriging techniques // Lighting Res. Technol. – 2014. – Vol. 46. – P. 219–237.
29. Pont, S.C. Spatial and form-giving qualities of light // In: Albertazzi L. (ed) Handbook of experimental phenomenology: visual perception of shape, space and appearance. Chichester: Wiley, 2013.

30. *Kartashova, T., Sekulovski, D., De Ridder, H., Te Pas, S.F., Pont, S.C.* (2016) The global structure of the visual light field and its relation to the physical light field // *J. Vis.* – 2016. – Vol. 16, No. 10. – P. 9 and
31. *Kartashova, T., Te Pas, S., Ridder, H., Pont, S.* Light Shapes: Perception-Based Visualizations of the Global Light Transport // *ACM Transactions on Applied Perception.* – 2019. – Vol. 16. – P. 1–17.
32. *Xia, L., Pont, S.C., Heynderickx, I.* Light diffuseness metric part 1: theory // *Lighting Res. Technol.* – 2017. – Vol. 49. – P. 411–427, and
33. *Xia, L., Pont, S.C., Heynderickx, I.* Light diffuseness metric part 2: describing, measuring and visualising the light flow and diffuseness in three-dimensional spaces // *Lighting Res. Technol.* 2017. – Vol. 49. – P. 428–445.
34. CIE232:2019. Technical report. Discomfort caused by glare from luminaires with non-uniform source luminance, Vienna, 2019.
35. *Kruithof, A.A.* Tubular luminescence lamps for general illumination // *Philips Technical Review.* – 1941. – Vol. 6, No. 3. – P. 65–73.
36. *Berson, D.M., Dunn, F.A., Takao, M.* Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock // *Science.* 2002. – Vol. 295. – P. 1070–1073.
37. CIE International Standard CIE026:2018 CIE system for metrology of optical radiation for ipRGC-influenced responses to light, Vienna, 2018
38. *Eastman, C.I., Boulos, Z., Terman, M., Campbell, S.S., Dijk, D.J., Lewy, A.J.* Light treatment for sleep disorders: consensus report. VI. Shift work // *J. Biol. Rhythm.* – 1995. – Vol. 10, No. 2. – P. 157–164.
39. *Dumont, M., Blais, H., Roy, J., Paquet, J.* Controlled patterns of daytime light exposure improve circadian adjustment in simulated night work // *J. Biol. Rhythm.* – 2009. – Vol. 24, No. 5. – P. 427–437.
40. *James, F.O., Cermakian, N., Boivin, D.B.* Circadian rhythms of melatonin, cortisol and clock gene expression during simulated night shift work // *Sleep.* – 2007. – Vol. 30. – P. 1427–1436.
41. *Folkard, S.* Do permanent night workers show circadian adjustment? A review based on the endogenous melatonin rhythm // *Chronobiol. Int.* – 2008. – Vol. 25. – P. 215–222.
42. *Boudreau, P., Dumont, G.A., Boivin, D.B.* Circadian adaptation to night shift work influences sleep, performance, mood and the autonomic modulation of the heart // *PLoS One* 8: e70813, 2013.
43. *Werner, J.S., Scheffrin, B.E., Bradley, A.* Optics and vision of the aging eye // In: Bass M., Enoch J.M., Lakshminarayanan V. (eds) *Handbook of optics, Vision and vision optics*, Vol III, 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 2010.
44. *Owsley, C.* Aging and vision // *Vis. Res.* – 2011. – Vol. 51. – P. 1610–1622.
45. CIE227:2017. Lighting for older people and people with visual impairment in buildings. Vienna, 2017.
46. *Rosenthal, N.E., Sack, D.A., Gillin, J.C., Lewy, A.J., Goodwin, F.K., Davenport, Y., Mueller, P.S., Newsome, D.A., Wehr, T.A.* Seasonal affective disorder. A description of the syndrome and preliminary findings with light therapy // *Arch. Gen. Psychiatry.* – 1984. – Vol. 41, No. 1. – P. 72–80.
47. *Meesters, Y., Gordijn, M.C.M.* Seasonal affective disorder, winter type: current insights and treatment options // *Psychol. Res. Behav. Manag.* – 2016. – Vol. 9. – P. 317–327.
48. *Van Someren, E.J.W., Riemersma-Van Der Lek, R.F.* Live to the rhythm, slave to the rhythm // *Sleep Medicine Reviews.* – 2007. – Vol. 11, No. 6. – P. 465–484.
49. *Hanford, N., Figueiro, M.* Light therapy and Alzheimer's disease and related dementia: past, present, and future // *Journal of Alzheimer's disease.* – 2012. – Vol. 33, No. 9. – P. 913–922.
50. *Figueiro, M.G., Kalsher, M., Plitnick, B., Rohan, C., Rea, M.S.* Mood and agitation // *SLEEP.* 2018. No. 41, pp.A113-A114.
51. *Van Someren, E.J.W., Kessler, A., Mirmiran, M., Swaab, D.F.* Indirect bright light improves circadian rest-activity rhythm disturbances in demented patients // *Biol. Psychiatry.* – 1997. – Vol. 41. – P. 955–963.
52. IEC61000–4–15:2010 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4–15: Testing and measurement techniques – flickermeter – functional and design specifications.
53. *Perz, M., Vogels, I.M.L.C., Sekulovski, D., Wang, L., Tu, Y., Heynderickx, I.E.J.* Modelling the visibility of the stroboscopic effect occurring in temporally modulated light systems // *Lighting Res. Technol.* – 2015. – Vol. 47. – P. 281–300.
54. *Wang, L., Tu, Y., Lu, L., Perz, M., Vogels, I.M.L.C., Heynderickx, I.E.J.* 50.2: Invited paper: stroboscopic effect of LED lighting. // *SID Symp. Digest Tech. Paper No.46*, 2015. – P. 754–757.
55. CIE Standard S009:2002. Photobiological safety of lamps and lamp systems. Vienna, 2002.
56. *Behar-Cohen, F., Martinsons, C., Viénot, F., Zissis, G., Barlier-Salsi, A., Cesarini, J.P., Enouf, O., Garcia, M., Picaud, S., Attia, D.* Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye? // *Progress in Retinal and Eye Research.* – 2011. – Vol. 30. – P. 239–257.
57. SCENIHR, 2012. Health effects of artificial light. European Commission, Brussels.
58. *Bullough, J.D., Bierman, A., Rea, M.S.* Evaluating the blue-light hazard from solid-state lighting // *Int. J Occup Saf Ergon.* – 2019. – Vol. 25, No. 2. – P. 311–320. (Oct 6:1–10 Epub ahead of print).
59. CIE position statement on blue light hazard. Vienna, 2019.
60. IEC62717, edition 1.1: 2015, LED modules for general lighting – performance requirements.
61. LM-80–08 Approved method: measuring lumen maintenance of LED light sources. IES, 2008.
62. Addendum B for TM-21–11 Projecting long term lumen maintenance of LED light sources. IES, 2015.
63. TM-21–11 Projecting long term lumen maintenance of LED light sources.
64. Technical Report CIE051.2–1999. A method of assessing the quality of daylight simulators for colorimetry.
65. ISO 11664–2:2007/CIE14–2/E: 2006 Colorimetry – part2: CIE standard illuminants for colorimetry.
66. Technical Report CIE215:2014 CIE standard general sky guide.
67. CIE position statement on non-visual effects of light: Recommending proper light at the proper time, 2nd edition. Vienna, 2019.
68. *Mott, M.S., Robinson, D.H., Walden, A., Burnette, J., Rutherford, A.S.* Illuminating the effects of dynamic lighting on student learning // *SAGE Open.* – 2012. – April-June 2012. – P. 1–9.



Вуот Ван Боммель (Wout van Bommel), М. Sc., профессор. Имеет 50-летний опыт работы в области светотехники. На протяжении 35 лет работал на разных должностях в компании Philips Lighting, проводя исследования во многих областях светотехники. Результаты ряда его исследований легли в основу концепций, применяемых в настоящее время в международных стандартах в области освещения. В 2003–2007 гг. был президентом МКО. Был

председателем, а сейчас является почётным членом правления голландского «Фонда исследований в области освещения и здоровья». В 2019 г. стал первым лауреатом премии голландского светотехнического общества, названной в его честь «Премией Вуота ван Боммеля». В 2004 г. был назначен профессором-консультантом Университета Фудан, Шанхай. В настоящее время выступает в качестве независимого консультанта по светотехнике для проектировщиков освещения, исследователей, компаний, муниципалитетов и правительственных учреждений

О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера. Часть II. Экспериментальные лабораторные исследования

В.В. ВОРОНОВ, Н.И. ЩЕПЕТКОВ

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

Аннотация

Статья является продолжением (часть II) одноимённой статьи [1] и изложением содержания главы 3 диссертации В.В. Воронова [2]. Описываются проведение и результаты экспериментов методами плоскостного графического и объёмного макетного светомоделирования в специально созданной установке (камере) моделирования архитектурного освещения (в МАРХИ в 1970–85 гг.).

Ключевые слова: экспериментальная установка светомоделирования, архитектурное освещение, лабораторные исследования, яркость, насыщенность интерьера светом.

Лабораторные экспериментальные исследования по освещению производственных интерьеров с тремя типами фонарей верхнего естественного света были вызваны необходимостью проверки результатов аналитических и натурных исследований, а также поиска критериев и методов оценки качества световой среды интерьеров при сопоставимых условиях естественного и искусственного освещения, внутренней отделки и заполненности оборудованием. Эти исследования включали две серии экспериментов и были направлены на:

- уточнение полученных в натурных условиях данных инструментально-фотометрической и аналитико-статистической качественной оценки освещения интерьеров;
- разработку критериев качественной оценки распределения яркости в пространстве интерьера;
- нахождение архитектурного способа транспозиции яркостных соотношений с перспективного графического изображения интерьера в натуру;
- определение наиболее предпочтительных коэффициентов отражения ρ «отделки» элементов конструкций и технологического оборудования в цехах при заданных ρ фоновых потолка, стен и пола для обеспечения зрительного комфорта и архитектурной выразительности интерьера.

В первой серии эксперименты проводились методом плоскостного графического светомоделирования, а во второй – объёмного светомоделирования на сборно-разборных макетах интерьеров в специально разработанной и осуществлённой для этих целей установке (камере) светомоделирования (рис. 1) [3].

В экспериментах первой серии участвовал 81 эксперт (студенты старших курсов и преподаватели МАРХИ). Каждый получал на листе ватмана линейные перспективы исследуемых интерьеров, на которых, по заданию экспериментатора, он растушёвкой карандашом (рисовать умели все) изображал прогнозируемое распределение яркости по трём типам интерьерного «открытого» пространства (глубинное, замкнутое, сквозное) при естественном

и искусственном освещении. В общем было выполнено 486 рисунков в виде вариантов яркостных (по сути, светлотных) композиций, послуживших материалом для статистической обработки и анализа – с помощью «шкалы светлот» с известными ρ – яркостных (светлотных) соотношений трёх зон, а точнее, потолка ($L_{В3}$) и стен ($L_{С3}$) относительно пола ($L_{Н3}$).

В результате для каждого исследуемого интерьера и типа «открытого» пространства (как наиболее предпочтительного по результатам предшествовавших исследований) были определены диапазоны соотношений $L_{В3}$; $L_{С3}$; $L_{Н3}$ – общие для естественного и искусственного освещения. Средние значения этих диапазонов были приняты к светомоделированию на макетах (рис. 2).

Любые графические изображения обладают неискоренимым недостатком, отличающим их от вида реальных

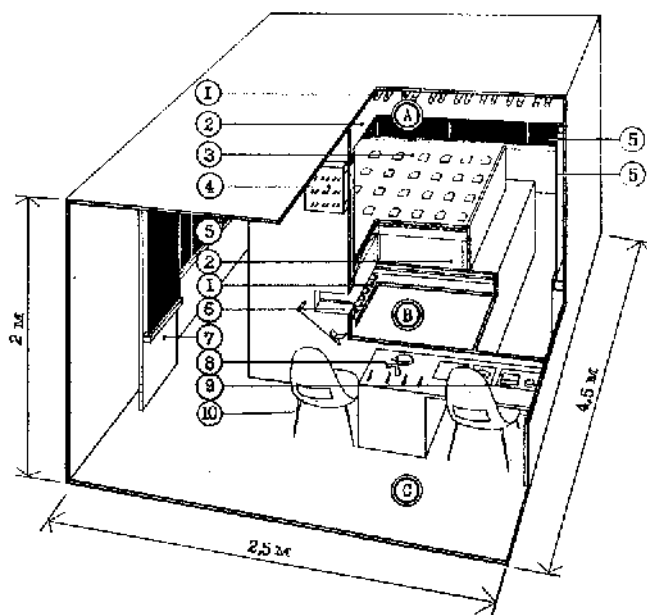


Рис. 1. Экспериментальная установка (камера) для моделирования архитектурного освещения интерьеров с верхним светом:

А – искусственное небо зеркального типа; В – система транспарантной подсветки и имитации общего искусственного освещения; С – камера адаптации (для наблюдателя);

- 1 – люминесцентные лампы с исправленной цветностью, 30 и 40 Вт;
- 2 – матированное оргстекло;
- 3 – макет интерьера с фонарями верхнего света;
- 4 – пульт управления искусственным небосводом;
- 5 – зеркала;
- 6 – отверстие для наблюдений интерьера макета;
- 7 – вход в зеркальную камеру;
- 8 – пульт управления системой имитации общего искусственного освещения;
- 9 – измерительная аппаратура;
- 10 – место наблюдателя

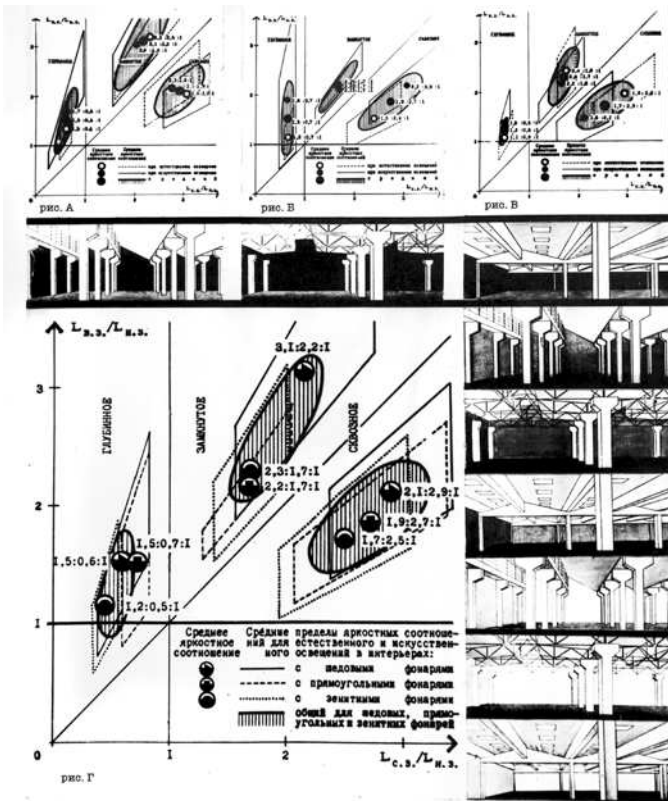


Рис. 2. Результаты плоскостного графического светомоделирования в интерьерах с фонарями трёх типов при естественном и искусственном освещении

интерьеров – диапазон изображаемых на рисунках яркостей и даже яркостных контрастов несравнимо меньше, чем в натуре, поскольку ограничен возможностями отражения в пределах по ρ от 0,8 (белая бумага) до 0,05 (чёрная матовая краска). Поэтому нельзя достоверно передавать существующую яркость участков неба, видимого в светопроеме, и контраст его, например, с переплётками или примыкающими к фонарю участками потолка (в окнах – неба и внешней стены).

Чтобы нейтрализовать этот недостаток, метод графического светомоделирования был усложнён: дополнительно на перспективах интерьеров с шедовыми фонарями проводились статистические эксперименты (17 человек) с использованием транспарантного подсвета вырезанных на рисунках световых проёмов, с целью определять влияние их яркости на принятые к светомоделированию соотношения $L_{вз}:L_{сз}:L_{нз}$. Эти рисунки испытуемых в камере светомоделирования накладывались на систему управляемого подсвечивания в виде плоскости из матированного стекла, яркость которого могла экспериментатором регулироваться с помощью расположенных под стеклом люминесцентных ламп. При разных уровнях яркости световых проёмов $L_{сп}$ и постоянной освещённости на перспективном изображении ($E_r = 400$ лк) и яркости фона 64 кд/м² наблюдателя просили внести в его рисунок карандашной растушёвкой изменения, если они, по его мнению, требовались по зрительному впечатлению с целью гармонизации яркостной композиции интерьера.

Результаты экспериментов показали, что соотношение $L_{вз}:L_{сз}:L_{нз}$ осталось относительно константным при изменении $L_{сп}:L_{пт}$ в пределах 1,1–33,7. При дальнейшем по-

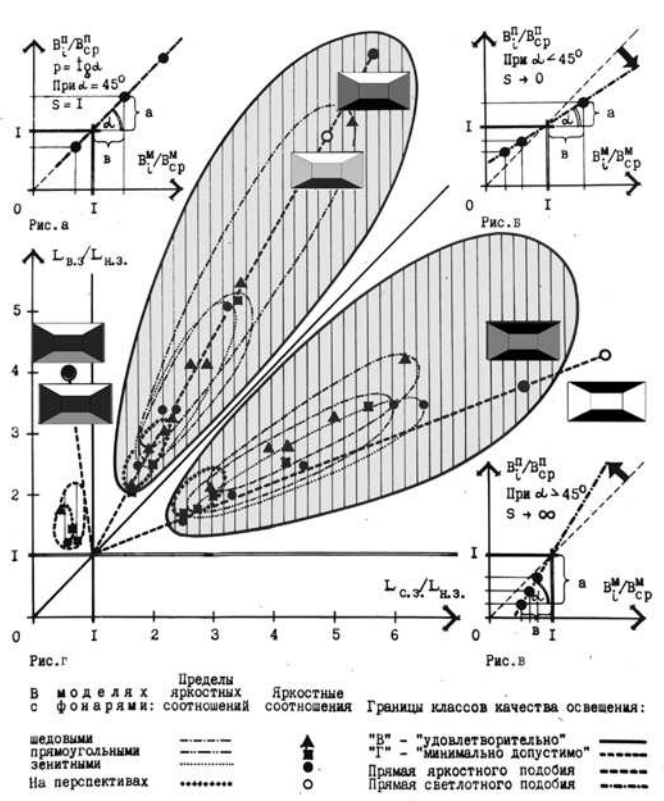


Рис. 3. Диапазоны яркостных соотношений при графическом и объёмном моделировании освещения в интерьерах

вышении $L_{сп}$ эксперты отмечали возникновение зрительного дискомфорта (слепящее действие светового проёма) и связанное с ним ощущение пониженной насыщенности светом изображённого на перспективе интерьера, что хорошо согласовывалось с известными данными [4].

Во второй серии экспериментов определялись яркостные соотношения на макетах исследуемых интерьеров с фонарями трёх типов, подобные или близкие по зрительному ощущению изображённым на предъявленных перспективах.

Наблюдателей-экспертов (92 чел.) приглашали в камеру светомоделирования, где они при заданных уровнях естественного ($E_{г0} 4\%$) и искусственного ($E_r = 400$ лк на полу) освещения подбирали такую яркость стен, при которой ощущали зрительное подобие между яркостными соотношениями (светлотными контрастами) в макете исследуемого интерьера и на изображённой ими перспективе. Яркости стен и пола в макетах изменялись за счёт по-разному пропускающих и отражающих свет сменных масок-экранов.

Для исследуемых интерьеров ρ потолка был постоянным и равным 0,7, а ρ пола и стен изменялись от 0,1 до 0,5 и от 0,1 до 0,7 соответственно.

Результаты опытов показали, что подобные по зрительному ощущению (светлоте) соотношения $L_{вз}:L_{сз}:L_{нз}$ аппроксимируются в системе прямоугольных координат прямой, проходящей через точку с координатами в линейном масштабе, равными единице (соотношения светлот этих поверхностей на макете и на перспективе также аппроксимируются аналогичной прямой, но с другим углом наклона к оси абсцисс). Выявленная закономерность, названная яркостным подобием, имеет важное значение, т.к. позво-

Требования к качеству освещения производственных интерьеров	Характеристика зрительной работы по СНиП П-4-79	Разряд зрительной работы по СНиП П-4-79	Класс качества освещения по распределению яркости	Показатель светонасыщенности N	Контрастность освещения		Примеры интерьеров
					$E_V/E_{2\pi}$	$E_V/E_{\text{ц}}$	
Повышенные	Наивысшей и очень высокой точности	I-II	«А» «Отлично» «Б» «Хорошо»	Более 2,5	Менее 1,4	Менее 2,2	Цехи заводов электронной, радиоэлектронной и приборостроительной промышленности
Нормальные	Высокой и средней точности	III-IV	«Б» «Хорошо»	2,5-1,5	1,4-1,7	2,2-2,5	Цехи текстильной, лёгкой, инструментальной и металлообрабатывающей промышленности
Пониженные	Малой точности и грубая	V-VI	«В» «Удовлетворительно»	Менее 1,5	Более 1,7	Более 2,5	Цехи заводов стройиндустрии, металлургических предприятий, склады и т.п.

ляет архитектуру, минуя стадию трудоёмкого расчёта светлот (по номограмме Н.М. Гусева – П.И. Хорошилова [5]), более просто, графическим способом, определять требуемые (в идеале – гармоничные) соотношения яркостей для натуры (для последующего светотехнического расчёта), зрительно подобные изображённым в проекте. В любом случае, распределение яркостей и их соотношения в зрительных кадрах интерьера дают представление о классе качества освещения – от «отличного» («А») до «неудов-

летворительного» («Г»), что и отражает номограмма по результатам светомоделирования двумя способами (рис. 3). Она неплохо согласуется с номограммой-«бабочкой» по итогам натурных исследований [1, рис. 9].

Серия экспериментов на макетах была дополнена экспериментами по выяснению роли конструктивных элементов и оборудования в общей яркостной композиции производственного интерьера. Статистически определены как оптимальные для этих элементов значения ρ : 0,5–0,7.

На основе проведённых экспериментов был построен график качественной оценки распределения яркости в интерьере по её диапазону, гармоничности и частоте, позволяющий учитывать не только уровни яркостей, но и соответствующие им относительные площади в зрительном кадре интерьера. В серии экспериментов 36 экспертов МАРХИ из семи наборов квадратов (4×4см) по 49 шт. в каждом составляли три яркостных композиции: произвольную, зонную и интерьерную размером 28×28 см. Гармоничность и диапазон яркостей квадратов в наборах определялись равноинтервальным по светлоте рядом с диапазоном $\rho = 0,05-0,11-0,20-0,31-0,45-0,61-0,80$. Этот эксперимент лёг в основу авторского метода ручного изображения на снимке интерьера зонального распределения яркостей и определения их усреднённых ρ в пределах каждого квадратика («пикселя») по шкале светлот, а затем вычисления общей площади каждого равнояркостного пятна (рис. 4). Интересно, что такой графический способ светлотно-геометрической формализации реального изображения много позже стал использоваться на телевидении для зашифровки до неузнаваемости лиц показываемых подследственных лиц.

В следующей серии экспериментов производились количественная и качественная статистические оценки светонасыщенности исследуемых интерьеров на их макетах в экспериментальной камере при искусственном и «естественном» освещении. В первом случае оценка сначала осуществлялась при плавном изменении E_V с 20 до 1200 лк, а светонасыщенность определялась «методом установки»: больше – равна – меньше. Для каждой описательной оценки (ощущения) наблюдатель десятикрат-

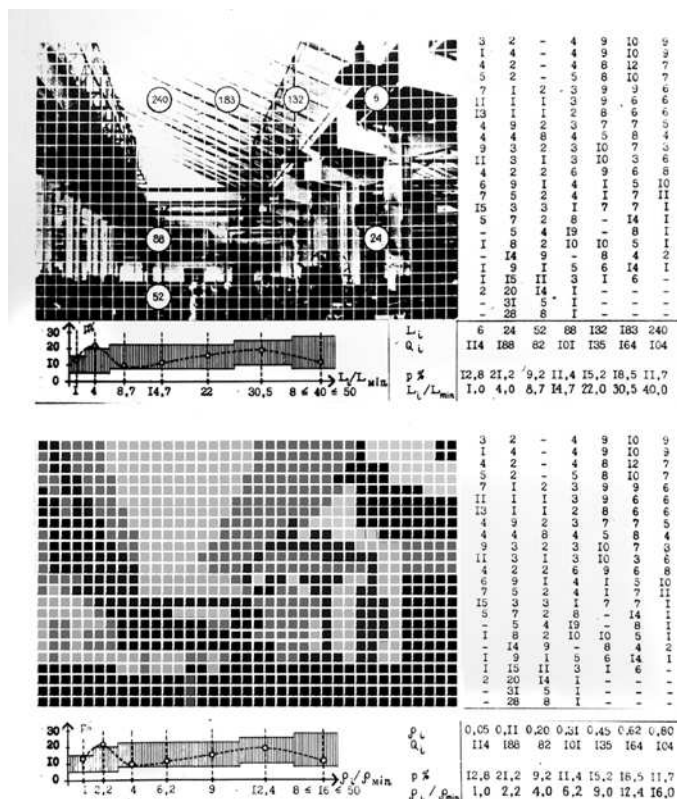


Рис. 4. Оценка качества освещения по диапазону, гармоничности и частоте распределения яркости в пределах зрительного кадра интерьера с шедовыми фонарями при естественном свете

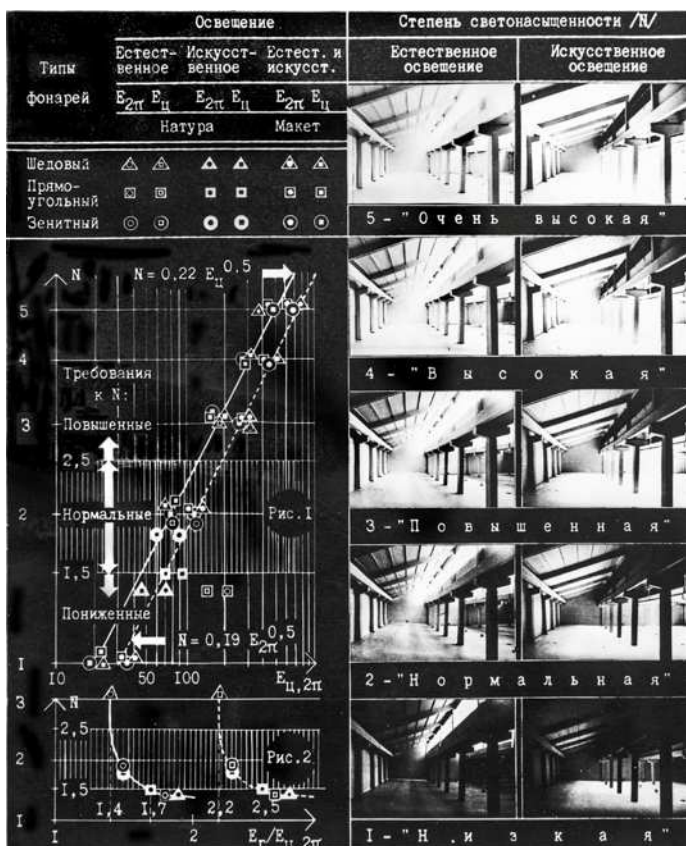


Рис. 5. Результаты экспериментов по оценке степени светонасыщенности интерьера с шедовыми фонарями

но устанавливал соответствующий ей уровень освещённости (стимул). Во втором случае описательная оценка проводилась сравнением её с аналогичным ощущением светонасыщенности при искусственном свете. При установленном некотором уровне «естественного» освещения в макете интерьера, соответствующем определённой степени его светонасыщенности при искусственном освещении, наблюдатель запоминал её, выключал искусственное небо камеры и затем сразу поочерёдно 10 раз воспроизводил аналогичную по зрительному ощущению светонасыщенность при искусственном освещении. Обработанные результаты 23 экспертов (2300 оценок) показали, что стимулы при «естественном» освещении укладывались в доверительные интервалы стимулов при искусственном освещении для одинаковых зрительных ощущений с разницей до 10 %.

Субъективная оценка светонасыщенности проводилась по шкале, принятой в натурных исследованиях [1] при объективных оценках $E_{г}$, $E_{2л}$ и $E_{ц}$ (рис. 5).

В результате этой серии экспериментов была получена графическая зависимость между стимулом E и ощущением N , которая аппроксимируется в прямоугольной системе координат в логарифмическом масштабе прямой линией, соответствующая уравнению $N = a \cdot E^{0,5}$, где N – показатель светонасыщенности, баллы; a – коэффициент принятого критерия освещённости (0,16 для $E_{г}$; 0,19 для $E_{2л}$ и 0,22 для $E_{ц}$); E – принятая к расчёту освещённость ($E_{г}$, $E_{2л}$, $E_{ц}$), лк.

При этом контрастности освещения $E_{г}/E_{2л}$ и $E_{г}/E_{ц}$ в интерьерах не превышали, соответственно, 1,4 и 2,2.

Необходимые достоверность и практическая надёжность результатов объективно-субъективной оценки ка-

чества освещения исследуемых интерьеров по распределению яркости и светонасыщенности, полученные в натурных и лабораторных условиях, позволили на основе классификационных параметров по главе СНиП II-4-79 «Естественное и искусственное освещение» разработать требования и рекомендации по качественной оценке световой среды производственных интерьеров с верхним светом при естественном и искусственном освещении, развивающие и дополняющие нормы в части эстетики освещения (таблица) /см. окончание (часть III) статьи в следующем номере журнала/.

P.S. от соавтора: поскольку приведённые убедительные результаты объёмных комплексных исследований, которые вряд ли кто-то где-то повторит, В.В. Воронов (в отличие, например, от Т.Н. Сидоровой и М.М. Епанешникова), к сожалению, не довёл до сведения научного сообщества и, в первую очередь, до НИИ и учреждений, выпускающих и периодически пересматривающих соответствующие нормы (НИИСФ, ВНИСИ и др.), они и не нашли нормативного и практического воплощения. Но они никак не устарели. Наоборот, стали ещё актуальней. Поэтому вышеуказанным организациям и молодым учёным в этой области следует ими воспользоваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Воронов В.В., Щепетков Н.И. О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера. Часть I. Теоретические основы и результаты натурных исследований // Светотехника. – 2020. – № 1. – С. 60–65.
2. Воронов В.В. Метод проектирования архитектурного освещения производственного интерьера / Автореф. дисс. ... к-та архитектуры. – М.: МАРХИ, 1985.
3. Воронов В.В. Экспериментальная установка архитектурного моделирования световой среды в интерьерах // Известия вузов (Строительство и архитектура). – 1975. – № 3. – С. 58–63.
4. Гусев Н.М., Киреев Н.Н. Освещение промышленных зданий. – М.: Стройиздат, 1968.
5. Гусев Н.М., Макаревич В.Г. Световая архитектура. – М.: Стройиздат, 1973.



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»

Аналитическое представление взаимосвязи угловой высоты Солнца и местного времени при расчётах естественных облучённости и освещённости на земной поверхности

А. В. ЛЕОНИДОВ

Москва

E-mail: avleonidoff@mail.ru

Аннотация

Получено аналитическое выражение, описывающее взаимосвязь угловой высоты Солнца с местным временем в произвольной точке земной поверхности в произвольные сутки года. Полученное выражение и следствия из него позволяют вести расчёты естественных облучённости и освещённости на земной поверхности в аналитической форме.

Ключевые слова: естественные освещённость и облучённость, земная поверхность, геоцентрическая экваториальная система координат, аналитическая форма представления, угловая высота Солнца, местное время, географические координаты, сутки года.

Введение

Естественные освещение и облучение земной поверхности (ЗП) оказывают определяющее влияние на характеристики установившихся и неустойчивых зрительных процессов и зрительной работоспособности [1, 2]. Облучённость от Солнца на ЗП управляет циркадианной активностью организма человека.

При исследованиях указанных процессов весьма часто возникает необходимость использования взаимосвязи суточных значений угловой высоты Солнца над горизонтом h с местным временем в расчётной точке ЗП $t_{\text{местн}}$ с произвольными значениями географической широты ЗП φ в произвольные n -е сутки года.

Единственный источник, наиболее полно представляющий эти данные, – уникальное издание [3], содержащее в табличной форме сведения о зависимости h от времени суток с шагом дискретизации $\Delta t = 1$ ч для разных суток произвольного года с шагом дискретизации $\Delta n = 10$ сут и значений $\varphi = 35\text{--}70^\circ$ с шагом дискретизации $\Delta\varphi = 5^\circ$. Табличное представление данных при проведении светотехнических расчётов вызывает необходимость выполнения операций интерполяции внутри и экстраполяции вне использованных в [3] интервалов дискретизации соответственно. Кроме того, табличное представление данных не позволяет вести светотехнические расчёты в аналитической форме, что затрудняет возможности использования полученных результатов и их содержательную интерпретацию.

Практическая недоступность издания [3]¹ и общая тенденция к математической формализации результатов светотехнических исследований определили основную цель статьи, состоящую в аналитическом представлении дан-

ных о взаимосвязи h и $t_{\text{местн}}$ в произвольной точке ЗП, необходимой для расчётов в ней естественных облучённости и освещённости.

Ещё одной целью работы, связанной с активным освоением приполярных и полярных зон, явилось расширение диапазона значений φ от экватора до северного и южного полюсов Земли.

Используемые данные и методы

Суточные и годовые изменения характеристик освещения и облучения ЗП обусловлены множеством пространственных движений Земли, из которых наиболее значимы суточное вращение Земли вокруг своей оси и её перемещение при орбитальном движении вокруг Солнца, характеризующее малым (0,0167) эксцентриситетом земной орбиты (т.е. орбита Земли практически круговая) [4]. Исключение из рассмотрения менее значимых движений (прецессия и нутация земной оси и др.) не вносят сколько-нибудь заметных ошибок в результаты светотехнических расчётов.

Для получения аналитического выражения, связывающего в светлый период суток h с географическими координатами расчётной точки ЗП и $t_{\text{местн}}$ для центрального меридиана $\zeta_{\text{центр}}$ соответствующей ему временной зоны N , использовалась сферическая модель Земли и геоцентрическая экваториальная система координат 2-го типа [5–7] (рис. 1).

Эта система представляет собой проекцию на условную небесную сферу географических координат ЗП. Плоскость, перпендикулярная главной оси и проходящая через центр Земли, является главной плоскостью – плоскостью небесного экватора, делящей небесную сферу на северное и юж-

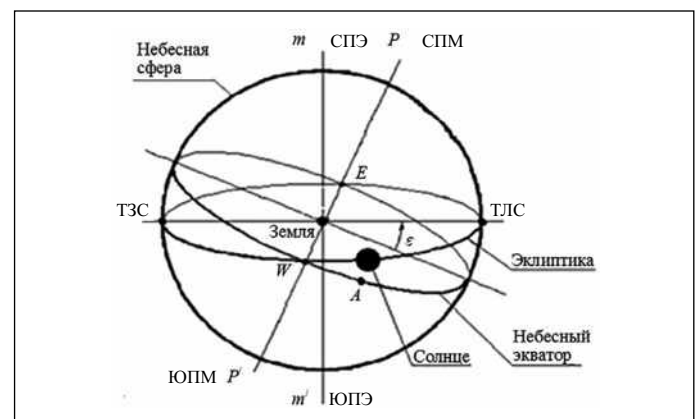


Рис. 1. Геоцентрическая экваториальная система координат 2-го типа [5–7]. СПЭ – северный полюс эклиптики, ЮПЭ – южный полюс эклиптики, СПМ – северный полюс мира, ЮПМ – южный полюс мира, ТЛС – точка летнего солнцестояния, ТЗС – точка зимнего солнцестояния

¹ Правообладателем труда [3], представляющего библиографическую редкость, является Калифорнийский университет (США), что вызывает сомнения в возможности его переиздания в России.

ное небесные полушария и являющейся проекцией земного экватора на небесную сферу. Полноса мира P и P' лежат в плоскости небесного меридиана. Ось P, P' представляет собой главную ось (ось мира), совпадающую с осью вращения Земли. Небесный меридиан представляет собой проекцию на небесную сферу плоскости земного меридиана в расчётной точке ЗП.

Видимое годичное перемещение центра Солнца происходит по эклиптике. Точки m и m' являются северным и южным полюсами эклиптики. Угол ε между плоскостью эклиптики и плоскостью небесного экватора составляет $23,45^\circ$ [4]. Эклиптика и небесный экватор пересекаются в двух точках: в точке запада W (точка весеннего равноденствия) и в точке востока E (точка осеннего равноденствия). В произвольные сутки года точка, соответствующая текущему расположению центра Солнца, лежит в плоскости небесного меридиана, проходящего через ось мира P, P' .

Большой круг небесной сферы (круг склонений), представляет собой небесный меридиан, проходящий через центр Солнца и ось мира P, P' и пересекающий небесный экватор в точке A . Угловое расстояние между кругом склонения и точкой весеннего равноденствия W , определяемое вдоль небесного экватора, является прямым восхождением Солнца, измеряемым в единицах времени, а угловое расстояние между центром Солнца и точкой A на небесном экваторе в круге склонения – склонением Солнца (склонение Солнца положительно к северу от небесного экватора и отрицательно к югу).

Поскольку светотехнические расчёты относятся к поверхности Земли, далее используется время с продолжительностью суток 24 ч [4], а за начало отсчёта времени суток принят момент нижней кульминации Солнца в точке весеннего равноденствия, соответствующий 00 ч 00 мин местного времени выбранной временной зоны. Момент нижней кульминации Солнца в точке весеннего равноденствия принят также в качестве точки, соответствующей началу отсчёта номера суток года.

Для определения зависимости h от $t_{\text{местн}}$ удобно использовать проекцию круга склонения Солнца на ЗП, показанную на рис. 2.

Значения h (без учёта рефракции солнечного излучения) отсчитываются в круге склонения Солнца, соответствующем конкретному числу полных суток, истёкших с момента начала отсчёта времени n , текущему $t_{\text{местн}}$ и географическим координатам расчётной точки ЗП.

Для северного полушария Земли, согласно [5–7],

$$h = 90^\circ - \varphi + \varepsilon, \quad (1)$$

а для южного –

$$h = 90^\circ + \varphi - \varepsilon, \quad (2)$$

где ε – угол между плоскостью небесного экватора, совпадающего с плоскостью земного экватора, и плоскостью эклиптики.

Полученные результаты

Малое значение эксцентриситета земной орбиты, обеспечивающее практически постоянную угловую скорость движения Земли относительно Солнца, и изложенные выше допущения, а также выражения (1) и (2) позволяют представить искомую зависимость h от $t_{\text{местн}}$ в геоцентри-

ческой экваториальной системе координат в виде суммы или разности двух периодических слагаемых, соответствующих годичному орбитальному движению Земли вокруг Солнца и суточному вращению Земли вокруг своей оси. Для северного и южного полушарий эта зависимость соответственно, имеет вид

$$h(n, \varphi, t_{\text{местн}}) = \varepsilon \sin \Phi(n) - (90^\circ - \varphi) \cos \psi(t_{\text{местн}}), \quad (3)$$

$$h(n, \varphi, t_{\text{местн}}) = -\varepsilon \sin \Phi(n) + (90^\circ + \varphi) \cos \psi(t_{\text{местн}}), \quad (4)$$

где Φ – текущая фаза годичного орбитального движения Земли вокруг Солнца, ψ – текущая фаза суточного вращения Земли вокруг своей оси, $t_{\text{местн}}$ здесь – это $t_{\text{местн}}$, соответствующее нормальному (зимнему) времени для центрального меридиана $\zeta_{\text{центр}}$ временной зоны N , в которой расположена расчётная точка ЗП.

Очевидно, в указанных условиях с учётом принятого начала отсчёта времени, соответствующего 00 ч 00 мин суток весеннего равноденствия в северном полушарии Земли, фазы $\Phi(n)$ и $\psi(t_{\text{местн}})$ в выражениях (3) и (4) могут быть выражены как $\Phi(n) = 2\pi n T_{\text{сут}} / T_{\text{год}}$ и $\psi(t_{\text{местн}}) = 2\pi t_{\text{местн}} / T_{\text{сут}}$, где $T_{\text{сут}}$ – продолжительность суток (24 ч) и $T_{\text{год}}$ – продолжительность года (8760 ч) [4].

Нормальное (зимнее) $t_{\text{местн}}$ ($0 \leq t_{\text{местн}} \leq 24$ ч) для центрального меридиана произвольной временной зоны N ($0 \leq N \leq 23$) описывается как

$$t_{\text{местн}} = UTC + N, \quad (5)$$

где UTC – всемирное координированное время (*Coordinated Universal Time*).

Наибольший интерес для российских специалистов представляют данные, относящиеся к северному полушарию Земли.

Выражение (3) с учётом приведённых представлений для текущих значений фаз $\Phi(n)$ и $\psi(t_{\text{местн}})$ позволяет вычислять зависимости h от $t_{\text{местн}}$ для произвольных географических координат ЗП в конкретной временной зоне N .

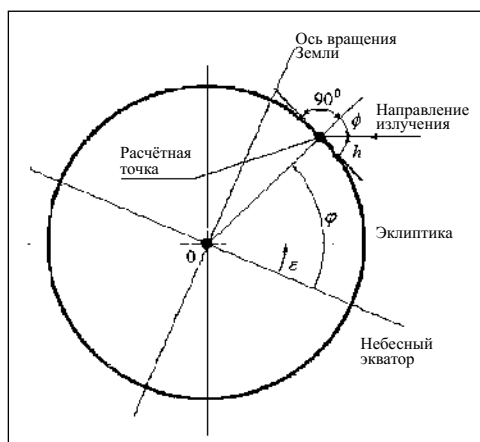
Обратная для функции (3) функция $t_{\text{местн}}(h)$ в северном полушарии Земли при значениях $n = 0-365$ и $\varphi = 0^\circ-90^\circ$, соответственно, имеет вид

$$t_{\text{местн}}(h) = \begin{cases} \frac{T_{\text{сут}}}{2\pi} \arccos \left[\frac{1}{(90^\circ - \varphi)} \left(\varepsilon \sin \frac{2\pi n T_{\text{сут}}}{T_{\text{год}}} - h \right) \right] & \text{для} \\ \text{первой половины суток,} \\ \frac{T_{\text{сут}}}{2\pi} \left\{ 2\pi - \arccos \left[\frac{1}{(90^\circ - \varphi)} \left(\varepsilon \sin \frac{2\pi n T_{\text{сут}}}{T_{\text{год}}} - h \right) \right] \right\} & \text{для второй половины суток.} \end{cases} \quad (6)$$

Из выражения (6) при $h = 0^\circ$ непосредственно следуют выражения для вычисления $t_{\text{восх}}$ и $t_{\text{зах}}$, а также – продолжительности дня ($t_{\text{зах}} - t_{\text{восх}}$).

Выражение (3) позволяет также вычислять значения h , соответствующие его верхней ($t_{\text{местн}} = 12$ ч) и нижней ($t_{\text{местн}} = 00$ ч) кульминациям, $h_{\text{кульм. верх}}$ и $h_{\text{кульм. нижн}}$, при произвольных сочетаниях значений n и φ от 0 до 365 и от 0° до 90° соответственно:

Рис. 2.
К вычислению
угловой высоты
Солнца над
горизонтом h



$$h_{\text{кульм верх}} = \varepsilon \sin \frac{2\pi n T_{\text{сут}}}{T_{\text{год}}} + (90^\circ - \varphi), \quad (7)$$

$$h_{\text{кульм ниж}} = \varepsilon \sin \frac{2\pi n T_{\text{сут}}}{T_{\text{год}}} + (-90^\circ + \varphi). \quad (8)$$

Обсуждение результатов

В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости h от $t_{\text{местн}}$ по выражению (3) при разных значениях φ в сутки летнего солнцестояния ($n = 91$), в сутки весеннего ($n = 0$) и осеннего ($n = 182$) равноденствий и в сутки зимнего солнцестояния ($n = 273$).

Проекции узлов семейства графиков на рис. 3 на ось $t_{\text{местн}}$ соответствуют $t_{\text{восх}}$ и $t_{\text{зах}}$ на $\varphi = 23,45^\circ$ в сутки весеннего и осеннего равноденствий.

Точки пересечения этих графиков с осью $t_{\text{местн}}$ соответствуют $t_{\text{восх}}$ и $t_{\text{зах}}$ для центрального меридиана рассматриваемой временной зоны N и полностью соответствуют значениям, вычисляемым по выражениям (6) при $h = 0^\circ$.

В северном полушарии в сутки зимнего солнцестояния увеличение φ с $00,00^\circ$ до $90,00^\circ$ в выражении (7) приводит к уменьшению максимальных суточных значений h с $66,55^\circ$ до $-23,45^\circ$. В северном полушарии в сутки весеннего [$n = 0$ (21 марта)] или осеннего [$n = 182$ (22 сентября)] равноденствий, в сутки летнего [$n = 91$ (22 июня)] и зимнего [$n = 273$ (22 декабря)] солнцестояний увеличение φ расчётной точки ЗП в выражении (7) с $00,00^\circ$ до $90,00^\circ$ приводит к уменьшению максимальных значений h с $90,00^\circ$ до $00,00^\circ$, со $113,45^\circ$ до $23,45^\circ$ и с $66,55^\circ$ до $-23,45^\circ$ соответственно.

Сопоставление результатов вычислений по выражениям (3), (4), (6)–(8) показывает их полное совпадение с данными [3]. Они также полностью соответствуют описаниям движения и текущего положения Солнца на условной небесной сфере, согласно [5, 7].

Аналогичные результаты могут быть получены по приведённым выше выражениям при любых значениях φ в северном и южном полушариях Земли в произвольные сутки года.

Заключение

Результаты работы позволяют формализовать и в значительной мере упростить проведение расчётов естественных облучённости и освещённости на ЗП, обеспечить возможность установления в аналитической форме влия-

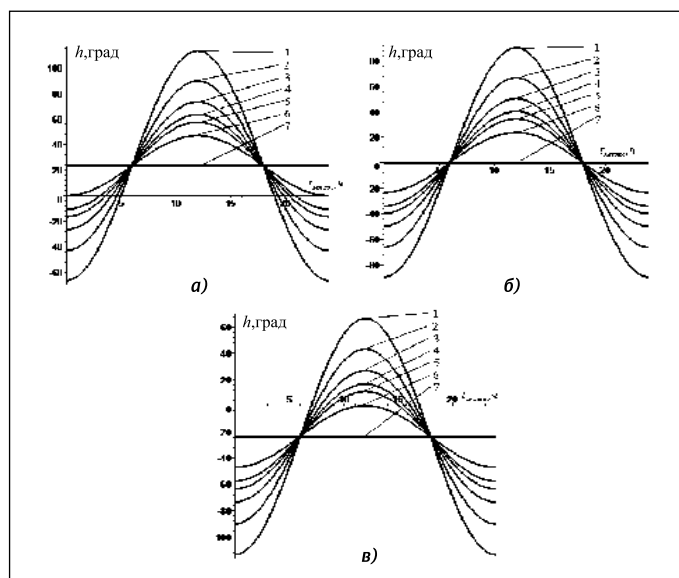


Рис. 3. Зависимости угловой высоты Солнца над горизонтом h от местного времени $t_{\text{местн}}$ и географической широты расчётной точки земной поверхности φ :

$a - n = 91$ (22 июня), $b - n = 0$ (21 марта) и $n = 182$ (22 сентября), $c - n = 273$ (22 декабря); $\varphi = 00,00^\circ$ (1), $23,45^\circ$ (2), $40,00^\circ$ (3), $50,00^\circ$ (4), $55,90^\circ$ (5), $66,55^\circ$ (6), $90,00^\circ$ (7)

ния солнечного излучения на характеристики разного рода зрительных процессов, зрительной работоспособности и циркадианной активности организма человека. Кроме того, результаты работы могут быть использованы и в других областях человеческой деятельности: например, в архитектуре, в биофизических исследованиях, в исследованиях солнечно-земных связей и геофизических процессов, в климатологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.
2. Кравков С.В. Глаз и его работа. Психофизиология зрения, гигиена освещения. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 531 с.
3. Таблицы для расчёта природной освещённости и видимости / Составлены Астрофиз. лаб. Ленинградского ун-та под рук. проф. В.В. Шаронова. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945. – 199 с.
4. Аллен К.У. Астрофизические величины (Справочник). Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 279 с.
5. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: Учеб. пособие / Под ред. В.В. Иванова. Изд. 2-е, испр. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 544 с.
6. Цесевич В.П. Что и как наблюдать на небе. Руководство к организации и проведению любительских наблюдений небесных тел. Изд. 6-е, перераб. – М.: Наука, 1984. – 304 с.
7. Клищенко А.П., Шупляк В.И. Астрономия: Учеб. пособие для вузов. – М.: Новое знание, 2004. – 224 с.



Леонидов Александр Вячеславович,
кандидат техн. наук. Окончил в 1970 г. МЭИ по специальности «Светотехника и источники света»

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

Анализ характеристик галогенных и светодиодных автомобильных ламп

О.Ю. КОВАЛЕНКО¹, * Ю.А. ЖУРАВЛЁВА²

¹ ФГБОУ ВО «НИ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Саранск

² ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва

* E-mail: ulypil@mail.ru

Аннотация

Анализируются характеристики автомобильных ламп брендов *Philips*, *KOITO*, *ETI flip chip LEDs*, *Osram*, *General Electric (GE)*, *Gtinthebox* и *OSLAMpled bulbs* с цоколями типов *H1*, *H4*, *H7* и *H11* (световой поток, световая отдача, коррелированная цветовая температура, спектр излучения) до начала эксплуатации ламп. По результатам измерений видно, что: 1) значения коррелированной цветовой температуры галогенных ламп близки к заявленным производителями; 2) светодиодные лампы, с учётом фактических значений их коррелированной цветовой температуры, нежелательно использовать при неблагоприятных погодных условиях (дождь, туман, снегопад); 3) галогенные лампы разных брендов имеют небольшой разброс по фактическим значениям светового потока и соответствуют по ним обязательным требованиям Правил ЕЭК ООН № 37; 4) световой поток светодиодных ламп больше, чем на 8 %, превышает предельно допустимый; 5) у светодиодных ламп световая отдача выше (> 82 лм/Вт), а энергопотребление ниже, чем у галогенных; 6) потребляемая мощность и ток светодиодных ламп в 3 раза ниже, а световая отдача в 5 раз выше, чем у галогенных ламп-аналогов.

Ключевые слова: светодиодная лампа, галогенная лампа, автомобильная лампа, световой поток, коррелированная цветовая температура, световая отдача, цоколь, установка фотометрическая измерительная, спектр излучения.

1. Введение

В современных автомобилях эксплуатируются разные виды ламп для освещения дорог, сигнализации и вывода информации о состоянии автомобиля. Большинство современных автомобилей имеют фары головного

света с галогенными лампами (ГЛ). Светодиодные (СД) источники света (ИС) на автотранспорте стали успешно применяться в светофорах, дорожных знаках, устройствах индикации в салонах и сигналах торможения. Производители автомобилей постоянно ищут пути улучшения фар головного света, так как от них зависит

детальность обзора водителя в тёмное время суток и в условиях плохой видимости как фактора безопасности движения на дорогах. В настоящее время российский рынок ламп для транспортных средств заполнен большим количеством разнообразных автомобильных ламп, от традиционных ГЛ до относительно новых ИС – СД автомобильных ламп. Рядом исследований СД ИС выявлены проблемы, связанные с условиями освещения ими, влияющими на зрительную работу, эффективность использования в сельском хозяйстве и других областях [1, 2]. Применение СД ИС в фарах головного света остаётся относительно новым направлением, стимулирующим проведение исследования характеристик автомобильных СД ламп.

Рис. 1. Внешний вид исследованных СД ламп *Gtinthebox* с типом цоколя *H1*



Рис. 2. Внешний вид СД лампы *OSLAMpled bulbs* с типом цоколя *H4*



Рис. 3. Внешний вид СД лампы *ETI flip chip LEDs* с типом цоколя *H11*

Таблица 1

Технические параметры автомобильных галогенных ламп

Производитель	Потребляемая мощность, Вт	Φ , лм	$T_{кш}$, К
<i>GE</i>	55	1550	3000
<i>Osram</i>	55	1550±10 %	3000
<i>KOITO</i>	60	–	4500
<i>Philips</i>	55	1550±10 %	3700

Результаты измерения автомобильных ламп

№ лампы	Производитель, тип лампы	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность, Вт	Φ , лм	$T_{кнд}$, К
1	Osram H1, ГЛ (образец 1)	13,2	67,6	1692	3280
2	Osram H1, ГЛ (образец 2)		62,0	1491	3150
3	GE H1, ГЛ		67,3	1671	3212
4	КОИТО H4 (ближний свет, образец 1), ГЛ		63,8	710	3548
5	КОИТО H4 (ближний свет, образец 2), ГЛ		63,8	696	3562
6	КОИТО H4 (дальний свет, образец 1), ГЛ		68,1	1166	3822
7	КОИТО H4 (дальний свет, образец 2), ГЛ		68,2	1162	3815
8	Philips, H7 (образец 1), ГЛ		54,1	1029	3385
9	Philips, H7 (образец 2), ГЛ		54,3	1043	3382
10	Gtinthebox H1, СД лампа (образец 1)		23,4	1936	7616
11	Gtinthebox H1, СД лампа (образец 2)		23,6	1940	7515
12	OSLAMPlеdbulbs H4, СД лампа (ближний свет, образец 1)		19,5	1340	6524
13	OSLAMPlеdbulbs H4, СД лампа (ближний свет, образец 2)		20,6	1705	6729
14	OSLAMPlеdbulbs H4, СД лампа (дальний свет, образец 1)		19,1	1815	6530
15	OSLAMPlеdbulbs H4, СД лампа (дальний свет, образец 2)		20,2	1929	6456
16	ETI flip chip LEDs H11, СД лампа (образец 1)		10,9	878	5306
17	ETI flip chip LEDs H11, СД лампа (образец 2)		9,7	789	5142
Требования Правил ЕЭК ООН № 37 [8]		13,2 В	≤ 68 Вт	1550 лм ± 15 %	–



Рис. 4. Внешний вид ГЛ General Electric (GE) и Osram с типом цоколя H1



Рис. 5. Внешний вид ГЛ КОИТО White Beam III Premium с типом цоколя H4



Рис. 6. Внешний вид ГЛ Philips White Vision с типом цоколя H7

Рис. 7. Результат спектральных измерений СД лампы OSLAMPledbulbs в режиме ближнего света

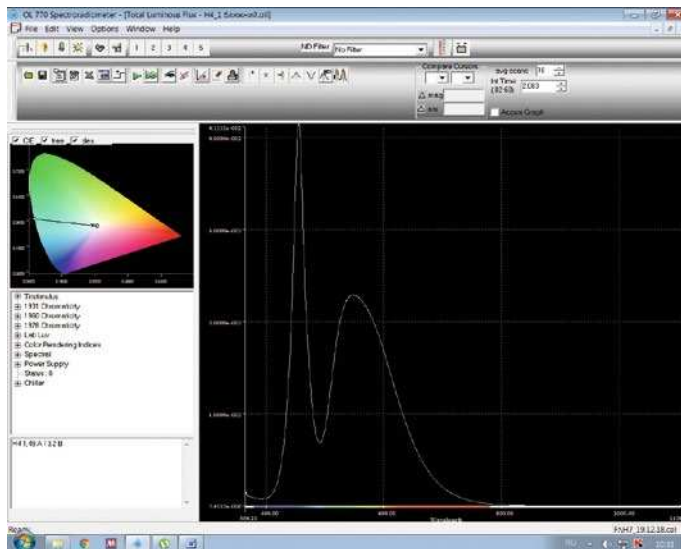


Рис. 8. Результат спектральных измерений СД лампы OSLAMPledbulbs в режиме дальнего света

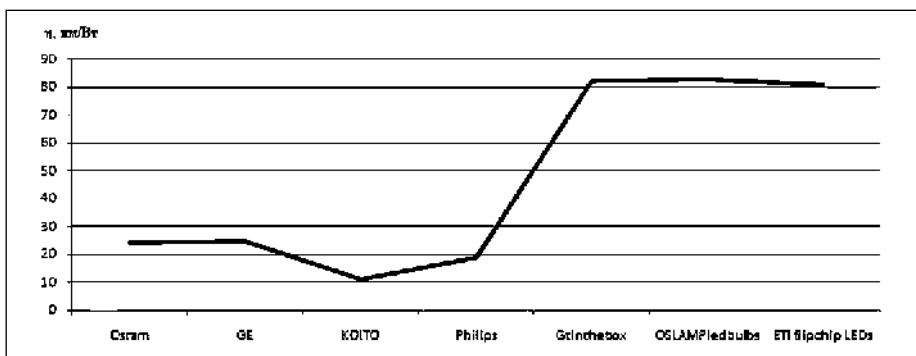
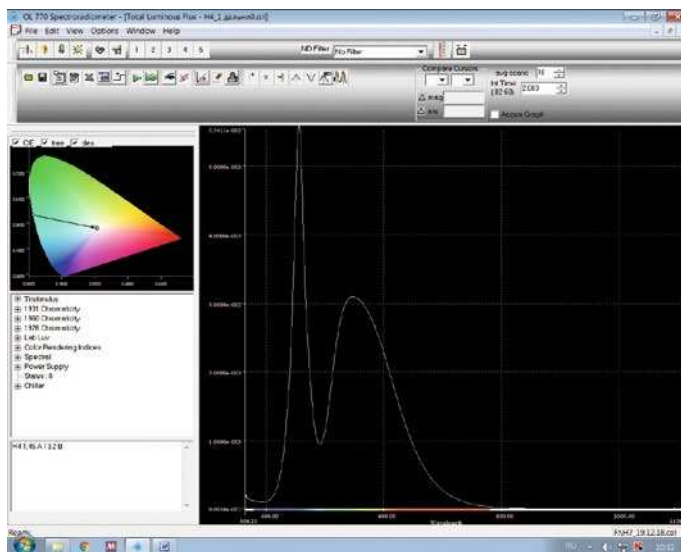


Рис. 9. Световые отдачи исследованных ламп

2. Исследование характеристик автомобильных ламп

Для оценки светотехнических параметров ламп для фар головного света, в частности светового потока Φ_v и коррелированной цветовой температуры $T_{кц}$, были выбраны ГЛ и СД лампы брендов *Philips*, *MTF Titanium*, *KOITO*, *ETI flip chip LEDs*, *Osram*,

General Electric (GE) и *Gtinthebox* в количестве до 2 образцов.

Измерения параметров этих образцов были проведены в ЦКП «Светотехническая метрология» Института электроники и светотехники согласно ГОСТ [3] с использованием фотоколориметрической установки фирмы *Gooch & Housego* для измерений Φ_v , потока излучения

Φ_e , спектральной плотности потока излучения $\Phi_e(\lambda)$, $T_{кц}$, общего (R_a) и специальных (R_i) индексов цветопередачи, координат цвета и цветности в системах *XYZ* (1931), *uv* (1960) и *u'v'* (1976) [4]. Принцип действия установки основан на определении Φ_e путём измерения абсолютной $\Phi_e(\lambda)$ и её интегрировании по λ . Установка содержит фотометрический шар *OL IS-7600* (диаметр 1,95 м), многоканальный спектро-радиометр *OL 770 VIS/NIR*, опволоконный кабель *770-7G-3.0*, прецизионный источник постоянного тока *OL410-200 PRECISION LAMP SOURCE* (для питания вспомогательной лампы *AUX LAMP A180*) и арматуру для крепления ламп и компьютера [5]. Основные технические характеристики установки: спектральный диапазон – 380–1100 нм, шаг сканирования – 0,75 нм, коэффициент отражения внутренней поверхности шара – не менее 0,986, диапазон измерения $T_{кц}$ – 1500–10000 К, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений $T_{кц}$ – ± 25 К, диапазон показаний Φ_v – 0,01–100000 лм, диапазон измерений Φ_v – 5–2500 лм, пределы допускаемой относительной погрешности измерений Φ_v – $\pm 9\%$.

На рис. 1–6 представлен внешний вид исследованных ИС.

Параметры ГЛ, заявленные производителем, приведены в табл. 1; они соответствуют предельным и номинальным электрическим и световым параметрам ГЛ, приведённым в ГОСТ [6]. Сведения о параметрах СД ламп на их упаковке отсутствуют. Значения тока ГЛ составили от 4,1–5,2 А, а тока СД – 0,8–1,5 А. Соответствующие результаты измерений приведены в табл. 2.

Результаты исследований спектральных характеристик СД лампы *OSLAMPledbulbs*, в соответствии с ГОСТ [7], представлены на рис. 7 и 8, из которых виден сильный пик излучения в синей области спектра, что объясняет значительно большие $T_{кц}$ у СД ламп типов *OSLAMPledbulbs H4*: 6729 и 6524 К для режима ближнего света и 6456 и 6530 К – дальнего, чем у ГЛ типов *KOITO H4*: 3548 и 3562 К для режима ближнего света и 3822 и 3815 К – дальнего.

На рис. 9 представлено сравнение исследованных ламп по световой отдаче.

3 Анализ полученных результатов

Анализ результатов измерений (табл. 2) показал, что:

- ГЛ разных брендов имеют небольшой разброс по фактическим значениям Φ_v от лампы к лампе ($\leq 14\%$);
- потребляемая мощность у ГЛ повышена относительно номинальной более чем на 11 %, но не превышает предельно допустимой (но следует учесть, что измерения проводились при испытательном напряжении 13,2 В, а номинальная мощность указана для напряжения 12 В);
- потребляемая мощность у СД ламп намного ниже, чем у ГЛ (больше чем на 65 %);
- световая отдача у СД ламп выше, а энергопотребление ниже, чем у ГЛ. Световая отдача у лампы № 12 ниже, чем у лампы № 13 из-за меньшего Φ_v ;
- $T_{кц}$ у ГЛ всех брендов близки к заявленным, а у СД ламп соответствуют холодно-белому свету;
- СД лампы, с учётом их фактических $T_{кц}$, нежелательно использовать при неблагоприятных погодных условиях (дождь, туман, снегопад);
- все ГЛ соответствуют по фактическим значениям Φ_v обязательным требованиям Правил [8], а СД лампы имеют Φ_v в среднем выше, чем на 8 %, предельно допустимого, кроме лампы № 12, у которой фактический Φ_v составил 1340 лм;
- потребляемые мощность и ток у СД ламп в 3 раза ниже, а световая отдача в 5 раз выше, чем у соответствующих ГЛ-аналогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железникова О.Е., Амеликина С.А., Сеницына Л.В. Об эффективности освещения светодиодами по зрительной работе // Светотехника. – 2018. – № 2. – С. 6–10.
2. Коваленко О.Ю., Пильщикова Ю.А. Повышение эффективности и контроль параметров источников излучения и облучательных установок в сельском хозяйстве // Фотоника. – 2017. – № 8(68). – С. 68–73.
3. ГОСТ Р 8.749–2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик».
4. Приложение к свидетельству № 64753 об утверждении типа средств

измерений. Описание типа средства измерений. Комплекс светотехнический измерительный. – М., 2017. – 8 с.

5. Приложение к свидетельству № 64752 об утверждении типа средств измерений. Описание типа средства измерений. Установка фотокориметрическая измерительная. – М., 2017. – 7 с.

6. ГОСТ Р МЭК 60809–2012 «Лампы для дорожных транспортных средств. Требования к размерам, электрическим и световым параметрам».

7. ГОСТ Р 55703–2013 «Источники света электрические. Методы измерений спектральных и цветовых характеристик».

8. Правила ЕЭК ООН N37 (пересмотр 7) «Единые предписания, касающиеся официального утверждения ламп накаливания, предназначенных для использования в официально утверждённых фарах механических транспортных средств и их прицепов».



Коваленко Ольга Юрьевна, доктор техн. наук, доцент. Окончила в 1983 г. МГУ им. Н.П. Огарёва по специальности «Светотехника и источники света». Профессор кафедры метрологии, стан-

дартизации и сертификации Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Область научных интересов: измерение и контроль параметров осветительных и облучательных систем



Журавлёва Юлия Алексеевна, кандидат техн. наук, доцент. Окончила в 2010 г. МГУ им. Н.П. Огарёва по специальности «Светотехника и источники света». Доцент кафедры источников

света Института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва и кафедры электроники РТУ «МИРЭА». Область научных интересов: энергосберегающие светотехнические установки; параметры компактных люминесцентных ламп и светодиодных источников света; вакуумная техника

Новая «Справочная книга по светотехнике»

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

Книга объёмом 892 страницы цветной печати содержит новые и актуальные материалы.

В книгу вошло всё наиболее важное в современной светотехнике:

- Светодиоды и области их эффективного использования;
 - компьютерное моделирование осветительных установок и световых приборов;
 - автоматическое управление освещением зданий и наружного освещения;
 - новейшие сведения о спортивном освещении и об освещении музеев;
 - новое в широком использовании УФ-излучения;
 - освещение всех видов транспорта, (автомобильного, железнодорожного, авиационного, а также и аэродромов);
 - о теории светового поля и её практическом использовании;
 - о современном световом дизайне и архитектурном освещении.
- Книга содержит подробные сведения о наружном освещении улиц, дорог, тоннелей с переходом от контроля освещённости к нормированию яркости.
- о свете в медицине;
 - о проблемах освещения при освоении мирового океана и космоса.

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

Авторами книги являются:

13 докторов наук-профессоров

19 кандидатов наук

20 специалистов разных направлений.

Приобрести новое издание можно в редакции журнала «Светотехника», отправив заявку на адрес электронной почты bulgakova@l-e-journal.com.

С уважением,
Ю.Б. Айзенберг

14 – 17.09.2020

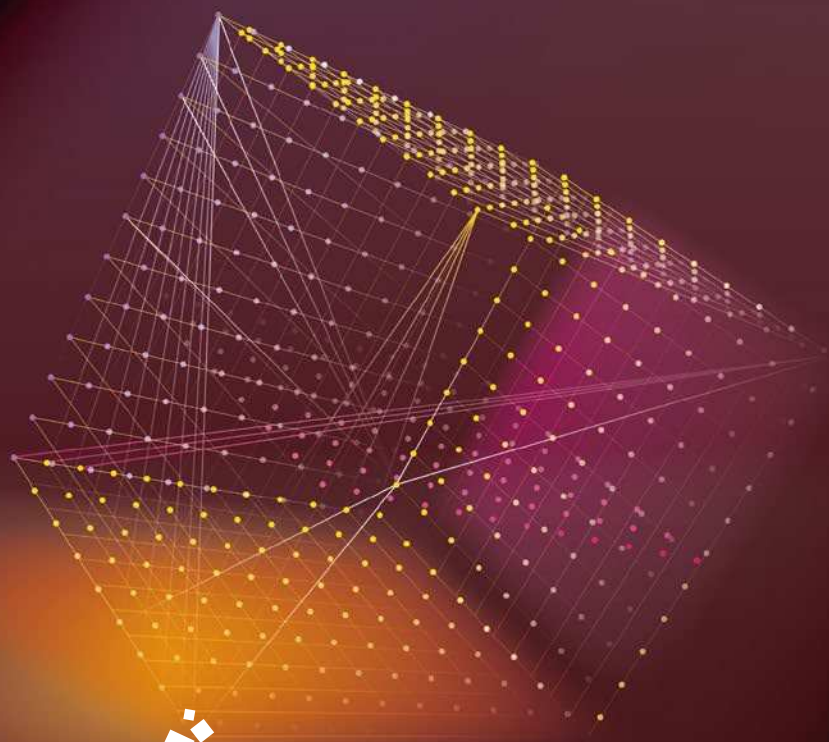
ЦВК «Экспоцентр», Москва
Павильоны 1, 2, 8


interlight
RUSSIA

intelligent building
RUSSIA

Международная выставка освещения, систем безопасности, автоматизации зданий и электротехники

light     
     **building**



 messe frankfurt

16+

Влияние угла наклона светильника и топологии осветительной установки на характеристики дорожного освещения¹

М.С. СЕНГИЗ

Университет Битлис Ерен, Битлис, Турция
E-mail: msaitcengiz@gmail.com

Аннотация

В данном исследовании рассмотрены две ошибки, присущие дорожному освещению. Объяснены преимущества шахматного расположения светильников и проблемы, связанные с использованием расположенных под углом к горизонтали светильников. Количественно продемонстрированы ошибки, возникающие при использовании моделирующих программ, и сформулированы предложения по исправлению этих ошибок. Количественно продемонстрированы потери в части яркости дорожного покрытия, имеющие место при использовании расположенных под углом к горизонтали светильников. Кроме того, на конкретном примере установки дорожного освещения показано, что при соответствующем выборе схемы расположения светильников шаг между опорами может быть уменьшен на 9,3 %.

Ключевые слова: дорожное освещение, угол наклона светильника, яркость.

1. Введение

Основная задача дорожного освещения состоит в обеспечении безопасного движения транспорта как днём, так и ночью. Работа установок дорожного освещения оценивается исходя из таких характеристик, как яркость дорожного покрытия, общая и продольная равномерности освещения, ограничение блёскости, обеспечение контраста, необходимого для восприятия объектов, и частота мельканий [1–3].

Дорожное освещение улучшает заметность пешеходов и других объектов. Освещение обеспечивает безопасность движения для водителей и рессор. Тщательно спроектирован-

ное дорожное освещение предотвращает возникновение заторов и придаёт людям уверенность в своей безопасности.

Водитель любого движущегося по дороге транспортного средства должен обладать подробной зрительной информацией о пути своего следования. Водитель должен хорошо видеть дорогу перед собой, воспринимать положение и движение своего транспортного средства, иметь возможность отслеживать перемещения других транспортных средств и с лёгкостью распознавать имеющиеся на дороге препятствия, что особенно важно при высоких скоростях движения.

МКО приводит результаты 30 исследований дорожного освещения, направленных на улучшение зрительных условий на дорогах [4]. Согласно [4], выполнение нормативных требований к дорожному освещению приводит к уменьшению дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с участием пешеходов на 57–45 %, ДТП со смертельным исходом – на 65–48 %, ДТП с тяжёлыми телесными повреждениями – на 30–24 %. При этом полное количество ДТП уменьшается на 53–14 %.

Даже при малой плотности дорожного движения, при отсутствии освещения количество ДТП на дорогах и в тоннелях в ночное время примерно в три раза превышает их количество в дневное время. Причиной этого служит отсутствие удовлетворяющего нормам дорожного освещения. Согласно МКО, обеспечение подходящего дорожного освещения уменьшает количество преступлений, совершаемых на улицах городов. По литературным данным, благодаря хорошему освещению количество преступлений на городских дорогах уменьшается на 20 %, а тяжесть преступлений – на 40 % [5, 6].

2. Яркость дорожного покрытия

При проектировании установок дорожного освещения важнейшей задачей является обеспечение достаточного количества света без избыточного освещения и увеличения затрат на электроэнергию [7]. С точки зрения дорожного освещения важнейшим параметром является яркость, которую обозначают символом L и измеряют в $\text{кд}/\text{м}^2$. Для обеспечения хорошей видимости объектов и зрительного комфорта водителей распределение яркости поверхности дороги должно быть по возможности максимально равномерным. В настоящее время в основу дорожного освещения положен яркостный метод Американского института стандартов, который основан на яркости дорожного покрытия.

2.1. Средняя яркость дорожного покрытия

В случае дорожного освещения интерес представляет та часть дорожного покрытия, которая попадает в поле зрения водителя. При этом увеличение средней яркости дорожного покрытия $L_{average}$ приводит к улучшению видимости, обеспечивая большую яркость фона. Увеличение $L_{average}$ приводит к увеличению чувствительности глаз водителей благодаря увеличению яркости расположенных на дороге объектов. Так что самым важным параметром является $L_{average}$, которую рассчитывают на основе яркостей выбранных $m \times n$ участков дороги. $L_{average}$ получают посредством векторного сложения яркостей, создаваемых всеми освещающими контрольный участок источниками света. В результате определяют значение яркости во всех точках. Средняя яркость дорожного покрытия рассчитывается для каждого наблюдателя в отдельности [8–10].

2.2. Равномерность

Даже если осветительные установки и обеспечивают хорошую среднюю яркость дорожного покрытия, возможны участки с низкой яркостью, характеризующиеся слабым контрастом и невозможностью обнаружения небольших препятствий. Разница между минимальной и средней яркостями дорожного покрытия в поле зрения не должна превышать опреде-

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

Параметры для выбора классов дорог по освещению

Параметр	Варианты	Весовой коэффициент
Скорость	Очень большая	1
	Большая	0.5
	Средняя	0
Плотность движения транспорта	Очень высокая	1
	Высокая	0.5
	Средняя	0
	Низкая	-0.5
	Очень низкая	-1
Состав транспортного потока	Смешанный, с большой долей немоторизированного транспорта	1
	Смешанный	0.5
	Только автомобильный транспорт	0
Центральная разделительная полоса	Да	1
	Нет	0
Частота пересечений	Высокая	1
	Средняя	0
Припаркованные автомобили	Да	0.5
	Нет	0
Окружающее освещение	Сильное	1
	Среднее	0
	Слабое	-1
Управление движением транспорта	Слабое	0.5
	Среднее или хорошее	0
Сумма весовых коэффициентов		4

Таблица 2

Качественные характеристики дорожного освещения [19]

Класс дороги по освещению	$L_{average}$, кд/м ²	U_0	U_1	TI , %
<i>M1</i>	> 2,0	> 0,4	> 0,7	< 10
<i>M2</i>	> 1,5	> 0,4	> 0,7	< 10
<i>M3</i>	> 1,0	> 0,4	> 0,5	< 10
<i>M4</i>	> 0,75	> 0,4	> 0,5	< 15
<i>M5</i>	> 0,50	> 0,35	> 0,4	< 15
<i>M6</i>	> 0,30	> 0,35	> 0,4	< 15

3. Проектирование дорожного освещения

Типы дорог приведены в международных технических отчётах, и для этих типов дорог приводятся диапазоны оптимальных характеристик дорожного освещения. Проектные расчёты следует производить применительно к светильникам с известными фотометрическими характеристиками, получая в результате количества и типы светильников [18–20].

Таблица 1

лённого значения, с тем чтобы обеспечить достаточное освещение всех точек дорожного покрытия. Это требование приводит к нормированию общей и продольной равномерностей яркости, которые являются важными вторичными характеристиками дорожного освещения.

Для обеспечения хороших условий видимости для водителей, яркость должна быть распределена по поверхности дороги равномерно. В случае дорожного освещения важными считаются два типа равномерности [8–11]. Это средняя (результатирующая) равномерность U_0 и продольная равномерность U_l .

2.3. Источники света

Натриевые лампы высокого давления (НЛВД) являются предпочтительными в условиях, когда требуются высокие уровни яркости, в том числе в подводных туннелях, так как НЛВД имеют большие световые потоки и меньшие размеры, чем лампы низкого давления.

Ранее было проведено сравнение используемых в дорожном освещении светильников с НЛВД и светильников со светодиодами (СД). Было показано, что освещение дорог классов *M3*, *M4* и *M5* по освещению может быть обеспечено светильниками с СД мощностью 100 и 150 Вт, тогда как в случае дорог классов *M1* и *M2* эти светильники не обеспечивали требуемый уровень освещения. Так как объектом данного исследования служит дорога класса *M2* по освещению, то светильники с СД здесь не рассматриваются, а рассматриваются светильники с НЛВД, которые широко применяются для дорожного освещения. В результате все расчёты производятся применительно к НЛВД [13–17].

Характеристики дороги и осветительной установки

Тип осветительной опоры	Оцинкованная	Класс дороги по освещению	M2
Количество полос дороги	2	Длина консоли, м	1
Ширина полосы, м	3,5	Угол наклона консоли, град.	0°/5°/10°/15°
Ширина дороги, м	2×3,5 = 7	Угол наклона светильника, град.	0°/5°/10°/15°
Класс дороги	R4	Тип лампы	НЛВД
Q_0	0,08	Мощность лампы, Вт	150
Расстояние до светильника	0	Световой поток лампы, лм	17000
Высота установки светильника над уровнем земли, м	11	Коэффициент технического обслуживания (один раз в год)	0,91

Соответствующий конкретной дороге класс дороги по освещению определяется при помощи таблицы, приведённой в *CIE115–2010* [19]. Согласно табл. 1 нами был выбран класс дороги по освещению *M2*, соответствующие которому значения параметров отмечены в таблице. Качественные характеристики дорожного освещения приведены в табл. 2.

Класс дороги по освещению был определён в соответствии с уравнениями (1) – (3):

$$MX = 6 - \text{сумма весовых коэффициентов}, \quad (1)$$

$$MX = 6 - 4 = 2, \quad (2)$$

$$MX = M2. \quad (3)$$

4.1. Основные характеристики

Дорожное покрытие – асфальт, класс *R4*. Кроме того, $Q_0 = 0,08$, высота подвеса светильников – 11 м. Коэффициент технического обслуживания светильника равен 0,91, и все расчётные значения яркости были соответствующим образом скорректированы. При расчётах дорожного освещения отношение минимального значения яркости к среднему превышало 0,4, так что отношение наименьшего значения яркости в направлении наблюдателя к максимальному гарантированно превышало 0,7 ($U_1 \geq 0,7$).

Уровни и равномерности яркости дорожного покрытия соответствуют нормативным требованиям. Все светильники расположены на высоте 11 м в две линии в двустороннем шахматном (далее – шахматное расположение) или двустороннем прямоугольном (далее – прямоугольное расположение) порядке и направлены от тротуара к оси дороги. Характеристи-

ки дороги и осветительной установки приведены в табл. 3 [21–23].

4.2. Моделирование

Основная задача новых исследований заключается в получении наиболее экономичного результата, обеспечивающего требуемые условия. В новых исследованиях в области дорожного освещения рассмотрены различные сценарии освещения производится с учётом принятой классификации. Наиболее точные требования к дорожному освещению содержатся в международных стандартах. Поэтому в данном случае моделирование производилось с учётом требований МКО, и яркость, средний уровень яркости, общая и продольная равномерности яркости были рассчитаны во всех точках по отношению к наблюдателям в соответствии с *CIE140*.

Предназначенные для дорожного освещения светильники следует выбирать с учётом блёскости, яркости дорожного покрытия, равномерности освещения и экономических соображений, и этот выбор следует производить при помощи компьютерных расчётов, в основу которых должен быть положен яркостный метод [25–36].

В моделирующей программе предусмотрен широкий выбор характеристик дорог. Что касается освещения дорог, то можно выбрать разные системы освещения (прямоугольное расположение светильников, шахматное расположение светильников, дорога с разделительной полосой, дорога с одним светильником на опоре, дорога с двумя светильниками на опоре т. д.), классы дорог (*R1, R2, R3, R4, N1, N2, N3, N4* и т. д.), количества по-

лос, ширина полосы, ширина островка спасения и классы дорог по освещению (*M1, M2, M3, M4, M5, M6* и т. д.). Что касается характеристик осветительной установки, то для светильников, устанавливаемых на опорах или подвешиваемых, можно выбрать шаг между опорами, высоту подвеса светильников, расстояние между светильником и дорогой, угол наклона консоли, класс защиты *IP*, скорость загрязнения, периодичность чисток, и коэффициент технического обслуживания. Что касается характеристик светильников, то в базу данных моделирующей программы в любой момент можно ввести наименование светильника, угол наклона светильника (относительно поверхности дороги), мощность используемых ламп, срок службы, мощность пускорегулирующего аппарата. В результате в процесс моделирования можно ввести лампы любого типа [1–3, 21–24]. Применительно к данным, которые были введены в программу, можно с лёгкостью и большой точностью осуществить моделирование осветительной установки.

5. Реализация дорожного освещения

В данном исследовании были рассмотрены две проблемы, присущие дорожному освещению, а именно, угол наклона светильников и топология установки дорожного освещения. При этом при помощи моделирования было показано, что используемое почти повсеместно наклонное положение светильников является неправильным. Показано, что светильники следует располагать параллельно поверхности дороги (под

Характеристики дорожного освещения при прямоугольном и шахматном расположении светильников и углах 0°, 5°, 10° и 15°

Угол наклона светильника, град.	0		5		10		15	
Номер наблюдателя	1	2	1	2	1	2	1	2
Местоположение наблюдателя, м	1,75	5,25	1,75	5,25	1,75	5,25	1,75	5,25
Шахматное расположение светильников								
$L_{average}$, кД/м ²	1,50	1,50	1,28	1,28	1,11	1,11	0,98	0,98
U_o	0,75	0,77	0,80	0,81	0,85	0,81	0,82	0,78
U_l	0,72	0,72	0,80	0,80	0,84	0,84	0,86	0,86
$TI, \%$	5,7	5,8	5,9	5,9	5,7	5,7	5,4	5,4
Прямоугольное расположение светильников								
$L_{average}$, кД/м ²	1,64	1,64	1,40	1,40	1,21	1,21	1,07	1,07
U_o	0,67	0,67	0,73	0,73	0,77	0,77	0,77	0,77
U_l	0,70	0,70	0,79	0,79	0,86	0,86	0,86	0,86
$TI, \%$	8,0	8,0	8,0	8,0	7,9	7,9	7,6	7,6

Таблица 5

Характеристики дорожного освещения при прямоугольном и шахматном расположении светильников

Топология осветительной установки	Прямоугольное расположение светильников		Шахматное расположение светильников	
	1,75	5,25	1,75	5,25
Местоположение наблюдателя, м	1,75	5,25	1,75	5,25
$L_{average}$, кД/м ²	1,64	1,64	1,5	1,5
U_o	0,67	0,67	0,75	0,77
U_l	0,70	0,70	0,72	0,72
$TI, \%$	8,00	8,00	5,70	5,80
$E_{average}$, лк	25,55		23,4	
E_{min} , лк	13,31		16,81	
E_{max} , лк	49,20		34,39	
U_{oa}	0,53		0,73	
U_{la}	0,27		0,49	
Мощность лампы, Вт	150		150	
Световой поток, лм	17000		17000	
Расстояние между опорами, м	43		47	

углом 0°), а не наклонно. Вторая важная проблема, присущая дорожному освещению, состоит в том, что имеется возможность увеличения шага между опорами посредством правильного выбора схемы расположения опор. Соответственно, были проведены исследования двухполосной дороги с прямоугольным рас-

положением светильников с НЛВД мощностью 150 Вт. При этой топологии шаг между опорами оказался равным 43 м. Однако моделирование показало, что если опоры расположены в шахматном порядке, то шаг между опорами будет составлять 47 м. И если говорить об освещении рассмотренной дороги, то од-

ним и тем же количеством светильников при шахматном расположении светильников можно осветить дорогу, на 9,3 % более длинную, чем при прямоугольном расположении светильников. Этот пример показал, что при помощи моделирования можно найти новые решения для разных дорог и ламп разной мощности.

5.1. Зависимость освещения от угла наклона светильника

Для определения уровней освещения в определённых точках осветительной установки используются как различные инструменты проектирования, так и физические измерения. При этом используются модели, уравнения и компьютерные программы или реальные измерения, выполненные при помощи люксметров. В данной работе рассматриваются светильники с НЛВД мощностью 150 Вт, установленные на высоте 11 м от поверхности дороги. Определение угла наклона консоли (0° , 5° , 10° и 15°) в случае светильника с НЛВД мощностью 150 Вт и степенью защиты $IP65$ осуществлялось расчётным путём. Примеры углов наклона консолей светильников дорожного освещения приведены на рис. 1.

Как следует из рис. 1, светильники и консоли, используемые в дорожном освещении, расположены с наклоном, что приводит к уменьшению эффективности. В данной работе был проведён расчёт этого уменьшения эффективности, показавший, что эффективность светильников дорожного освещения уменьшается по мере увеличения угла наклона светильника. Углы наклона светильников, в том числе обеспечивающие неэффективное и эффективное освещение, показаны на рис. 2.

В данной работе было осуществлено моделирование двухполосной дороги, к которой применимы методы светотехнических расчётов, приведённые в [11, 12]. Расчёты были проведены применительно к светильникам с НЛВД мощностью 150 Вт, расположенным под углами 0° , 5° , 10° и 15° к горизонтали. При этом при углах наклона 5° , 10° и 15° наблюдалось уменьшение эффективности. Например, при прямоугольном расположении светильников, равном 43 м шаге между опорами и равном 0° углу наклона светильника средняя яркость оказалась равной $L_{average} = 1,50$ кд/м², что соответствует приведённым в [11, 12] требованиям к дорогам класса $M2$ по освещению. Если же при этом угол наклона светильника будет равен 5° , 10° или 15° , то $L_{average}$ окажется меньшей, чем $1,50$ кд/м², что не удовлетворяет требованиям МКО [11, 12].

При шахматном расположении светильников, равном 47 м шаге меж-



Рис. 1. Примеры углов наклона консолей светильников дорожного освещения

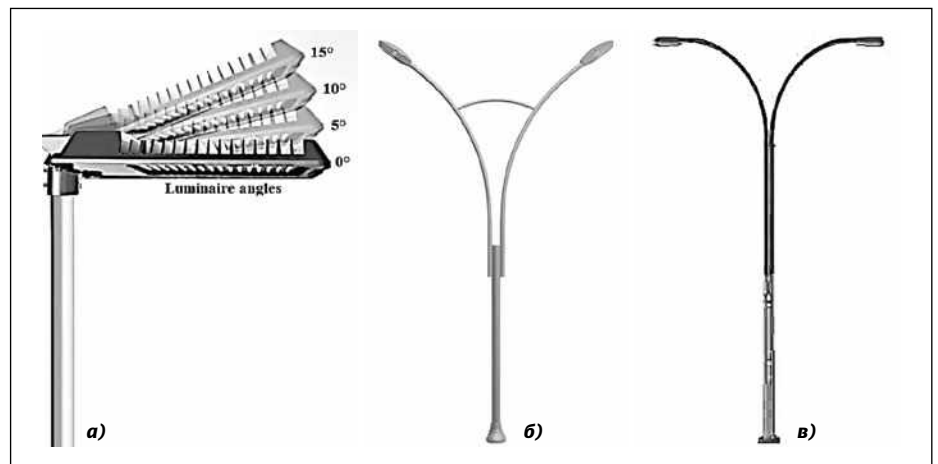


Рис. 2. а: углы наклона светильников; б: неэффективное освещение; в: эффективное освещение

ду опорами и равном 0° углу наклона светильника средняя яркость оказалась равной $L_{average} = 1,64$ кд/м², что соответствует приведённым в [11, 12] требованиям к дорогам класса $M2$ по освещению. Если же при этом угол наклона светильника будет равен 5° , 10° или 15° , то $L_{average}$ окажется меньшей, чем $1,50$ кд/м², что не удовлетворяет требованиям МКО [11, 12]. Требования к освещению дорог класса $M2$ приведены в табл. 3, а в табл. 4 приведены результаты расчётов, проведённых применительно к прямоугольному и шахматному расположению светильников и углам наклона 0° , 5° , 10° и 15° .

Из табл. 4 следует, что и при прямоугольном, и при шахматном расположении светильников значения $L_{average}$ при угле наклона 0° оказались приемлемыми на 100 %, тогда как:

- при угле наклона 5° потери составили примерно 15 %,
- при угле наклона 10° потери составили примерно 26 %, а
- при угле наклона 15° потери составили примерно 35 %.

5.2. Зависимость освещения от схемы расположения светильников

Ещё одним моментом, который был рассмотрен в данной работе, было влияние на освещение топологии осветительной установки. Даже при равенстве всех прочих параметров, правильный выбор схемы расположения светильников позволяет получить некоторые преимущества. Для подтверждения этого было смоделировано освещение двухполосной дороги светильниками с НЛВД мощностью 150 Вт, расположенными по прямоугольной схеме и в шахматном порядке. Как следует из табл. 5, при прямоугольном расположении светильников все полученные характеристики освещения удовлетворяют требованиям [12] при равном 43 м шаге между опорами. Однако несмотря на то, что все, за исключением шага между опорами, характеристики осветительной установки остаются неизменными, при шахматном расположении светильников требования [12] удов-

Значения яркости в направлении наблюдателя 1 при прямоугольном расположении светильников

Наблюдатель 1: $L_{average} = 1,64$ кд/м ² , $U_o = 0,67$, $U_l = 0,70$, $TI = 8\%$												Прямоугольное расположение светильников, 150 Вт				
	1,43	4,30	7,17	10,03	12,90	15,77	18,63	21,50	24,37	27,23	30,10	32,97	35,83	38,70	41,57	
0,58	1,58	1,51	1,40	1,27	1,35	1,52	1,70	1,79	1,79	1,70	1,56	1,57	1,69	1,67	1,65	
1,75	1,74	1,61	1,49	1,42	1,52	1,73	1,91	2,01	1,97	1,84	1,66	1,66	1,82	1,75	1,77	
2,92	1,69	1,56	1,42	1,41	1,55	1,82	2,05	2,13	2,00	1,85	1,68	1,66	1,70	1,71	1,72	
4,08	1,68	1,55	1,42	1,41	1,55	1,79	1,99	2,06	1,97	1,83	1,66	1,66	1,69	1,70	1,71	
5,25	1,65	1,51	1,37	1,28	1,38	1,58	1,79	1,88	1,84	1,76	1,60	1,62	1,77	1,72	1,74	
6,42	1,46	1,37	1,23	1,10	1,16	1,32	1,50	1,61	1,61	1,59	1,47	1,50	1,62	1,62	1,58	

Таблица 7

Значения яркости в направлении наблюдателя 2 при прямоугольном расположении светильников

Наблюдатель 2: $L_{average} = 1,64$ кд/м ² , $U_o = 0,67$, $U_l = 0,70$, $TI = 8\%$												Прямоугольное расположение светильников, 150 Вт				
	1,43	4,30	7,17	10,03	12,90	15,77	18,63	21,50	24,37	27,23	30,10	32,97	35,83	38,70	41,57	
0,58	1,46	1,37	1,23	1,10	1,16	1,32	1,50	1,61	1,61	1,59	1,47	1,50	1,62	1,62	1,58	
1,75	1,65	1,51	1,37	1,28	1,38	1,58	1,79	1,88	1,84	1,76	1,60	1,62	1,77	1,72	1,74	
2,92	1,68	1,55	1,42	1,41	1,55	1,79	1,99	2,06	1,97	1,83	1,66	1,66	1,69	1,70	1,71	
4,08	1,69	1,56	1,42	1,41	1,55	1,82	2,05	2,13	2,00	1,85	1,68	1,66	1,70	1,71	1,72	
5,25	1,74	1,61	1,49	1,42	1,52	1,73	1,91	2,01	1,97	1,84	1,66	1,66	1,82	1,75	1,77	
6,42	1,58	1,51	1,40	1,27	1,35	1,52	1,70	1,79	1,79	1,70	1,56	1,57	1,69	1,67	1,65	

летворяются при шаге между светильниками, равном 47 м, то есть на 4 м больше, чем при прямоугольном расположении светильников. Так что при шахматном расположении светильников освещённый участок оказался на 9,3 % длиннее.

По этой причине при моделировании дорожного освещения следует рассматривать разные варианты, как это сделано в данной работе, что способно привести к уменьшению как не-

нужных капитальных затрат при строительстве установок дорожного освещения, так и стоимости расходуемой на освещение энергии. Прямоугольное и шахматное расположения светильников показаны на рис. 3, а в табл. 5 приведены результаты расчётов установок дорожного освещения с прямоугольным и шахматным расположением светильников.

В табл. 6 и 7 и в табл. 8 и 9 приведены значения яркости в направлении

наблюдателей 1 и 2 при, соответственно, прямоугольном и шахматном расположении светильников. При этом требования [11, 12] удовлетворяются во всех точках. Максимальный шаг между опорами составляет 43 м при прямоугольном расположении светильников и 47 м при шахматном расположении светильников, то есть расположение светильников в шахматном порядке позволяет на 4 м увеличить шаг между опорами.

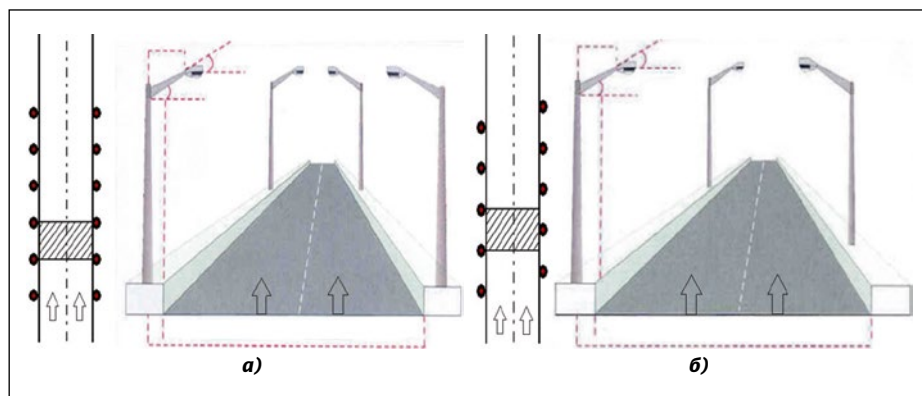


Рис. 3. Установки дорожного освещения с прямоугольным (а) и шахматным (б) расположением светильников

6. Результаты

Установки дорожного освещения очень важны как для облегчения управления транспортными средствами, так и для обеспечения безопасности. Основная задача новых исследований заключается в получении наиболее экономичного результата, обеспечивающего требуемые условия. И при разработке новых предложений в области дорожного освещения учитывают как классификацию дорог по освещению, так и соответствующие требования к освещению.

Значения яркости в направлении наблюдателя 1 при шахматном расположении светильников

Наблюдатель 1: $L_{average} = 1,50$ кд/м ² , $U_o = 0,75$ $U_i = 0,72$ $TI = 5,7$ %												Шахматное расположение светильников, 150 Вт				
	1,47	4,41	7,34	10,28	13,22	16,16	19,09	22,03	24,97	27,91	30,84	33,78	36,72	39,66	42,59	45,53
0,58	1,58	1,58	1,49	1,35	1,40	1,59	1,59	1,57	1,53	1,48	1,37	1,23	1,21	1,29	1,41	1,55
1,75	1,70	1,68	1,58	1,44	1,51	1,76	1,75	1,82	1,79	1,62	1,47	1,33	1,32	1,40	1,51	1,62
2,92	1,80	1,67	1,51	1,40	1,42	1,58	1,68	1,77	1,78	1,64	1,48	1,38	1,38	1,46	1,60	1,74
4,08	1,87	1,68	1,49	1,35	1,32	1,37	1,47	1,59	1,64	1,59	1,49	1,41	1,49	1,67	1,77	1,85
5,25	1,76	1,58	1,41	1,24	1,21	1,26	1,36	1,49	1,56	1,54	1,49	1,38	1,47	1,72	1,73	1,81
6,42	1,40	1,36	1,26	1,14	1,12	1,20	1,29	1,40	1,46	1,42	1,37	1,24	1,30	1,48	1,50	1,49

Таблица 9

Значения яркости в направлении наблюдателя 2 при шахматном расположении светильников

Наблюдатель 2: $L_{average} = 1,50$ кд/м ² , $U_o = 0,77$ $U_i = 0,72$ $TI = 5,8$ %												Шахматное расположение светильников, 150 Вт				
	1,47	4,41	7,34	10,28	13,22	16,16	19,09	22,03	24,97	27,91	30,84	33,78	36,72	39,66	42,59	45,53
0,58	1,58	1,58	1,49	1,35	1,40	1,59	1,59	1,57	1,53	1,48	1,37	1,23	1,21	1,29	1,41	1,55
1,75	1,70	1,68	1,58	1,44	1,51	1,76	1,75	1,82	1,79	1,62	1,47	1,33	1,32	1,40	1,51	1,62
2,92	1,80	1,67	1,51	1,40	1,42	1,58	1,68	1,77	1,78	1,64	1,48	1,38	1,38	1,46	1,60	1,74
4,08	1,87	1,68	1,49	1,35	1,32	1,37	1,47	1,59	1,64	1,59	1,49	1,41	1,49	1,67	1,77	1,85
5,25	1,76	1,58	1,41	1,24	1,21	1,26	1,36	1,49	1,56	1,54	1,49	1,38	1,47	1,72	1,73	1,81
6,42	1,40	1,36	1,26	1,14	1,12	1,20	1,29	1,40	1,46	1,42	1,37	1,24	1,30	1,48	1,50	1,49

Наиболее точные требования к дорожному освещению и выбору ламп содержатся в международных стандартах. Поэтому моделирование дорожного освещения производится с учётом требований МКО, и значения яркости, средний уровень яркости, общая и продольная равномерности яркости были рассчитаны во всех точках по отношению к наблюдателям в соответствии с CIE140 [11, 12]. Характеристики ламп были внесены в базу данных с последующим анализом полученных результатов.

Светильники с НЛВД мощностью 150 Вт удовлетворяют требованиям [11, 12] при равном 0° угле наклона светильника и шагах между опорами, оптимальных для прямоугольного и шахматного расположения светильников. При углах наклона 5°, 10° и 15° $L_{average}$ оказалась меньше чем 1,50 кд/м² и, тем самым, не удовлетворяет требованиям МКО. Было показано, что соответствие нормативным требованиям обеспечивалось неэффективными осветительными установками.

Схема расположения светильников влияет на эффективность освещения. Даже при равенстве всех прочих параметров, правильный выбор топологии позволяет улучшить дорожное освещение. При прямоугольном расположении светильников оптимальный шаг между опорами оказался равным 43 м, тогда как при шахматном расположении светильников он оказался равным 47 м, то есть выигрыш составил 4 м (9,3 %).

Такие специальные решения можно выбрать при помощи компьютерного моделирования. По этой причине при моделировании дорожного освещения следует рассматривать разные варианты, как это сделано в данной работе.

Правильный выбор схемы расположения светильников приводит к уменьшению ненужных капитальных затрат при строительстве установок дорожного освещения и к увеличению энергоэффективности дорожного освещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cengiz, M.S. A Simulation and Design Study for Interior Zone Luminance in Tunnel Lighting // Light & Engineering. – 2019. – Vol. 27, No. 2. – P. 42–51.
2. Cengiz, M.S. The Relationship Between Maintenance Factor and Lighting Level in Tunnel Lighting // Light & Engineering. – 2019. – Vol. 27, No. 3. – P. 75–84.
3. Сенгуз М.С. Связь между коэффициентом эксплуатации и уровнем освещённости в тоннеле // Светотехника. – 2019. – № 3. – С. 51–58.
4. CIE93–1992. Road lightings as an Accident Countermeasure. Vienna-Austria, 1992.
5. Painter, K.A., Farrington, D.P. Evaluating Situational Crime Prevention A Young People's Survey // The British Journal of Criminology. – 2001. – Vol. 41, No. 2. – P. 266–284.
6. Gan, F., Grabosky, P. Improved street Lighting and Crime Reduction, The Promise of Crime Prevention. – 2nd ed. – Canberra: Australian Institute of Criminology, 2000. – P. 1326–6004 (2000). ISBN0642241724.
7. Cengiz, M.S., Cengiz, Ç. Numerical Analysis of Tunnel LED Lighting Maintenance Fac-

tor // IJUM Engineering Journal. – 2018. – Vol. 19, No. 2. – P. 154–163.

8. *Ongun, A.* The Analysis of Optimum Solution Criteria for The Designing of Road Lighting Installations. M. Sc. Thesis, Gazi University Institute of Science and Technology, 2007. 174 pages. Ankara.

9. *Bommel, W.V.* Road Lighting: Fundamentals, Technology and Application. – Switzerland: Springer Int. Pub., 2015. – 333 pp. ISBN: 978–3–319–11465–1

10. *Özkaya, M.* Aydınlatma Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul-1994, 91 pp. 11. CIE140:2000. Road Lighting Calculations. Vienna-Austria, 2000.

12. CIE140:2019 Road Lighting Calculations. 2nd Ed. ISBN:978–3–902842–56–5.

13. *Onaygil, S., Güler, Ö., Erkin, E.* Yol Aydınlatmalarında LED Kullanımı, V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi, 2009.

14. *Cengiz, Ç., Kaynaklı, M., Gencer, G., Eren, M., Yapıcı, İ., Yıldırım, S., Cengiz, M.S.* Selection Criteria and Economic Analysis of LEDs // Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech., October 27–29, 2017, Bitlis, Turkey.

15. UN Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, Committee on Sustainable Energy, Steering Committee of the Energy Efficiency 21 Project, Final Report of Energy Efficiency Investment Project Development for Climate Change Mitigation, ECE/ENERGY/WP.4/ 2006/2, (21 March 2006).

16. *Gencer, G., Eren, M., Yıldırım, S., Kaynaklı, M., Palta, O., Cengiz, M.S., Cengiz, Ç.* Numerical Approach to City Road Lighting Standards // Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech., 27–29.10.2017, Bitlis, Turkey.

17. *Yıldırım, S., Yapıcı, İ., Atıç, S., Eren, M., Palta, O., Cengiz, Ç., Cengiz, M.S., Yurci, Y.* Numerical Analysis of Productivity and Redemption Periods in LED Illumination // Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech., 12–14.07.2017, Baku.

18. CIE194–2011. On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting. Vienna-Austria, 2011.

19. CIE115–2010. Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic. Vienna-Austria, 2010.

20. CIE136–2000. Guide to the lighting of urban areas. Vienna-Austria, 2000.

21. *Onaygil, S.* TEDAŞ Genel Müdürlüğü Meslek İçi Eğitim Semineri // TEDAŞ Basımevi, Ankara, 2005. – P. 1–70.

22. *Onaygil, S.* 2007. TEDAŞ Genel Müdürlüğü Meslek İçi Eğitim Semineri-Gölbaşı Eğitim Tesisleri // Yol aydınlatma Semineri, 23–24.01.2007.

23. *Onaygil, S.* Yol aydınlatma projelerinde yol sınıfının belirlenmesinin önemi // Kaynak Elektrik Dergisi. – 1998. – No. 12. – P. 125–132.

24. *Güler, Ö., Onaygil, S.* The effect of luminance uniformity on visibility level in road lighting // Lighting Research and Technology. – 2002. – Vol. 35. – P. 199–215.

25. *Tetri, E., Chenani, S.B., Rasanen R.S.* Advancement in Road Lighting // Light & Engineering. – 2018. – Vol. 26, No. 1. – P. 99–109.

26. *Ченани С.Б., Рязанен Р.С., Тетри Е.* Состояние и перспективы развития дорожного освещения // Светотехника. – 2018. – № 1. – С. 15–22.

27. *Tetri, E., Bozorg Chenani, S., Rasanen R-S., Baumgartner, H., Vaaja, M., Sierla, S., Tahkamo, L., Virtanen, J-P., Kurkela, M., Ikonen, E., Halonen, L., Huuppa, H., Kosonen, I.* Tutorial: Road Lighting for Efficient and Safe Traffic Environments // LEUKOS. – 2017. – Vol. 13, No. 4. – P. 223–241.

28. *Liping, G., Marjukka, E., Halonen, L.* Luminance monitoring and optimization of luminance metering in intelligent road lighting control systems // Ingeria Iluminatuluin. – 2007. – Vol. 9. – P. 24–40.

29. *Barua, P., Mazumdar, S., Chakraborty, S., Bhattacharjee, S.* Road Classification Based Energy Efficient Design and its Validation for Indian Roads // Light & Engineering. – 2018. – Vol. 26, No. 2. – P. 110–121.

30. *Чакрабурти С., Баруа П., Бхаттачарджи С., Мазумдар С.* Энергоэффективное проектирование установок дорожного освещения на основе классификации индийских дорог по освещению // Светотехника. – 2018. – № 3. – С. 60–67.

31. *Bozorg Chenani, S., Vaaja, T.M., Kurkela, M., Kosonen, I., Luttinen, T.* Target detection distances under different road lighting intensities // European Transport Research Review. – 2017. – No. 9. – P. 1–17.

32. *Iacomussi, P., Rossi, G., Soardo, P.* Energy Saving and Environmental Compatibility in Road Lighting // Light & Engineering. – 2012. – Vol. 20, No. 4. – P. 55–63.

33. *Росси Д., Соардо П., Якомусси П.* Дорожное освещение: экономия энергии и совместимость с окружающей средой // Светотехника. – 2012. – № 2. – С. 32–39.

34. *Tahkamo, L., Halonen, L.* Life cycle assessment of road lighting luminaires -Comparison of light emitting diode and high-pressure sodium technologies // Journal of Cleaner Production. – 2015. – Vol. 93. – P. 234–242.

35. *Van Bommel, W., Van Den Beld, G., Van Ooyen M.* Industrial Light and Productivity // Lighting & Engineering. – 2003. – Vol. 11, No. 1. – P. 14–21.

36. *Боммель В., Бельд Г., Оойжен М.* Промышленное освещение и производительность труда // Светотехника. – 2003. – № 1. – С. 8–11.

Комментарий к статье М.С. Сенгиза «Влияние угла наклона светильника и топологии осветительной установки на характеристики дорожного освещения»

Не делая полного разбора статьи, коснёмся только двух основных выводов автора. Утверждается, что, во-первых, нулевой угол наклона кронштейна консольного светильника и, во-вторых, шахматная схема расположения ОП относительно дороги являются эффективными решениями при освещении автомобильных дорог.

Для обоснования этих выводов автором выбран вариант участка доро-

ги с односторонним движением, с двумя полосами шириной 3,5 м каждая, при этом ОП располагаются по обеим сторонам дороги на высоте 11 м от уровня дорожного покрытия (ДП). При этом полностью отсутствует информация о характере светораспределения применяемых ОП, а это, в данном случае, играет решающую роль.

Как известно, светораспределение уличных ОП подразделяется на два

основных типа: широкое осевое (ШО) и широкое боковое (ШБ), главное отличие между которыми обусловлено соответственно наличием или отсутствием симметрии в распределении силы света ОП относительно главной поперечной плоскости ОП (плоскости C_0-C_{180} в системе фотометрирования $C-\gamma$), параллельной оси дороги (см. рисунок). Кроме того, максимумы силы света ОП со светораспределением типа ШБ лежат не в главной поперечной плоскости, как в случае ШО, а в симметричных меридиональных полуплоскостях, смещённых от неё



Мехмет Саид Сенгиз (Mehmet Sait Cengiz), Ph.D.
(2016 г.). Работает в Университете Битлис Ерен, Турция. Область научных интересов: прикладные вопросы освещения

на некоторый угол C , например, C_{10} и C_{170} (на приведённом рисунке КСС с максимумом показана только в полуплоскости C_{10}).

ОП со светораспределением типа ШО наиболее эффективны для освещения нешироких улиц при их подвесе на тросе над проезжей частью. Также такие ОП устанавливают на кронштейнах опор, при этом, как правило, под наклоном к горизонту под углом порядка 15° . ОП со светораспределением типа ШБ устанавливают на кронштейнах опор, при этом для узких улиц – с небольшим наклоном (до 10°) или без такового, а для широких – всегда с наклоном от 10° до 30° . Необходимо отметить, что при выборе угла наклона ОП важна не абсолютная ширина проезжей части, а её относительная величина, т.е. по отношению к высоте установки ОП над уровнем ДП.

Из приведённых в табл. 4 данных видно, что с увеличением угла наклона ОП средняя яркость ДП уменьшается. Это свидетельствует о том, что автор использовал ОП со светораспределением типа ШБ. На основании полученной зависимости автор делает вывод о том, что нулевой наклон оптимален. Однако это справедливо только для приведённого частного случая: светораспределения ОП типа ШБ и малой относительной ширине дороги. Если для выбранного автором ОП взять более широкую дорогу (4, 6 или 8 полос) при той же высоте установки ОП, то оптимальным с точки зрения максимума средней яркости ДП будет угол наклона от 10° до 20° . Поэтому говорить об оптимальности нулевого угла наклона в общем случае – некорректно. Второй вывод касается выбора схемы расположения ОП относительно дороги, почему-то названной автором «топологией»¹¹. Здесь прежде всего надо сказать, что для такой узкой дороги (2 полосы) двустороннее расположение ОП, принятое автором, очень нерационально. Одностороннее расположение ОП при правильном выборе их мощности вполне позволяет обеспечить заданные уровень и равномерность яркости ДП, при этом существенно ниже затраты на установку ОП (одна линия ОП вместо двух). Анализ выбора оп-

¹ В оригинале автор использует термин «topology» вместо общепринятого «arrangement».

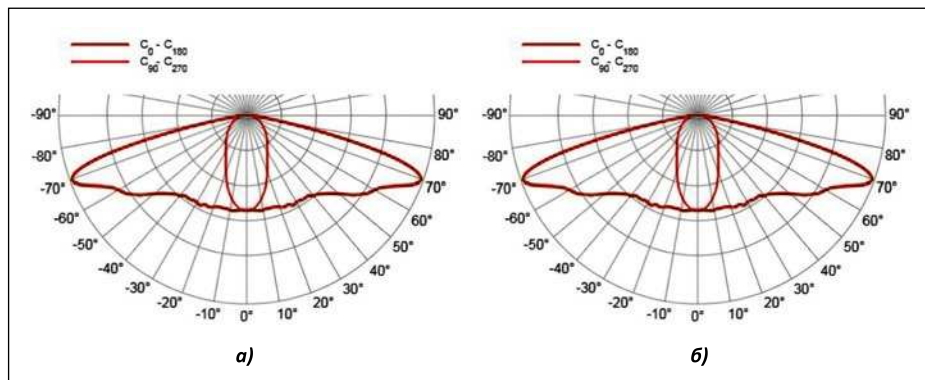


Рис. 1. Типы светораспределения уличных ОП: а – ШО; б – ШБ

тимальной схемы расположения ОП необходимо проводить для дорог шириной 4–8 полос, при этом надо обязательно учитывать тип светораспределения и оптимальный угол наклона ОП в зависимости от ширины дороги (см. выше).

Отметим также, что при определении класса дороги по освещению (табл. 1) учтено наличие центральной разделительной полосы, которой нет (см. рис. 3), что привело к завышению указанного класса, а следовательно, и нормативных требований (средней яркости, продольной равномерности). А это, в конечном счёте, исказило по-

лученные результаты исследования и сделанные выводы.

Подытоживая сказанное, можно констатировать, что выводы автора носят частный недостаточно обоснованный характер и не могут рассматриваться в качестве рекомендаций при проектировании дорожного освещения.

*Ведущий научный сотрудник –
руководитель сектора специального
программного обеспечения
ООО МСК «БЛ ГРУПП»,
к.т.н., А.А.Коробко
18.03.2020*

ПАРТНЁРЫ ЖУРНАЛА

Редколлегия и редакция с большим удовлетворением отмечают организацию сообщества «Партнёры журнала «Светотехника» и выражают благодарность нашим партнёрам, поверившим во взаимную эффективность такого сотрудничества



interlight
RUSSIA

intelligent building
RUSSIA

Энергоэффективность освещения исторических зданий на примере освещения караван-сарая Эль-Аман¹

Б. КОКАМАН

Университет Битлис Ерен, Битлис, Турция
E-mail: bkocaman@beu.edu.tr

Аннотация

Исторические здания соединяют прошлое с настоящим. Более того, они отражают жизнь общества, существовавшего в другие века. Исторические здания следует освещать, чтобы обеспечить лучшие условия их зрительного восприятия. Спрос на электроэнергию возрастает с каждым днём. Энергию следует расходовать экономно, с тем чтобы уменьшить количество рассеиваемой энергии. Поэтому энергоэффективность освещения исторических зданий имеет чрезвычайно важное значение. Для внутреннего и наружного освещения исторических зданий используются самые разные осветительные приборы. При этом новые осветительные приборы, такие как светильники со светодиодами (СД), во много раз эффективнее традиционных осветительных приборов, таких как светильники с лампами накаливания. Использование новых осветительных приборов может привести к существенному уменьшению расхода электроэнергии и соответствующему уменьшению выбросов парниковых газов. Освещение исторических зданий может послужить впечатляющим и очевидным примером энергоэффективного освещения. В данной работе анализ затрат и энергоэффективности проведён с учётом капитальных затрат и энергопотребления применительно к замене используемых в настоящее время в караван-сарая Эль-Аман (провинция Битлис, Турция) светильников с лампами накаливания (ЛН), галогенными лампами накаливания (ГЛН) и металлогалогенными лампами (МГЛ) на имеющие почти такие же световые потоки светильники с СД. Расчёты показали, что при такой замене годовое потребление энергии уменьшается на 78,21 %, с 41610 кВт·ч в случае тра-

диционного освещения с использованием светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ до 9066,6 кВт·ч при переходе на светильники с СД. При этом затраты на установку светильников с СД окупаются в течение 135 дней. В результате освещение было сделано менее энергозатратным, и энергию стали расходовать эффективнее.

Ключевые слова: энергоэффективность, исторические здания, освещение, СД, внутреннее освещение, наружное освещение.

1. Введение

Исторические здания соединяют прошлое с настоящим и обеспечивают культурную идентификацию. А при обеспечении баланса между использованием энергии и культурными ценностями они вносят собой важный вклад в будущее [1]. Они отражают жизнь общества и населённых пунктов, существовавших в другие века. Поэтому исторические здания следует демонстрировать правильно, что достигается с помощью освещения, которое способно изменить внешний облик здания [2].

Освещение должно усилить характерный облик здания, выявить его красоту и обеспечить личностное восприятие его окрестностей.

Зрительный облик исторического здания должен быть вынесен на передний план, а его детали выделены. Кроме того, здание должно привлекать внимание. При этом освещение не должно ни сглаживать особенности исторического здания, ни причинять ему вред. Всё это учитывают при создании наружного и внутреннего освещения исторических зданий [3, 4]. В последнее время большое значение стали уделять энергоэффективности освещения [5, 6]. В частности, ряд исследований были посвящены освещению исторических зданий и его энергоэффективности [7–11].

Сочетание светодиодов (СД) и современных систем управления является одним из решений, позволяющих обеспечить высокое качество освещения и его энергоэффективность. Проект освещения должен разрабатываться с учётом исторической ценности здания, его сохранности, обеспечения наиболее благоприятного сочетания естественного и искусственного освещения, зрительного комфорта людей, обеспечения качественного зрительного восприятия, зрительной эргономики и удовлетворённости наблюдателей [12]. При этом целый ряд исследований посвящён осветительным установкам с СД для внутреннего и наружного освещения [13–17].

Увеличение энергопотребления связано с ростом населения, повышением спроса на оказываемые зданиями услуги и уровень комфортности, а также с увеличением времени, которое люди проводят внутри зданий, и эта тенденция к увеличению спроса на электроэнергию сохранится и в будущем [18]. Улучшение энергоэффективности зданий нужно для уменьшения энергозависимости и выброса парниковых газов [19]. Энергоэффективность представляет собой уменьшение количества потребляемой энергии без изменения требуемого уровня освещения освещаемого пространства.

Освещение является базовой потребностью людей, что и определяет его повсеместное использование. Поэтому количество расходуемой на освещение энергии непрерывно увеличивается. Согласно отчёта Международного энергетического агентства, на освещение приходится 19 % полного мирового потребления энергии [20]. В то же время, в Турции на освещение приходится 20 % полного потребления энергии [21], что говорит о важности эффективного использования расходуемой на освещение энергии. Освещение является одно из областей, потенциально способных улучшить энергоэкономичность зданий [22].

Целью освещения является не обеспечения определённого уровня освещённости, а создание хороших условий для зрительной работы. Обеспечение хороших условий для зрительной работы связано в первую очередь с качеством и организацией освещения [23]. Освещение должно воздействовать на людей, воспринимающих сооружения и здания с художественной точки зрения [3].

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского.

Применительно к освещению, основной задачей является создание осветительной установки, обеспечивающей высочайшее качество освещения с учётом требований энергоэффективности.

Осветительную установку следует выбирать таким образом, чтобы не нанести никакого вреда камням исторических зданий. Кроме того, установки, сооружённые на начальной стадии возведения зданий, следует изменять как можно меньше.

При разработке осветительной установки следует исходить из назначения освещаемого здания и причин, по которым это здание нуждается в освещении. Характеристики освещаемого здания влияют на выбор элементов, подлежащих освещению для подчёркивания красоты этого здания, и на обеспечение комфорта зрительного восприятия, зависящего от глянца и блёскости, цвета и температуры используемого света. В данной работе энергоэффективность освещения рассмотрена применительно к историческим зданиям на примере освещения караван-сарая Эль-Аман, расположенного в провинции Битлис, Турция.

2. Краткая история караван-сарая Эль-Аман

Объектом данного исследования является историческое здание караван-сарая Эль-Аман, расположенное в провинции Битлис, Турция, и в настоящее время используемое как культурный центр университета Битлис Ерен.

Этот караван-сарай расположен в провинции Битлис, находящейся на самом востоке Турции ($38^{\circ}29'28''$ северной широты, $42^{\circ}11'36''$ восточной долготы). Он является примером османской архитектуры второй половины 16 века. Караван-сарай Эль-Аман, максимальный размер которого составляет примерно 70 м, является одним из самых больших караван-сараяв Анатолии. Это здание было построено для предоставления укрытия для путешественников и караванов, соединяющим Азию с Анатолией и Европой [24]. Спутниковый снимок караван-сарая Эль-Аман приведён на рис. 1, а на рис. 2 показан общий вид этого караван-сарая.

Освещение исторических зданий, являющихся символами городов, име-

Рис. 1. Спутниковый снимок караван-сарая Эль-Аман



Рис. 2. Общий вид караван-сарая Эль-Аман

Рис. 3. Естественное освещение караван-сарая Эль-Аман



ет свои особенности [11]. При освещении этих зданий нельзя ни наносить им каких бы то ни было физических повреждений, ни искажать их своеобразия, так как помимо того, что освещение этих зданий способствует развитию туризма, освещение зданий с впечатляющей архитектурой играет важную роль в формировании эстетического облика города.

В данном случае в окрестности рассматриваемого исторического здания нет никаких других сооружений. По-

этому ни внутри здания, ни на его фасаде и примыкающей к фасаду территории нет никаких сторонних источников света, и ночное освещение обеспечивается исключительно светильниками самого караван-сарая.

На начальной стадии строительства караван-сарай Эль-Аман освещался естественным светом (рис. 3). Однако после преобразования в культурный центр он освещается как естественным, так и искусственным светом (рис. 4).

Характеристики установок внутреннего и наружного освещения

Осветительная установка		Установленная мощность ламп каждого типа				
Внутреннее освещение		Мощность ЛН, Вт	Мощность МГЛ, Вт	Мощность ГЛН, Вт	Количество используемых ламп, шт.	Полная мощность, Вт
Помещение	Служебные помещения	100	–	–	15	1500
	Конференц-залы	100	–	–	4	400
	Многоцелевой холл	100	–	–	30	3000
	Маленькие кинозалы	100	–	–	48	4800
	Коридоры	100	–	–	10	1000
	Кладовые	100	–	–	4	400
	Туалет	100	–	–	6	600
Полная установленная мощность внутреннего освещения, Вт						11700
Наружное освещение		Мощность ЛН, Вт	Мощность МГЛ, Вт	Мощность ГЛН, Вт	Количество используемых ламп, шт.	Полная мощность, Вт
Двор		–	–	60	9	540
Фасад	Северный	–	150	–	2	300
	Западный	–	150	–	2	300
	Южный	–	150	–	3	450
	Восточный	–	150	–	3	450
Полная установленная мощность наружного освещения, Вт						2040



Рис. 4. Естественное и искусственное освещение караван-сарая Эль-Аман

Для освещения исторических зданий важное значение имеют распределение силы света и физические размеры и типы используемых светильников. Предпочтительными являются изделия, размеры которых не нарушают эстетическую целостность конструкции и общий облик здания в дневное время, или же места расположения светильников должны выби-

раться так, чтобы они не влияли на общий облик здания [25].

2.1. Освещение караван-сарая Эль-Аман

Для освещения караван-сарая Эль-Аман используется как естественный, так и искусственный свет. Для искусственного внутреннего освещения ис-

пользуются 117 светильников с лампами накаливания (ЛН) мощностью 100 Вт, тогда как для наружного освещения используются 9 светильников с галогенными лампами накаливания (ГЛН) мощностью 60 Вт и 10 светильников с металлогалогенными лампами (МГЛ) мощностью 150 Вт. Проект установки наружного освещения приведён на рис. 5, а на рис. 6 приведён проект установки внутреннего освещения. Названия некоторых частей исторического здания указаны на рисунках. Другие части здания и характеристики установок внутреннего и наружного освещения приведены в табл. 1. В существующей установке внутреннего освещения используется кабель $2 \times 2,5$ ННХМН, а в существующей установке наружного освещения используются кабели $3 \times 2,5$ ННХМН и 4×4 N2XH.

Мощности, световые потоки, коррелированные цветовые температуры, общие индексы цветопередачи и сроки службы светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ, которые используются

Типы и характеристики используемых светильников

Тип светильника	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Коррелированная цветовая температура, К	Общий индекс цветопередачи	Срок службы, ч
МГЛ	150	12000	4200	85	6000–10000
ГЛН	60	630	2800	100	2000–4000
ЛН	100	1380	2700	100	1000

Таблица 3

Характеристики предлагаемых светильников с СД

Тип светильника	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Коррелированная цветовая температура, К	Общий индекс цветопередачи	Срок службы, ч
СД (вместо МГЛ)	90	10000	3000	70	10000–50000
СД (вместо ГЛН)	20	800	2000	80	10000–50000
СД (вместо ЛН)	15	1521	2700	80	10000–50000

Таблица 4

Характеристики используемых и предлагаемых светильников

Тип светильника	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Количество используемых светильников, шт.	Общий индекс цветопередачи	Полная мощность, Вт
ЛН	100	1380	117	100	11700
СД (вместо ЛН)	15	1521	117	80	1755
ГЛН	60	630	9	100	540
СД (вместо ГЛН)	20	800	9	80	180
МГЛ	150	12000	10	85	1500
СД (вместо МГЛ)	90	10000	10	70	900

для освещения исторического здания караван-сарая Эль-Аман, приведены в табл. 2.

3. Метод

3.1. Использование светильников с СД

Светильники с СД потребляют меньше энергии, чем традиционные светильники, вследствие чего они широко используются и для внутреннего, и для наружного освещения. В исторических зданиях освещение, соответствующее их текстуре, может быть реализовано при помощи светильников с СД. Поэтому для обеспечения энергоэффективности освещения светильники с ЛН, ГЛН и МГЛ, которые в настоящее время используются для внутреннего и наружного освещения караван-сарая Эль-Аман, было пред-

ложено заменить на светильники с СД, излучающие примерно такие же световые потоки. Характеристики предлагаемых светильников с СД приведены в табл. 3, а в табл. 4 приведены характеристики используемых в караван-сарая Эль-Аман и предлагаемых светильников, а именно, типы светильников, их мощности, световые потоки, количества, общие индексы цветопередачи и полные мощности.

Караван-сарай Эль-Аман используется в качестве культурного центра, и считается, что светильники, используемые для его внутреннего освещения, работают в среднем 8 ч в сутки, а светильники, используемые для его наружного освещения, работают в среднем 10 ч в сутки.

Светильники с СД, заменяющие светильники с ЛН, ГЛН и МГЛ, будут работать в составе существующих электрических установок внутренне-

го и наружного освещения. Поэтому дополнительные затраты на кабели и работу при проведении расчётов не учитываются.

3.2. Расчёт затрат в случае используемых светильников

Затраты рассчитывались по отдельности для светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ, которые используются для освещения исторического здания караван-сарая Эль-Аман, и для заменяющих их светильников с СД.

Количество энергии, потребляемой в день светильниками с ЛН, ГЛН и МГЛ, равно:

- Светильники с ЛН: $117 \cdot 100 \text{ Вт} \cdot 8 \text{ ч} = 93600 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 93,600 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.
- Светильники с ГЛН: $9 \cdot 60 \text{ Вт} \cdot 10 \text{ ч} = 5400 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 5,400 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.
- Светильники с МГЛ: $10 \cdot 150 \text{ Вт} \cdot 10 \text{ ч} = 15000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 15,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Таблица 5

Средние стоимости светильников

Тип светильника	Мощность, Вт	Средняя стоимость светильника, ТЛ
ЛН	100	6
МГЛ	60	15
ГЛН	150	90
СД (вместо ЛН)	15	40
СД (вместо ГЛН)	20	106
СД (вместо МГЛ)	90	650

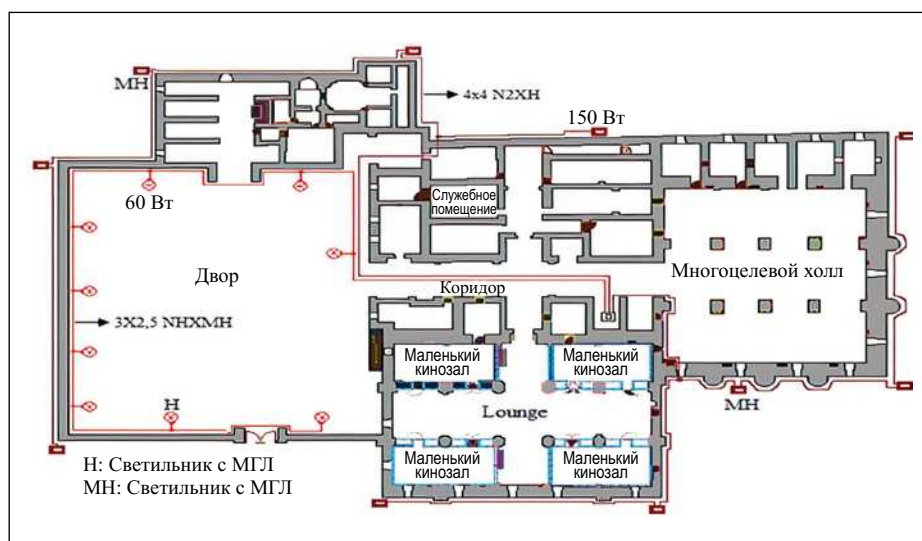


Рис. 5. Проект установки наружного освещения

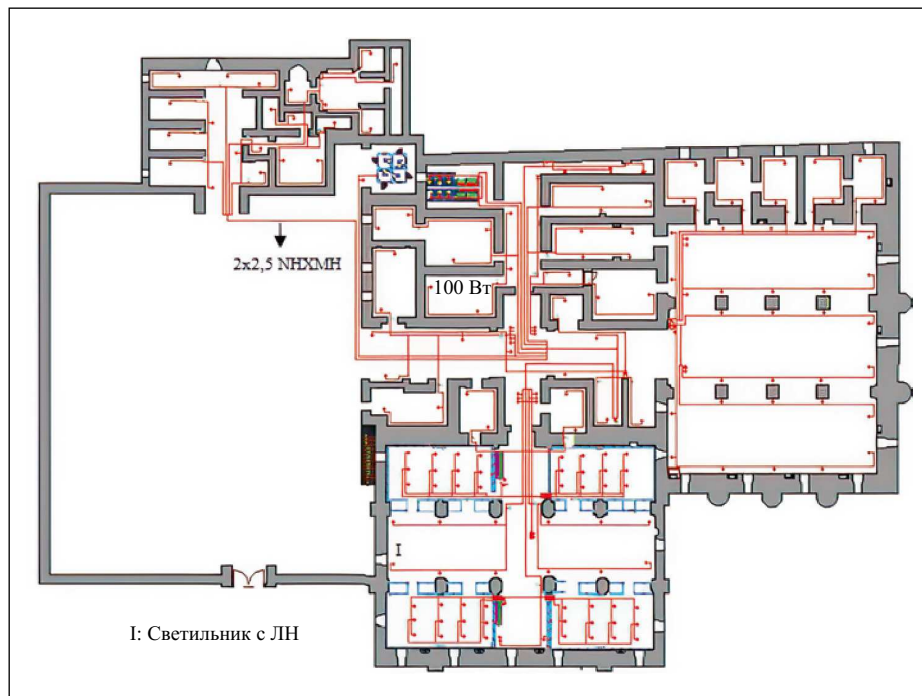


Рис. 6. Проект установки внутреннего освещения

Полное количество энергии, потребляемой в день всеми светильниками с ЛН, ГЛН и МГЛ, равно $93,600 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 5,400 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 15,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 114 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Так как на протяжении года рассматриваемое историческое здание открыто и используется ежедневно, то количество рабочих дней в году принято равным 365.

Полное годовое потребление энергии всеми светильниками с ЛН, ГЛН и МГЛ равно $114 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{день} \cdot 365 \text{ дней} = 41610 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Стоимость электроэнергии (с сентября 2019 г.) составляет $0,822018 \text{ турецких лир (ТЛ) за } 1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}^2$.

Годовые затраты на электроэнергию, потребляемую всеми светильниками с ЛН, ГЛН и МГЛ, составляют $41610 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 0,822018 \text{ ТЛ/кВт}\cdot\text{ч} = 34204,168 \text{ ТЛ}$.

При переходе на светильники с СД получаем:

Дневное потребление энергии:

- Светильники с СД, заменяющие светильники с ЛН: $117 \cdot 15 \text{ Вт} \cdot 8 \text{ ч} = 14040 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 14,040 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

- Светильники с СД, заменяющие светильники с ГЛН: $9 \cdot 20 \text{ Вт} \cdot 10 \text{ ч} = 1800 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 1,800 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

- Светильники с СД, заменяющие светильники с МГЛ: $10 \cdot 90 \text{ Вт} \cdot 10 \text{ ч} = 9000 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 9,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Полное количество энергии, потребляемой в день всеми светильниками с СД, равно $14,040 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 1,800 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 9,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 24,840 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Полное годовое потребление энергии всеми светильниками с СД равно $24,840 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{день} \cdot 365 \text{ дней} = 9066,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Годовые затраты на электроэнергию, потребляемую всеми светильниками с СД, составляют $9066,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 0,822018 \text{ ТЛ/кВт}\cdot\text{ч} = 7452,908 \text{ ТЛ}$.

Срок службы светильника с ЛН равен 1000 ч, а годовая наработка такого светильника равна $8 \text{ ч}/\text{день} \cdot 365 \text{ дней} = 2920 \text{ ч}$. Так что периодичность замены светильника с ЛН составляет $1000 \text{ ч}/(2920 \text{ ч}/\text{год}) = 0,342 \text{ года}$.

Сроки службы светильников с СД колеблется в пределах от 10000 до 50000 ч. Для проведения расчётов был выбран средний срок службы, равный 30000 ч. Так что:

Для светильников с СД, заменяющих светильники с ЛН, годовая

² По состоянию на 10.02.2020 1 ТЛ = 10,65 руб. – Прим. пер.

продолжительность работы равна $8 \text{ ч/день} \cdot 365 \text{ дней} = 2920 \text{ ч}$, так что периодичность замены таких светильников составляет $30000 \text{ ч}/(2920 \text{ ч/год}) = 10,27 \text{ лет}$.

Срок службы светильника с ГЛН равен 3000 ч, а годовая наработка такого светильника равна $10 \text{ ч/день} \cdot 365 \text{ дней} = 3650 \text{ ч}$. Так что периодичность замены светильника с ГЛН составляет $3000 \text{ ч}/(3650 \text{ ч/год}) = 0,822 \text{ года}$.

Для светильников с СД, заменяющих светильники с ГЛН, годовая продолжительность работы равна $10 \text{ ч/день} \cdot 365 \text{ дней} = 3650 \text{ ч}$, так что периодичность замены таких светильников составляет $30000 \text{ ч}/(3650 \text{ ч/год}) = 8,219 \text{ лет}$.

Срок службы светильника с МГЛ равен 8000 ч, а годовая наработка такого светильника равна $10 \text{ ч/день} \cdot 365 \text{ дней} = 3650 \text{ ч}$. Так что периодичность замены светильника с МГЛ составляет $8000 \text{ ч}/(3650 \text{ ч/год}) = 2,191 \text{ лет}$.

Для светильников с СД, заменяющих светильники с МГЛ, годовая продолжительность работы равна $10 \text{ ч/день} \cdot 365 \text{ дней} = 3650 \text{ ч}$, так что периодичность замены таких светильников составляет $30000 \text{ ч}/(3650 \text{ ч/год}) = 8,219 \text{ лет}$.

Стоимости светильников зависят от их марки и компании-производителя. Поэтому на основе результатов исследования рынка были определены средние стоимости светильников, которые приведены в табл. 5.

Капитальные затраты для светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ:

- Светильники с ЛН: $6 \text{ ТЛ} \cdot 117 = 702 \text{ ТЛ}$.

- Светильники с ГЛН: $15 \text{ ТЛ} \cdot 9 = 135 \text{ ТЛ}$.

- Светильники с МГЛ: $90 \text{ ТЛ} \cdot 10 = 900 \text{ ТЛ}$.

Полные капитальные затраты для всех светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ составляют $702 \text{ ТЛ} + 135 \text{ ТЛ} + 900 \text{ ТЛ} = 1737 \text{ ТЛ}$.

Годовые затраты на замену светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ:

- Светильники с ЛН: $6 \text{ ТЛ} \cdot 117/0,342 = 702 \text{ ТЛ}/0,342 = 2052,63 \text{ ТЛ}$.

- Светильники с ГЛН: $15 \text{ ТЛ} \cdot 9/0,822 = 135 \text{ ТЛ}/0,822 = 164,23 \text{ ТЛ}$.

- Светильники с МГЛ: $90 \text{ ТЛ} \cdot 10/2,191 = 900 \text{ ТЛ}/2,191 = 410,77 \text{ ТЛ}$.

Полные годовые затраты на замену всех светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ составляют $2052,63 \text{ ТЛ} + 164,23 \text{ ТЛ} + 410,77 \text{ ТЛ} = 2627,63 \text{ ТЛ}$.

Годовые эксплуатационные расходы для всех светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ = годовая стоимость электроэнергии + полные годовые затраты на замену всех светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ = $34204,168 \text{ ТЛ} + 2627,63 \text{ ТЛ} = 36831,798 \text{ ТЛ}$.

Полные затраты для всех светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ = капитальные затраты + годовые эксплуатационные расходы = $1737 \text{ ТЛ} + 36831,798 \text{ ТЛ} = 38568,798 \text{ ТЛ}$.

Капитальные затраты для светильников с СД:

- Светильники с СД мощностью 15 Вт, заменяющие светильники с ЛН: $40 \text{ ТЛ} \times 117 = 4680 \text{ ТЛ}$.

- Светильники с СД мощностью 20 Вт, заменяющие светильники с ГЛН: $106 \text{ ТЛ} \times 9 = 954 \text{ ТЛ}$.

- Светильники с СД мощностью 90 Вт, заменяющие светильники с МГЛ: $650 \text{ ТЛ} \times 10 = 6500 \text{ ТЛ}$.

Полные капитальные затраты для всех светильников с СД составляют $4680 \text{ ТЛ} + 954 \text{ ТЛ} + 6500 \text{ ТЛ} = 12134 \text{ ТЛ}$.

Годовые затраты на замену светильников с СД:

- Светильники с СД, заменяющие светильники с ЛН: $40 \text{ ТЛ} \cdot 117/10,27 = 4680 \text{ ТЛ}/10,27 = 455,696 \text{ ТЛ}$.

- Светильники с СД, заменяющие светильники с ГЛН: $106 \text{ ТЛ} \cdot 9/8,219 = 954 \text{ ТЛ}/8,219 = 116,07 \text{ ТЛ}$.

- Светильники с СД, заменяющие светильники с МГЛ: $650 \text{ ТЛ} \cdot 10/8,219 = 6500 \text{ ТЛ}/8,219 = 790,85 \text{ ТЛ}$.

Полные годовые затраты на замену всех светильников с СД составляют $455,696 \text{ ТЛ} + 116,07 \text{ ТЛ} + 790,85 \text{ ТЛ} = 1362,616 \text{ ТЛ}$.

Годовые эксплуатационные расходы для всех светильников с СД = годовая стоимость электроэнергии + полные годовые затраты на замену всех светильников с СД = $7452,908 \text{ ТЛ} + 1362,616 \text{ ТЛ} = 8815,524 \text{ ТЛ}$.

Полные затраты для всех светильников с СД = капитальные затраты + годовые эксплуатационные расходы = $12134 \text{ ТЛ} + 8815,524 \text{ ТЛ} = 20949,524 \text{ ТЛ}$.

3.3. Расчёт срока окупаемости

Проведённые расчёты показали, что при использовании светильников с СД затраты оказались выше, чем при использовании светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ. Однако для принятия решения о целесообразности ис-

пользования светильников с СД для освещения караван-сарая Эль-Аман был рассчитан срок окупаемости этих светильников.

Срок окупаемости при замене светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ на светильники с СД можно рассчитать при помощи уравнения (1):

$$C_1 + A_p \cdot C_2 = C_3 + A_p \cdot C_4, \quad (1)$$

где C_1 – капитальные затраты в случае светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ, ТЛ; C_2 – годовые эксплуатационные расходы в случае светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ, ТЛ; C_3 – капитальные затраты в случае светильников с СД, ТЛ; C_4 – годовые эксплуатационные расходы в случае светильников с СД, ТЛ; A_p – срок окупаемости, лет.

Подставив в (1) значения параметров, получаем:

$$1737 \text{ ТЛ} + A_p \cdot 36831,798 \text{ ТЛ} = 12134 \text{ ТЛ} + A_p \cdot 8815,524 \text{ ТЛ}$$

$$A_p \cdot (36831,798 \text{ ТЛ} - 8815,524 \text{ ТЛ}) = 12134 \text{ ТЛ} - 1737 \text{ ТЛ}$$

$$A_p \cdot 28016,274 \text{ ТЛ} = 10397 \text{ ТЛ}$$

$$A_p = 0,371 \text{ лет} = 4,452 \text{ месяцев} = 135,415 \text{ дней}$$

Из результатов расчётов срока окупаемости следует, что затраты на перевод освещения исторического здания на освещение СД окупаются за примерно 135 дней. Этот период определяет энергоэффективность освещения исторических зданий, таких как караван-сарай Эль-Аман.

4. Заключение

На освещение приходится 20 % общего расхода энергии, что обусловило важность использования светильников с СД. Для обеспечения энергоэффективности освещения следует предпочесть светильники с СД, которые потребляют меньше энергии, чем традиционные светильники. В результате ожидается, что использование СД источников света для общего освещения будет непрерывно возрастать.

Расчёты, проведённые применительно к караван-сараяу Эль-Аман, показали, что при использовании светильников с СД годовое количество энергии, расходуемой на внутреннее и наружное освещение, составит 9066,6 кВт·ч. С другой стороны, в случае традиционной осветительной установки, в которой используются светильники с ЛН, ГЛН и МГЛ, годовое потребление энергии оказалось

равным 41610 кВт·ч. Так что при переходе на светильники с СД ожидается уменьшение энергопотребления на примерно 78 % по сравнению с энергопотреблением в случае традиционного освещения, основанного на ЛН, ГЛН и МГЛ.

В случае светильников с СД рассчитанное значение капитальных затрат (12134 ТЛ) оказалось на 86 % большим, чем в случае светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ (1737 ТЛ). Однако годовые эксплуатационные расходы в случае светильников с СД (8815,524 ТЛ) оказались на 76 % меньше, чем в случае светильников с ЛН, ГЛН и МГЛ (36831,798 ТЛ). Согласно результатам расчётов, перевод освещения рассматриваемого исторического здания на СД окупится за примерно 135 дней. По истечении срока окупаемости на освещение будет расходоваться меньше энергии, и энергия будет использоваться более эффективно.

И наконец, низкое энергопотребление светильников с СД даёт ответ на широко обсуждаемый вопрос о том, как сэкономить энергию. Поэтому светильники с СД играют важную роль в обеспечении энергоэффективности освещения исторических зданий. Другими словами, автор описал, как можно управлять энергопотреблением осветительных установок, и показал, что в случае исторических зданий в результате перехода на светильники с СД можно добиться существенно увеличения энергоэффективности освещения.

Автор благодарит ректорат университета Битлис Ерен за оказанную поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Troi, A., Bastian, Z. Energy Efficiency Solutions for Historic Buildings. A Handbook, 2015.
2. www.thornlighting.co.uk (Access date:20.08.2019).
3. Górczewska, M. Some aspects of architectural lighting of historical buildings // Conf. Light in Engineering, Architecture and the Environment, WIT Press, Southampton, Boston, ISSN: 1743–3509, str. 107–116, 2011.
4. https://www.iac.es/system/files/documents/2019-09/opcc-otpc_guide.pdf.(Access date:15.06.2019).
5. Kocaman, B., Rüstemli, S. Comparison of LED and HPS Luminaries in Terms of Energy Savings at Tunnel Lighting // Light &

Engineering. – 2019. – Vol. 27, No. 3. – P. 67–74.

6. Кокаман Б., Рустемли С. Сравнение светильников со светодиодами и натриевыми лампами высокого давления при освещении тоннелей // Светотехника. – 2019. – № 1. – С. 54–60.

7. Claesson, M., Broström, T. Eight years of energy efficiency in historic buildings // Int. Conf. Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings, 19–21.10.2016, Brussels, Belgium.

8. Troi, A. Comfort and energy efficiency in historic buildings – the 3ENCULT experience // Int. Conf. Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings, 19–21.10.2016, Brussels, Belgium.

9. Lucchi, E. Energy Efficiency in Historic Buildings: a Tool for Analysing the Compatibility, Integration and Reversibility of Renewable Energy Technologies // World Renewable Energy Congress, 8–13.05.2011, Linköping, Sweden.

10. Rezabek, C., Mapp, J., Smith, Cavallo, J. Energy Efficient Lighting in Historic Buildings // 2008 American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE) Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2008.

11. Górczewska, M., Mroczkowska, S. Lighting of historical architectonic facilities and buildings using as an example the St. Joseph Church in Poznań // Computer Applications in Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 13. – P. 394–403.

12. Balocco, C., Volante, G. A Method for Sustainable Lighting, Preventive Conservation», Energy Design and Technology Lighting a Historical Church Converted into a University Library, Sustainability 2019, 11, 3145.

13. Khan, N., Abas, N. Comparative study of energy saving light sources // Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15, No. 1. – P. 296–309.

14. Braga, M.F., Nogueira, F.J., Campos, M.F.C., Gouveia, L.H.B., Braga, H.A.C. A comparative study regarding linear fluorescent and LED lamps for indoor lighting // 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 1–7.12.2014, Juiz de Fora, Brazil.

15. Liu, J., Zhang, W., Chu, X., Liu, Y. Fuzzy logic controller for energy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and daylight // Energy Build. – 2016. – Vol. 127, No. 9. – P. 95–104.

16. Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., Roth, B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting // Renewable & Sus-

tainable Energy Reviews. – 2015. – Vol 49, No. 6. – P. 139–147. .

17. Uddin, S., Shareef, H., Mohamed A. Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps // Measurement. – 2013. – Vol. 46, No. 10. – P. 3783–3795.

18. Ozolina, L., Ros'a, M. A review of energy efficiency policy and measures for industries in Latvia // Management of Environmental Quality. – 2012. – Vol. 23, No.5. – P. 517–526, doi:10.1108/14777831211255097.

19. Berg, F., Donarelli, A. Energy performance certificates and historic buildings: a method to encourage user participation and sustainability in the refurbishment process // Int. Conf. Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings, 19–21.10.2016, Brussels, Belgium.

20. http://hasmutlu.com/blog/led-aydinlatma-ve-enerji-verimlilikigi/(Access date: 15.08.2019).

21. Öztürk, A.E., Aşkan, M., Dal, M., Korunur, S., Kaymaz, K. Konutlarda Yapay Aydınlatma Enerjisinin Etkin Yönetimi // Munzur Üniversitesi, Bilim ve Gençlik Dergisi. – 2017. – Vol. 5, No. 2. – P. 1–17.

22. Kamaruzzaman, S.N., Zulkifli, N. A Review of the Lighting Performance in Buildings through Energy Efficiency // 2nd Int. Conf. on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014), 21–22.03.2014, Dubai.

23. http://www.yfu.com/kitapciklar/muzelerde_ve_burolarda_aydinlatma.pdf (Access date:28.09.2019)

24. Uluçay, S. El Aman Hanı ve Köse Hüseyin Paşa Üzerine Bir Değerlendirme // Bitlis Eren Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi. – 2012. – Vol. 1, No. 1. – P. 70–83.

25. Özenc, S., Menteseoğlu, D. İzmir'deki Kent Aydınlatmasına Yönelik Olumsuz Uygulamalar ve Çözüm Önerileri // TMMOB2. İzmir Kent Sempozyumu, 28–30.11.2013. – P. 69–78.



Беҳчет Кокаман
(Behçet Kocaman),
Ph.D. (2015 г.). Доцент кафедры электротехники и электроники
Университета Битлис Ерен, Турция.
Область научных интересов: энерго-

эффективность, освещение, возобновляемые источники энергии, управление электроэнергией, её передача и распределение

Исследование режимов работы системы «светодиодный источник света с управляемым УУ – симисторный светорегулятор»

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

¹ Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск

² Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, Нижний Новгород

E-mail: filatov_da@inbox.ru

Аннотация

Исследовано влияние светорегулятора («диммера») на работу источника света и электромагнитную совместимость управляемой системы освещения (УСО). Установлено, что при снижении активной мощности источника света P снижаются его световой поток и температура нагрева колбы, снижается коэффициент мощности и повышается токовый коэффициент нелинейных искажений УСО. Изменения носят нелинейный характер. Получены математические описания зависимостей этих параметров от P . Сделан вывод,

что при использовании светорегулятора, вместе с возможностью экономии электроэнергии и повышения срока службы УСО, ухудшаются качество электроэнергии и электромагнитная совместимость УСО. Кроме того, показано, что изменения напряжения электропитания влияют на характеристики УСО, особенно его понижение. Сильнее всего это сказывается на световом потоке и температуре нагрева источника света, а также на коэффициенте мощности УСО при значениях P 25 и 50 % от номинального значения $P_{\text{ном}}$, и на токовом коэффициенте нелинейных искажений при P 75 и 100 % от $P_{\text{ном}}$.

Рис. 1. Электротехнический комплекс для исследования УСО «СД ИС – светорегулятор»

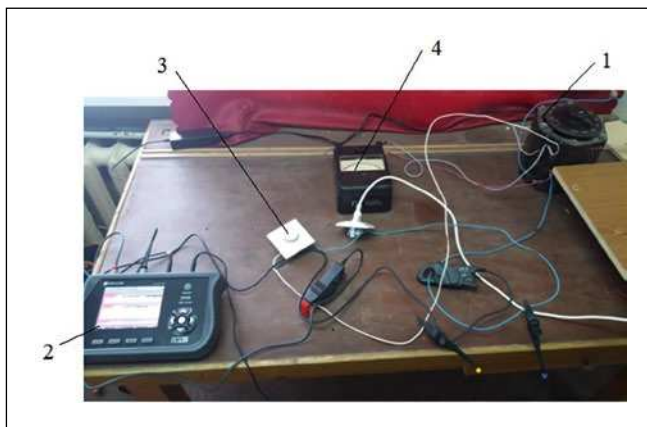
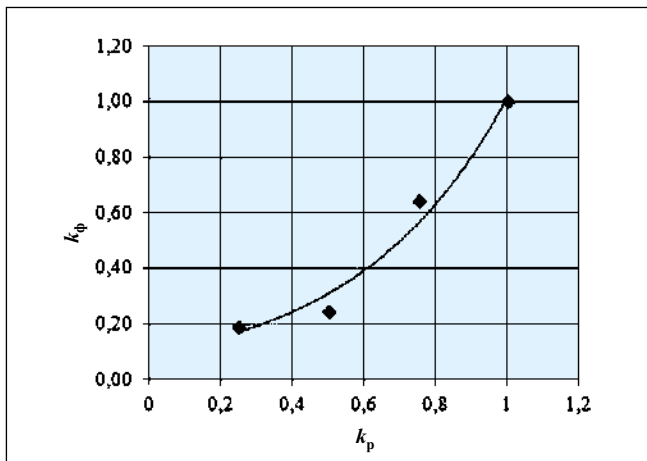


Рис. 2. Зависимость k_{Φ} от k_p



Ключевые слова: симисторный светорегулятор, светодиодный источник света, управляющее устройство (УУ), управляемое УУ.

Введение

В России на освещение расходуется 10 % от всей производимой в стране электрической энергии [1]¹. Рост тарифов на электроэнергию оставляет актуальным вопрос энергосбережения и переход на более энергоэффективные технологии в освещении. Сегодня всё активнее внедряются светодиодные (СД) источники света (ИС), одно из преимуществ которых – лёгкость в управлении. Последнее осуществляется по таким параметрам, как время работы и уровень освещения. Время работы управляется реле времени, а уровень освещения – светорегулятором («диммером»). Анализ работ по управляемым системам освещения (УСО) [2–7] показал их направленность на разработку конфигураций или отдельных элементов и повышение экономической эффективности таких систем. Исследования по влиянию светорегуляторов на работу ИС и электромагнитную совместимость (ЭМС)² УСО практически отсутствуют, и поэтому задача определения влияния светорегуляторов на работу ИС и ЭМС УСО является актуальной.

¹ По ряду других источников, до 15–20 %. – Прим. ред.

² ЭМС технических средств – их способность функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех (ЭМП) другим техническим средствам [8]. Уровень ЭМС в системе электроснабжения – регламентированный уровень кондуктивной ЭМП, используемый в качестве опорного для координации между допустимым уровнем помех, вносимым техническими средствами пользователей электрических сетей, и уровнем помех, воспринимаемым техническими средствами, подключёнными к электрической сети, без нарушения их нормального функционирования. Кондуктивная ЭМП – это электромагнитная помеха, распространяющаяся по проводникам электрической сети [9]. Кондуктивные ЭМП могут ухудшать качество функционирования устройств, электроустановок или систем или вызывать их повреждение [10,11].

Исследование УСО «СД ИС – светорегулятор» проводилось в лаборатории «Светотехника» Нижегородской ГСХА с использованием электротехнического комплекса (рис. 1), содержащего ЛАТР РНО-250–2-М 1, анализатор качества электроэнергии AR-6 фирмы Circutor 2, светорегулятор поворотный ВСП-10–1–0 фирмы IEK 3, вольтметр 4, пульсметр-люксметр ТКА-ПКМ 08 и СД ИС (лампа) PLED-DIM A60 фирмы JazzWay, с возможностью светорегулирования. Мощность светорегулятора – до 400 Вт. Диапазон светорегулирования СД ИС – (25–100)%. Регулирование потребляемой активной мощности ИС P было четырёхступенчатым: $P = K_p \cdot P_{ном}$, где $P_{ном}$ – номинальная P , а $K_p = 0,25, 0,5, 0,75$ и $1,0$.

Результаты и обсуждение

Исследуемыми параметрами УСО являлись световой поток ИС Φ_v , температура нагрева колбы ИС T , коэффициент мощности УСО K_M , токочный коэффициент нелинейных искажений УСО $THDi$ и коэффициент пульсации светового потока ИС K_{II} .

Результаты исследования зависимости этих величин – в виде долей ($k_\Phi, k_T, k_M, k_{THDi}$ и k_{II}) их номинальных значений ($\Phi_{v, ном}, T_{ном}, K_{M, ном}, THDi_{ном}$ и $K_{II, ном}$) – от P – в виде доли (k_p) её номинального значения ($P_{ном}$) – приведены на рис. 2–6.

Эти зависимости носят нелинейный характер и могут быть описаны математически с помощью программы «MS Excel»:

$$k_\Phi = \Phi_v / \Phi_{v, ном} \approx a \cdot \exp(b \cdot k_p), \quad (1)$$

$$k_T = T / T_{ном} \approx a \cdot k_p^2 + b \cdot k_p + c, \quad (2)$$

$$k_M = K_M / K_{M, ном} \approx a \cdot \ln(k_p) + b, \quad (3)$$

$$k_{THDi} = THDi / THDi_{ном} \approx a \cdot k_p^2 + b \cdot k_p + c, \quad (4)$$

$$k_{II} = K_{II} / K_{II, ном} \approx a \cdot k_p^2 + b \cdot k_p + c, \quad (5)$$

где a, b, c – коэффициенты, зависящие от конкретного типа ИС, значения которых в этих выражениях для данно-

Значения коэффициентов в выражениях

Выражение	a	b	c
1	0,095	2,3689	–
2	0,3272	0,2889	0,4014
3	0,1201	1,0135	–
4	– 5,2989	4,5236	1,8197
5	– 1,5888	1,7897	0,8236

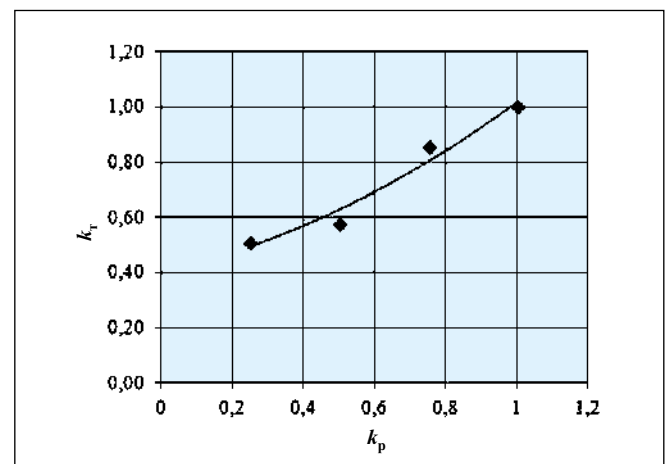
Таблица 2

Результаты абсолютных измерений характеристик

$P, Вт$	K_M	$THDi, \%$	$E^*, лк$	$K_{II}, \%$	$T, ^\circ C$
$U = U_{ном} 220 В$					
3	0,84	92,7	50,2	25,6	41,9
6	0,94	91,3	65,4	26,7	47,1
9	0,99	82,3	171,3	28,8	70
12	1	34,8	266	21,4	81,9
$U 198 В$					
3	0,66	91,9	20,9	22	40,2
6	0,88	90,9	47,9	25,2	46,2
9	0,99	78,3	150,7	27,5	69,3
12	1	29,2	266	20,9	81,9
$U 242 В$					
3	0,9	93	63,5	26,7	43,6
6	0,97	92,1	80	27,2	48,1
9	0,99	86,7	187	29,7	70,7
12	0,9	40	266	21,1	82

* Максимальная освещённость на расстоянии 0,8 м от ИС (её уровень соответствует уровню Φ_v).

Рис. 3. Зависимость k_T от k_p



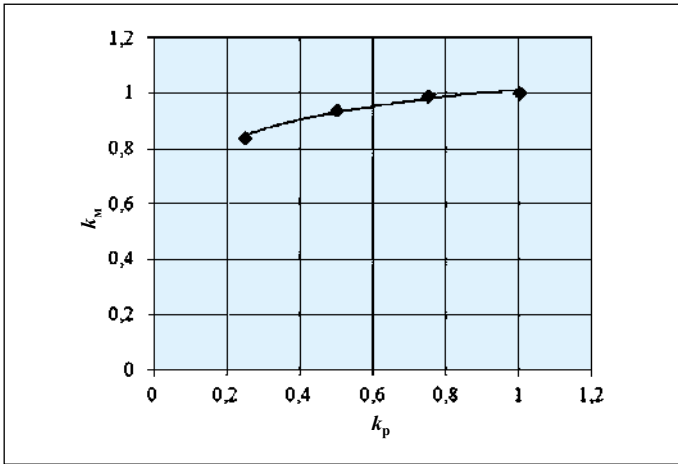


Рис. 4. Зависимость k_M от k_p

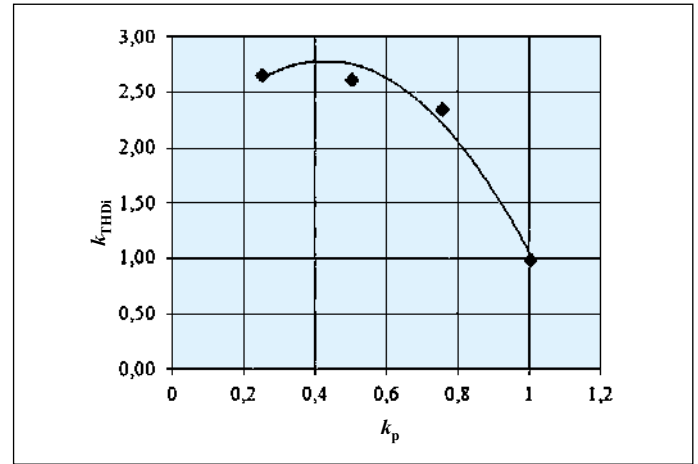


Рис. 5. Зависимость k_{TNDi} от k_p

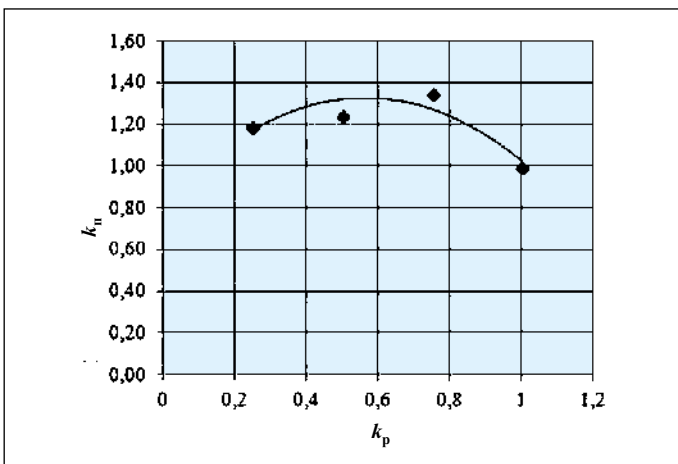


Рис. 6. Зависимость k_n от k_p

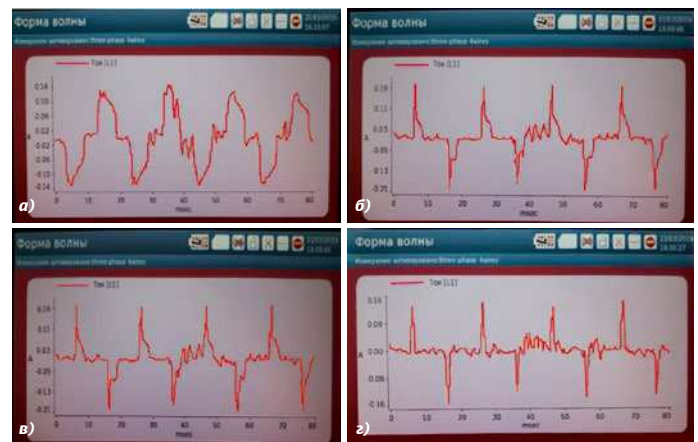


Рис. 7. Осциллограммы тока УСО при $k_p = 1,0$ (а), $0,75$ (б), $0,5$ (в) и $0,25$ (г)

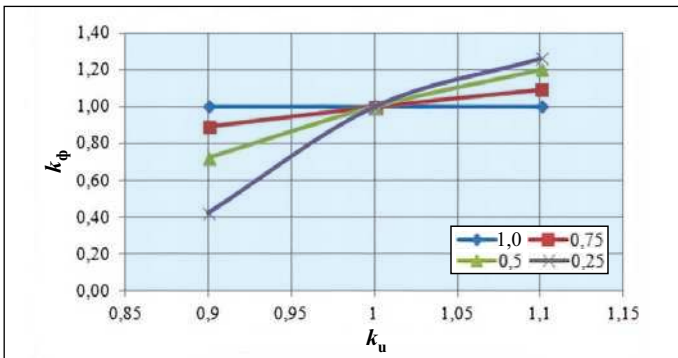


Рис. 8. Зависимость k_ϕ от k_u при $k_p = 1,0, 0,75, 0,5$ и $0,25$

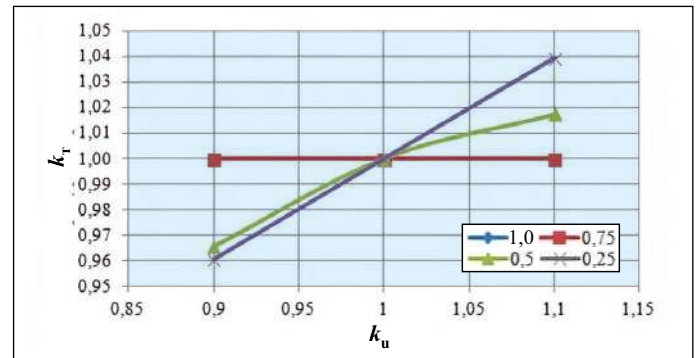


Рис. 9. Зависимость k_T от k_u при $k_p = 1,0, 0,75, 0,5$ и $0,25$

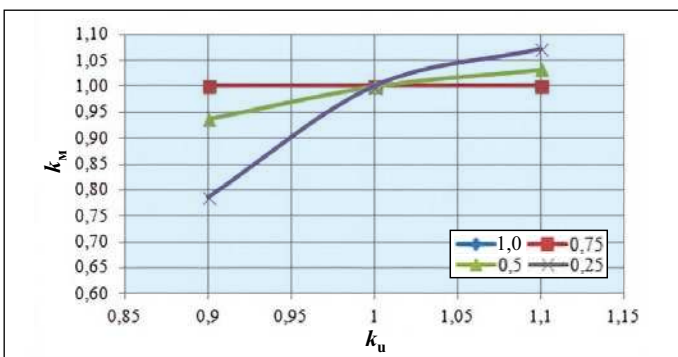


Рис. 10. Зависимость k_M от k_u при $k_p = 1,0, 0,75, 0,5$ и $0,25$

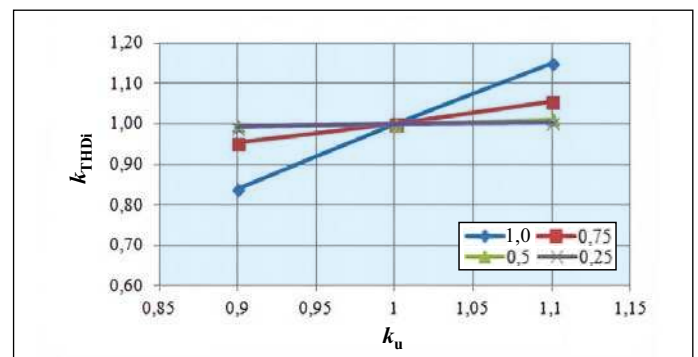
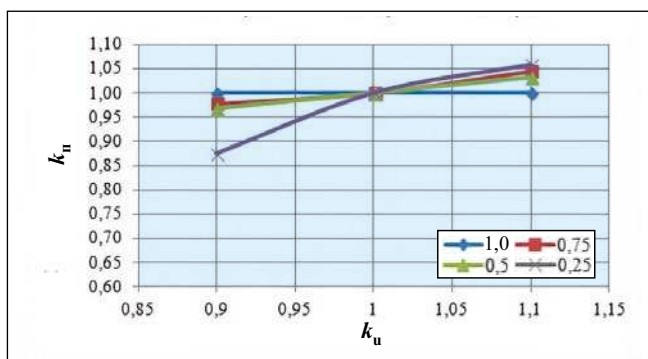


Рис. 11. Зависимость k_{TNDi} от k_u при $k_p = 1,0, 0,75, 0,5$ и $0,25$

Рис. 12. Зависимость $k_{п}$ от k_u при $k_p = 1,0, 0,75, 0,5$ и $0,25$



го исследованного СД ИС приведены в табл. 1.

Отдельно заметим, что понижение k_p и соответствующее повышение k_{THDi} (рис. 5) снижают качество электроэнергии (рис. 7).

Одними из главных показателей этого качества, характеризующих ЭМС, являются медленные изменения напряжения электропитания U . Согласно ГОСТ [9], допустимы отклонения U на границе балансовой принадлежности $\pm 10\%$ от его номинального уровня $U_{ном}$.

Исследования показали отсутствие влияния U на Φ_v , T и K_M в случае СД ИС без светорегулятора.

Результаты подобных исследований УСО со светорегулятором в виде зависимостей $k_{ф}$, k_T , k_M , k_{THDi} и $k_{п}$ от k_u , где $k_u = U/U_{ном}$, приведены на рис. 8–12 (для четырёх значений k_p).

Соответствующие общие результаты измерений в абсолютных единицах приведены в табл. 2.

Заключение

Проведённые исследования показали, что симисторный светорегулятор влияет на работу УСО с СД ИС.

При этом при снижении P снижаются Φ_v , T и K_M и повышаются $THDi$ и $K_{п}$. Эти изменения нелинейны. Получены математические описания зависимостей Φ_v , T , K_M , $THDi$ и $K_{п}$ от P . Можно заключить, что использование светорегулятора («диммера»), наряду с возможностью экономии электроэнергии и увеличения срока службы УСО, даёт снижение качества электроэнергии и повышение $K_{п}$.

Исследование влияния изменения U на характеристики УСО показало нежелательность пониженных уровней U . При $k_p = 0,25$ и $0,5$ это сильнее всего влияет на Φ_v , T , K_M и $K_{п}$, а при $k_p = 0,75$ и $1,0$ – на $THDi$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагин Г.Я., Солнцев Е.Б., Малафеев О.Ю. Оценка характеристик систем освещения в России // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – № 3 (51). – С. 78–86.
2. Николаев П.Л. Архитектура интегрированной в облачную среду системы управления умным домом // Программные продукты и системы. – 2015. – № 2 (110). – С. 65–69.
3. Галлулин Р.Р., Каримов И.И. Эффективность использования светодиодных светильников в тепличных хозяйствах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – № 1. – С. 34–39.
4. Степанчук Г.В., Юдаев И.В., Жарков А.В. Энергоэффективная система облечения в теплице // Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование. – 2016. – № 1 (33). – С. 5–12.
5. Минаев И.Г., Молчанов А.Г., Самойленко В.В. Энергосберегающая система управления источниками оптического облучения в теплицах / Материалы региональной научно-практической конференции «Инновационные разработки молодых учёных Юга России». – Ставрополь: Ставропольский науч.-исслед. ин-т животноводства и кормопроизводства, 2012. – С. 37–40.
6. Асонова М.Л., Ольховой А.А., Ильин С.В. Энергосберегающие технологии для систем освещения промышленных теплиц // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2014. – № 17. – С. 456–459.
7. Плотников В.В., Кураמיшина Л.Ф., Вахитов А.Р. Некоторые аспекты проектирования систем управления светом // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 4, С. 235–239.
8. ГОСТ Р 50397–2011 «Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения».
9. ГОСТ 32144–2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
10. Кондратьева Н.П., Терентьев П.В., Филатов Д.А. Сравнительный экспериментальный анализ по электромагнитной совме-

стимости разрядных и светодиодных искусственных источников света для растениеводства // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 12 (91). – С. 39–49.

11. Кондратьева Н.П., Филатов Д.А., Терентьев П.В. Выбор кабельных линий 0,4 кВ для тепличных комбинатов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 2 (35). – С. 17–25.



Кондратьева Надежда Петровна, доктор техн. наук, профессор. Окончила в 1978 г. Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. Зав. кафедрой «Автоматизированный электропривод» Ижевской государственной сельскохозяйственной академии (ИжГСХА). Имеет свою научную школу в области сельскохозяйственной светотехники и занимается разработкой энергосберегающих световых технологий для предприятий АПК. Имеет звание «Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации»



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

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



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

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

Энергия, информация и запредельные скорости в квантовой электродинамике

Б.А. ВЕКЛЕНКО

Объединённый институт высоких температур (ОИВТ) РАН, Москва
E-mail: veklenkoba@yandex.ru

Аннотация

Без использования теории возмущений на примере рассеяния квантованного электромагнитного поля возбуждённым атомом продемонстрирована допустимость в стандартной квантовой электродинамике сверхсветовых сигналов, переносящих информацию.

Ключевые слова: возбуждённый атом, сверхсветовой сигнал, квантовая электродинамика, рассеяние.

1. Введение

Запредельные или сверхсветовые скорости в оптических системах привлекают к себе повышенное внимание уже много лет. И если вопрос о передачи информации со сверхсветовыми скоростями после работ Х. Лоренца, А. Пуанкаре и А. Эйнштейна в классической физике полностью закрыт, то в квантовой оптике такого категорического утверждения сделать нельзя.

В классической физике состояние электромагнитного поля описывают векторы напряжённости электромагнитного поля $E^v(\mathbf{r}, t)$ и векторы индукции магнитного поля $B^v(\mathbf{r}, t)$, определённые в каждой точке пространства \mathbf{r} в любой момент времени t . Оказывается удобным вместо этих векторов в рационализированной гауссовой системе единиц с нулевым скалярным потенциалом использовать векторный потенциал электромагнитного поля $A^v(\mathbf{r}, t)$, такой, что

$$E^v(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} A^v(\mathbf{r}, t), \quad B^v(\mathbf{r}, t) = \text{rot} \mathbf{A}(\mathbf{r}, t),$$

где c – скорость света в вакууме. Использование векторного потенциала удобно, поскольку вместо двух величин $E^v(\mathbf{r}, t)$ и $B^v(\mathbf{r}, t)$ приходится иметь дело с одной величиной $A^v(\mathbf{r}, t)$. Ниже, вместо $E^v(\mathbf{r}, t)$ мы часто будем использовать $A^v(\mathbf{r}, t)$, имея в виду, что связь между ними достаточно проста. В квантовой физике состояние электромагнитного поля как и состояния частиц, обладающих конечной массой, описывает волновая функция $\psi(t)$. Аналоги классических величин в квантовой оптике вычисляются как «квантовые средние» от соответствующих квантовых операторов $\langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle = \langle \psi(t) | \hat{A}^v(\mathbf{r}) | \psi(t) \rangle$. Используя принцип соответствия между квантовой и классической теориями, можно предположить, что имеющие классический аналог «средние величины» в квантовой теории электромагнитного поля не должны изменяться со скоростями, превышающими скорость света в вакууме c . Остаётся вопрос: нельзя ли превзойти c за счёт дисперсий, то есть за счёт квантовых флуктуаций? Такая возможность апри-

ори не закрыта, скорее наоборот [1]. Если, интересуясь скоростью электромагнитного сигнала, генерируемого в точке $\mathbf{r} = 0$ в момент времени $t = 0$, мы поставим целью измерить через время t напряжённость электромагнитного поля $\hat{E}^v(\mathbf{r}, t)$ в точке \mathbf{r} на баллистическом (переднем) фронте этого сигнала, то вмешается соотношение неопределённостей Гейзенберга. Согласно определению $\hat{E}^v = f^v / q$, где f^v – сила, действующая на пробный заряд q , помещённый в точку измерения \mathbf{r} . Но $f^v = dp^v / dt$, где p^v – импульс пробного заряда, измеряемый в точке \mathbf{r} . Соотношение неопределённостей показывает, что в один и тот же момент времени точно определённых \mathbf{r} и \mathbf{p} не существует. Поэтому не существует одновременно точно определённых \mathbf{r} и $E^v(\mathbf{r}, t)$. Возникает квантовый разброс координат, искажающий передний фронт сигнала – дисперсия. Часть экспериментальных точек окажется за баллистическим фронтом, характеризуемым амплитудой $\langle \hat{E}^v(\mathbf{r}, t) \rangle = \langle \psi(t) | \hat{E}^v(\mathbf{r}, t) | \psi(t) \rangle$, а другая часть – впереди него, определяя сверхсветовой сигнал. Таким образом, в ряде экспериментов можно предвидеть регистрацию сверхсветовых сигналов. Мы констатируем принципиальную необходимость появления сверхсветовых сигналов в квантовой оптике, способных воздействовать на измерительные приборы, и потому переносящих информацию. Заметим, что рассмотренная дисперсия координат в оптических измерениях не сказывается на точности измерения самой скорости света. Дело в том, что расстояние между источником излучения и координатой измерения может быть выбрано произвольно большим.

Какова природа сверхсветовых сигналов? Согласно сказанному, они опережают баллистический фронт классического сигнала, и потому среднее значение напряжённости поля в них отсутствует: $\langle \psi(t) | \hat{E}^v(\mathbf{r}) | \psi(t) \rangle = 0$, но от-

личной от нуля будет дисперсия: $\langle \psi(t) | \hat{E}^v(\mathbf{r}) \hat{E}^v(\mathbf{r}) | \psi(t) \rangle \geq 0$.

Таковыми свойствами обладают фотоны [2], у которых отсутствуют электрическая и магнитная составляющие, но энергия оказывается конечной величиной. Таким образом, нерелятивистская квантовая механика частиц конечной массы предсказывает существование неклассических состояний электромагнитного поля, могущих формировать сигналы, обладающие скоростями, превышающими c . Здесь важно подчеркнуть, что такие сигналы способны действовать на пробные электроны, возбуждать атомы, переносить энергию и информацию. Заметим, что исторически существование фотонов, наоборот, было предсказано (1905 г.) до построения квантовой теории нерелятивистских частиц (1925–1926 гг.).

Теперь возникают два вопроса: сколь велики пространственные области сверхсветовых сигналов и существует ли предел этих скоростей?

2. Качественное рассмотрение

Для ответа на эти вопросы ниже исследуется появление сверхсветовых сигналов в более чётком их проявлении в другой квантовой системе.

Пусть поперечно поляризованный свет, генерируемый плотностью классического тока $f^v(\mathbf{r}, t)$, рассеивается атомом, расположенным в точке \mathbf{R} . Согласно квантовой теории, рассеяние света возбуждённым атомом представляется как виртуальный процесс поглощения рассеиваемого фотона и последующего процесса излучения этим уже возбуждённым атомом рассеянного кванта. Такой процесс рассеяния требует времени и в состоянии лишь замедлить баллистическую скорость электромагнитной волны. Но при рассеянии света возбуждённым атомом существует другой квантовый процесс [3], заключающийся в предварительно спонтанном испускании этим возбуждённым атомом фотона с переходом атома в невозбуждённое состояние и лишь затем (когда рассеянный квант уже начал своё движение) в поглощении невозбуждённым теперь атомом рассеиваемого кванта. Такой сложный процесс описывается единой волновой функцией. По этой причине рассеянный и рассеиваемый фотоны оказываются взаимно коррелированы, и процесс в целом носит характер рассеяния. Классическая трактовка этого процесса подсказывает, что такое инверсное рассеяние фотона возбуждённым атомом позволяет получить выигрыш в расстоянии ct , где t – время корреляции фотонов. Впереди баллистического (переднего) фронта на расстоянии ct возникает сверхсветовой предвестник. Если изначально атом находился в основном состоянии, то такая инверсная возможность рассеяния также существует, но оказывается несущественной в силу нерезонансности процесса.

Разумеется, приведённые рассуждения не имеют доказательной силы и требуют подробного исследования. До сего времени сверхсветовые сигналы, переносящие информацию в стандартной квантовой электродинамике, не появлялись.

Обозначим волновую функцию квантовой системы: электромагнитное поле плюс рассеивающий атом после процесса рассеяния через Ψ . Разложим эту функцию по полной системе волновых функций ψ_i рассеивающего атома:

$$\Psi = f_0\psi_0 + \sum_{i \neq 0} f_i\psi_i = f_0\psi_0 + (\Psi - f_0\psi_0),$$

где начальное состояние атома ψ_0 выделено в отдельное слагаемое. Из-за ортогональности волновых функций атома ψ_0 и $\psi_i (i \neq 0)$ скалярное произведение функций обращается в ноль:

$$\langle f_0\psi_0 | \sum_{i \neq 0} f_i\psi_i \rangle = \langle f_0\psi_0 | \Psi - f_0\psi_0 \rangle = 0.$$

Если в результате рассеяния атом остался в исходном состоянии ψ_0 , то такой процесс рассеяния будем называть когерентным [4]. Этому процессу отвечает волновая функция электромагнитного поля f_0 . Если ψ_0 отвечает воз-

буждённое состоянию, то f_0 , согласно сказанному выше, в частности, описывает сверхсветовые сигналы. Если в результате рассеяния волновая функция атома меняется, то такой процесс по определению считается некогерентным.

Наблюдаемые на опыте величины вычисляются как квантовые средние от соответствующих квантовых операторов. Например, имеющая классический аналог, и потому не обладающая сверхсветовыми скоростями, напряжённость электрического поля $E^v(\mathbf{r}, t)$ представима в виде

$$\begin{aligned} \langle \hat{E}^v(\mathbf{r}, t) \rangle &= \langle \Psi(t) | \hat{E}^v(\mathbf{r}) | \Psi(t) \rangle = \langle f_0\psi_0 | \hat{E}^v(\mathbf{r}) | f_0\psi_0 \rangle + \\ &+ \langle \Psi - f_0\psi_0 | \hat{E}^v(\mathbf{r}) | \Psi - f_0\psi_0 \rangle = \langle \hat{E}^v(\mathbf{r}, t) \rangle_{\text{coh}} + \langle \hat{E}^v(\mathbf{r}, t) \rangle^{\text{noh}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Перекрёстное (интерференционное) слагаемое здесь выпадает из-за ортогональности атомных волновых функций. Первое слагаемое правой части (1) описывает когерентное рассеяние и при рассеянии на возбуждённом атоме, согласно сказанному выше, – сверхсветовые сигналы. Второе слагаемое описывает процессы некогерентного рассеяния, в частности вынужденные процессы рассеяния, при которых исходное состояние ψ_0 рассеивателя изменяется на ортогональное ему $\psi_i (i \neq 0)$. Только интерференция когерентного и некогерентного каналов рассеяния исключает в (1) сверхсветовые сигналы в окончательном результате. В свою очередь, это означает, что при рассеянии на возбуждённом атоме волновые функции некогерентного канала $f_i (i \neq 0)$ также описывают сверхсветовые сигналы противоположного знака. Важно заметить, что сверхсветовые сигналы в виртуальных состояниях возникают в расчётах квантовой электродинамики автоматически и исчезают из окончательного результата лишь как следствие интерференции каналов рассеяния. Если интерференцию нарушить, то, очевидно, сверхсветовые сигналы попадут в результат, что нетрудно сделать.

Пусть нас интересуют билинейные нормально-упорядоченные произведения операторов электромагнитного поля $\langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle$, определяющие собой его локальные энергетические характеристики¹. Величину $\langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle$ можно оценить снизу следующим образом.

Очевидно, $\langle (\hat{E}^v)^2 \rangle \geq \langle \hat{E}^v \rangle \langle \hat{E}^v \rangle$. Аналогично можно показать [2], что если электромагнитное поле обладает преимущественными компонентами с волновым вектором \mathbf{k}_0 , то после усреднения по координатному интервалу порядка длины волны оказывается, что

$$\langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle \geq \langle \hat{E}^v \rangle^2. \quad (2)$$

Таким образом, $\langle \hat{E}^v \rangle$ определяет оценку снизу для исковой $\langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle$. Справедливость неравенства (2) не зави-

¹ Оператор \hat{N} называется оператором нормального упорядочения операторов. Его наличие в формулах не сказывается на понимании дальнейшего материала [2].

сит от того конкретного состояния, по которому производится квантовое усреднение, и не связано с теорией возмущений.

Если теперь по аналогии с (1) величину $\langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle$ представить в виде суммы когерентной и некогерентной компонент как

$$\begin{aligned} \langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle &= \\ &= \langle f_0 \psi_0 | \hat{N}(\hat{E}^v)^2 | f_0 \psi_0 \rangle + \langle \Psi - f_0 \psi_0 | \hat{N}(\hat{E}^v)^2 | \Psi - f_0 \psi_0 \rangle = \\ &= \langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle_{\text{coh}} + \langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle^{\text{ncoh}} \end{aligned}$$

и применить к каждому слагаемому правой части этой суммы формулу (2), то найдём, что

$$\begin{aligned} \langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle &\geq \langle f_0 \psi_0 | \hat{E}^v | f_0 \psi_0 \rangle^2 + \\ &+ \langle \Psi - f_0 \psi_0 | \hat{E}^v | \Psi - f_0 \psi_0 \rangle^2 = \langle \hat{E}^v \rangle_{\text{coh}}^2 + \langle \hat{E}^v \rangle^{\text{ncoh}2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Теперь в силу положительной определённости слагаемых в правой части последнего неравенства сверхсветовые сигналы в разных каналах взаимно компенсироваться не будут, и избежать их в результате не удастся. Теория предсказывает, таким образом, их появление в измерениях $\langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle$, то есть измерениях энергии электромагнитного поля.

3. Количественная теория

Приведём некоторые результаты точных расчётов, следующих из основных уравнений квантовой электродинамики, изложенных в Приложении. Эти результаты получены путём решения уравнения (П. 1) методом \hat{S} -матрицы рассеяния и диаграмм Р. Фейнмана.

Будем считать для простоты, что рассеивающий атом обладает двумя энергетическими уровнями. Энергию атома, на котором происходит рассеяние, обозначим как ε_{j_0} , а энергию другого состояния атома как ε_{j_2} . Допустим, эти энергетические уровни могут обладать энергетически вырожденными магнитными подуровнями, по которым может осуществляться суммирование.

Сначала будем считать, что рассеивающий атом находится в невозбуждённом (основном) состоянии. Основным каналом рассеяния здесь будет когерентный канал. Некогерентный канал рассеяния осуществляет здесь нерезонансный малый вклад в результат. Решение уравнения (П. 1), описывающее рассеянное электромагнитное поле, при этом выглядит так [2]:

$$\begin{aligned} \langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle_{\text{coh}} &= \int T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) \theta(\varepsilon_{j_2} - \varepsilon_{j_0}) \theta\left[(c(t-t_3) - \right. \\ &\left. - |\mathbf{r} - \mathbf{R}| - |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}| \right] d\mathbf{r}_3 dt_3 + c.c., \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) = \frac{i}{16\pi^2 c^3 \hbar} \left(\frac{e}{m} \right)^2 \sum_{j_2} p_{j_0 j_2}^{v_1} p_{j_0 j_2}^{v_2*} (\delta_{v_1} - n^v n^{v_1}) \times$$

$$\begin{aligned} &\times (\delta_{v_2 v_3} - n_3^{v_2} n_3^{v_3}) j^{v_3}(\mathbf{r}_3, t_3) \frac{\theta(t-t_3)}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}| |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}|} \times \\ &\times \theta\left[(c(t-t_3) - |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}|) \right] j^v(\mathbf{r}_3, t_3) \exp \times \\ &\times \left[-i \frac{\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2}}{c \hbar} (c(t-t_3) - |\mathbf{r} - \mathbf{R}| - |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}|) \right], \\ n_3^v &= \frac{(\mathbf{r}_3 - \mathbf{R})^v}{|\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}|}. \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку $\varepsilon_{j_2} - \varepsilon_{j_0} > 0$, выражение (4) описывает рассеяние сигнала на невозбуждённом атоме. Ступенчатая функция Хевисайда $\theta\left[(c(t-t_3) - |\mathbf{r} - \mathbf{R}| - |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}|) \right]$ следит за тем, чтобы скорость распространения баллистического фронта рассеянного сигнала не превосходила скорость распространения классической электромагнитной волны в вакууме. Другими словами, имеющая классический аналог величина не распространяется быстрее скорости света. Выражение (4) описывает только рассеянный сигнал. Здесь опущен распространяющийся без рассеяния сигнал

$$\langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle = \frac{1}{4\pi} (\delta_{v v_1} - n^v n^{v_1}) \int \frac{j^{v_1} \left(\mathbf{r}_1, t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|}{c} \right)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} d\mathbf{r}_1.$$

Иначе обстоит дело при рассеянии электромагнитного поля возбуждённым атомом. Здесь рассеяние осуществляется по двум, когерентному и некогерентному, каналам рассеяния. Решение уравнения (П. 1) показывает, что [2], согласно когерентному каналу,

$$\begin{aligned} \langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle_{\text{coh}} &= \int T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) \theta(\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2}) \theta\left[(|\mathbf{r} - \mathbf{R}| + \right. \\ &\left. + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}| - c(t-t_3)) \right] d\mathbf{r}_3 dt_3 + c.c., \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, когерентный канал, оставляющий рассеивающий атом в первоначальном состоянии, согласно функции Хевисайда $\theta\left[(|\mathbf{r} - \mathbf{R}| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}| - c(t-t_3)) \right]$, в согласии с выводами раздела 2, мгновенно формирует рассеянный сигнал на любых расстояниях $|\mathbf{r} - \mathbf{R}|$ от рассеивающего атома, если только $|\mathbf{r} - \mathbf{R}| - c(t-t_3) + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}| > 0$. Мы имеем дело с бесконечно большой скоростью формирования этого сигнала. В классической оптике такой процесс рассеяния отсутствует.

Для некогерентного канала рассеяния, изменяющего квантовое состояние рассеивающего атома, рассеянный сигнал описывается следующей формулой [2]:

$$\langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle^{\text{ncoh}} = - \int T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) \theta(\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2}) d\mathbf{r}_3 dt_3 + c.c. \quad (7)$$

Этот сигнал охватывает как зону за баллистическим фронтом $|\mathbf{r} - \mathbf{R}| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}| < c(t-t_3)$ так и сверхсветовую зону $|\mathbf{r} - \mathbf{R}| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}| > c(t-t_3)$, расположенную перед баллисти-

ческим фронтом. Такой канал рассеяния также не имеет классического аналога. Наличие функции $\vartheta(\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2})$ свидетельствует о том, что некогерентный канал рассеяния возникает только при рассеянии света на возбуждённых атомах.

Воспользовавшись тем, что полный, имеющий классический аналог, рассеянный сигнал определяется суммой (1) каналов рассеяния, находим следующее:

$$\begin{aligned} \langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle &= \langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle_{\text{coh}} + \langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle^{\text{noh}} = \\ &= -\int T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) \theta(\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2}) \theta[c(t - t_3) - \\ &\quad - (|\mathbf{r} - \mathbf{R}| - |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}|)] d\mathbf{r}_3 dt_3 + c.c. \end{aligned} \quad (8)$$

Как и следовало ожидать, полный, определяемый амплитудой $\hat{A}^v(\mathbf{r}, t)$, сигнал, возникающий в результате рассеяния электромагнитного поля на возбуждённом атоме, полностью расположен за баллистическим фронтом волны и сверхсветовыми свойствами не обладает. Сверхсветовые компоненты амплитуд $\langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle_{\text{coh}}$, и $\langle \hat{A}^v(\mathbf{r}, t) \rangle^{\text{noh}}$, согласно формулам (6) и (7), взаимно уничтожают друг друга в результате интерференции. Выражение (8) может быть без труда получено из полуклассической теории излучения, оперирующей нековантованным электромагнитным полем.

Иначе обстоит дело с энергией электромагнитного поля. Для переменного во времени электромагнитного поля отличие от нуля функции $\langle \hat{N}(\hat{A}^v)^2 \rangle$ гарантирует отличие от нуля искомой $\langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle$. По аналогии с формулой (3)

$$\begin{aligned} \langle \hat{N}(\hat{A}^v)^2 \rangle &\geq \langle f_0 \psi_0 | \hat{A}^v | f_0 \psi_0 \rangle^2 + \langle \Psi - f_0 \psi_0 | \hat{A}^v | \Psi - f_0 \psi_0 \rangle^2 = \\ &= \langle \hat{A}^v \rangle_{\text{coh}}^2 + \langle \hat{A}^v \rangle^{\text{noh}2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Функции $\langle \hat{A}^v \rangle_{\text{coh}}$ и $\langle \hat{A}^v \rangle^{\text{noh}}$, как указано выше, каждая

в отдельности обладают сверхсветовыми компонентами. Поскольку в формуле (9) содержатся квадраты этих функций, то сверхсветовые компоненты не могут теперь компенсировать друг друга в результате интерференции. Таким образом, энергия рассеянного электромагнитного сигнала

$\langle \hat{N}(\hat{E}^v)^2 \rangle$, или (согласно нашим соглашениям) функция $\langle \hat{N}(\hat{A}^v)^2 \rangle$, представляется равенством

$$\begin{aligned} \langle \hat{N}(\hat{A}^v(\mathbf{r}, t))^2 \rangle &= \\ &= \left(\int T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) \theta(\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2}) \theta[(|\mathbf{r} - \mathbf{R}| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}| - \right. \\ &\quad \left. - c(t - t_3))] d\mathbf{r}_3 dt_3 + c.c. \right)^2 + \end{aligned}$$

$$+ \left(\int T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) \theta(\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2}) d\mathbf{r}_3 dt_3 + c.c. \right)^2.$$

Это равенство можно переписать как

$$\begin{aligned} \langle \hat{N}(\hat{A}^v(\mathbf{r}, t))^2 \rangle &= \\ &= \left(\int T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) \theta(\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2}) \theta[c(t - t_3) - \right. \\ &\quad \left. - |\mathbf{r} - \mathbf{R}| - |\mathbf{r}_3 - \mathbf{R}|] d\mathbf{r}_3 dt_3 + c.c. \right)^2 + \\ &+ 2 \left(\int T^v(\mathbf{r}, \mathbf{r}_3, t, t_3) \theta(\varepsilon_{j_0} - \varepsilon_{j_2}) \theta[|\mathbf{r} - \mathbf{R}| + |\mathbf{r}_3 - \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{R}| - c(t - t_3)] + c.c. \right) d\mathbf{r}_3 dt_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Первое слагаемое в (10) описывает обычный оптический рассеянный сигнал, возникающий и в теории нековантованного поля. Он может быть рассчитан посредством векторов $E^v(\mathbf{r}, t)$ и $B^v(\mathbf{r}, t)$ и стандартных нековантованных уравнений Максвелла. Второе слагаемое описывает возникший перед этим сигналом сверхсветовой квантовый предвестник. Последний занимает ту область пространства, в которой $E^v(\mathbf{r}, t) = 0$ и $B^v(\mathbf{r}, t) = 0$, и при этом обладает конечной энергией. Это означает, что предвестник имеет неклассическую природу и напоминает поле планковских фотонов, обладающих подобными свойствами. Ещё более удивительно, что формулы квантового предвестника не содержат постоянную Планка \hbar и относятся к редкому семейству формул квантовой теории, обладающих таким свойством. Последнее становится очевидным, если предположить, что роль рассеивающего атома выполняет квантовый осциллятор. Здесь $p_{j_0 j_2}^v \propto \sqrt{\hbar}$, и, согласно (5), постоянная Планка из расчётов выпадает.

Ещё раз подчеркнём, что предвестник обладает энергией и может переносить информацию со сверхсветовой скоростью. Более того, поскольку второе слагаемое в формуле (10) ничем не ограничивает вектор \mathbf{r} , то это означает, что с помощью предвестника сигналы могут передаваться с бесконечно большой скоростью. Наличие энергетических ширин у рассеивающего атома сказывается на ограничении величины $|\mathbf{r} - \mathbf{R}|$, что уменьшает эффективное значение скорости света в измерениях [6].

4. Заключение

В настоящем обзоре не использованы никакие новые гипотезы. В нём рассмотрены лишь известные уравнения квантовой электродинамики, следствия из которых, оказывается, предсказывают наличие в природе сверхсветовых скоростей переноса энергии. Бесконечные скорости в квантовой теории, вообще говоря, хорошо известны. Такой скоростью обладает коллапс волновой функции при экспериментальной фиксации электрона в некоторой точке пространства. Другой пример следует из свойства симметрии волновых функций тождественных частиц. Если принудительно нарушить структуру такой функции в некоторой локальной точке пространства, то симме-

трия волновой функции немедленно (бесконечно быстро) восстановится. Подобный эффект встречается и в парадоксе Эйнштейна-Подольского-Розена [7]. Отличительной особенностью разобранный в настоящей работе примера служит следующая из уравнений квантовой электродинамики очевидная возможность передачи энергии и информации с бесконечно большой скоростью. Такая скорость обусловлена не скоростью света, а скоростью передачи корреляционных свойств волновых функций, описывающих состояние квантовой системы [8]. Бесконечно большая скорость инвариантна относительно преобразования Лоренца, и поэтому нарушить этого преобразования не может.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Нерелятивистская квантовая механика может быть описана разными математическими аппаратами. Наиболее известны из них матричный метод Гейзенберга (1925 г.) и метод дифференциальных уравнений Шрёдингера (1926 г.).

Принято говорить, что квантовая механика может быть изложена в представлении Гейзенберга или в представлении Шрёдингера. Оба метода приводят к совпадающим результатам. В квантовой электродинамике это свойство теряется [9], и, по сути дела, эти два представления приходится рассматривать как две разные теории. Выбор между ними может указать эксперимент или внутренняя противоречивость одной из них. Квантовая электродинамика в представлении Гейзенберга не приводит к наличию сверхсветовых сигналов [9], что противоречит основам квантовой теории, изложенной во введении. По этой причине в настоящем обзоре используется только представление Шрёдингера. В пользу этого представления указывает и эксперимент [6], в котором исследовался сверхсветовой сигнал, переносящий энергию.

Приложение

Ниже в представлении Шрёдингера приводится уравнение квантовой электродинамики, следствия которого анализируются в настоящем обзоре. Пусть квантованное электромагнитное поле, генерируемое плотностью классического тока $j^v(\mathbf{r}, t)$, рассеивается атомом, расположенным в точке \mathbf{R} . Будем считать, что атом обладает одним валентным электроном с координатой \mathbf{r} , и спиновыми эффектами пренебрежём. Волновая функция системы подчиняется уравнению Шрёдингера [2]

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\zeta, t)}{\partial t} = \left(\int \hat{\psi}^+ \hat{H}_a \hat{\psi} d\mathbf{r} + \hat{H}_{ph} - \frac{e}{mc} \int \hat{\psi}^+ \hat{p}_r^v \hat{A}^v \hat{\psi} d\mathbf{r} - \frac{1}{c} \int j^v \hat{A}^v d\mathbf{r} \right) \Psi(\zeta, t). \quad (\text{П. 1})$$

Ограничимся квазирезонансным приближением, опустим в гамильтониане член, пропорциональный \hat{A}^2 , используем калибровку с нулевым скалярным потенциалом и рационализированную гауссову систему единиц. В уравнении (П. 1) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \hat{H}_a &= \frac{\hat{p}_r^2}{2m} + U(\mathbf{r} - \mathbf{R}), \quad \hat{H}_{ph} = \\ &= \sum_{\mathbf{k}\lambda} \hbar c k \hat{\alpha}_{\mathbf{k}\lambda}^+ \hat{\alpha}_{\mathbf{k}\lambda}, \quad \hat{p}_r^v = -i\hbar \nabla_r^v, \quad \hat{\psi}(\mathbf{r}) = \sum_j \psi_j(\mathbf{r} - \mathbf{R}) \hat{b}_j, \\ \hat{\psi}^+(\mathbf{r}) &= \sum_j \psi_j^*(\mathbf{r} - \mathbf{R}) \hat{b}_j^+, \quad \hat{A}^v(\mathbf{r}) = \\ &= \sum_{\mathbf{k}\lambda} \sqrt{\frac{\hbar c}{2kV}} e_{\mathbf{k}\lambda}^v (\hat{\alpha}_{\mathbf{k}\lambda}^v e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} + \hat{\alpha}_{\mathbf{k}\lambda}^+ e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}}), \quad \zeta = \dots, \zeta_{\mathbf{k}\lambda}, \dots, \\ \hat{\alpha}_{\mathbf{k}\lambda} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\zeta_{\mathbf{k}\lambda} + \frac{\partial}{\partial \zeta_{\mathbf{k}\lambda}} \right), \quad \hat{\alpha}_{\mathbf{k}\lambda}^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\zeta_{\mathbf{k}\lambda} - \frac{\partial}{\partial \zeta_{\mathbf{k}\lambda}} \right). \end{aligned}$$

Через \hat{b}_j и \hat{b}_j^+ обозначены операторы уничтожения и рождения атома, описываемого волновой функцией $\psi_j(\mathbf{r} - \mathbf{R})$ и обладающего внутренней энергией ε_j , V – объём квантования. В температурно невырожденном газе можно считать, что эти операторы подчиняются перестановочным соотношениям полей Бозе-Эйнштейна. Единичные векторы $e_{\mathbf{k}\lambda}^v$, перпендикулярные волновому вектору \mathbf{k} описывают линейную поляризацию поля фотонов ($\lambda = 1, 2$). Через $U(\mathbf{r} - \mathbf{R})$ обозначена потенциальная энергия электрона в атоме, m – масса электрона. По повторяющимся индексам v здесь и ниже подразумевается суммирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – С. 100.
2. Векленко Б.А. Нестационарное рассеяние квантованного электромагнитного поля на возбуждённом атоме // Прикладная физика. – 2010. – № 3. – С. 10–17.
3. Левич В. Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. Ч. II. – М.: Физматгиз, 1962. – С. 663.
4. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика. В 10 томах. Том IV. Квантовая электродинамика. – М.: Наука, 1980. – С. 257.
5. Векленко Б.А. Природа фотона и квантовая оптика // Светотехника. – 2018. – № 1. – С. 7–14.
6. Векленко Б.А., Малахов Ю.И., Нгуен К.Ш. Сверхсветовые сигналы в квантовой оптике // Инженерная физика. – 2013. – № 5. – С. 25.
7. Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н. Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным? // УФН. – 1936. – Т. 16. – С. 436–457.
8. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация // УФН. – 1994. – Т. 164. – С. 449–530.
9. Векленко Б.А. Сверхсветовые скорости и неэквивалентность представлений Шрёдингера и Гейзенберга в квантовой электродинамике // Инженерная физика. – 2013. – № 11. Инженерная физика. – С. 3–9.



Векленко Борис Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил в 1955 г. МЭИ. Главный научный сотрудник ОИВТ РАН. Область научных интересов (в настоящее время): вопросы квантовой теории излучения

Применение призматических панелей для оптимизации размера окна, обращённого на юг, и глубины помещения для наиболее эффективного использования естественного света¹

Б. КЁСЕ, Т. КАЗАНАСМАЗ

Измирский технический институт, Турция
E-mail: tugcekanasmaz@iyte.edu.tr

Аннотация

В данном исследовании рассмотрено действие призматических панелей, которые могут использоваться для затенения в глубоких помещениях с боковым доступом естественного света, что позволяет определить наименьшее допустимое значение отношения площади окна к площади стены (ООС), всё ещё обеспечивающее требуемое естественное освещение при разной глубине помещения. Методология основана на создании базовой модели в *Relux* и тестировании её с использованием альтернативных моделей со ступенчатым изменением значений ООС и глубины помещения. Исходя из минимальных требований МКО, было установлено, что наиболее удовлетворительное значение пространственной автономности естественного освещения (ПАЕО), равное 48,54 %, реализуется в помещении глубиной 12 м с равным 67 % значением ООС. Равные 51,59 и 59,26 % значения ПАЕО были получены в помещениях глубиной 9 м с ООС, равным 43 %, и глубиной 6 м с ООС, равным 30 %. Для всех глубин помещений и равного 30 % наименьшего из рассмотренных значения ООС были определены наименьшие значения годовой естественной экспозиции. В исследовании применён новый, основанный на инновационных системах перенаправления дневного света подход, позволяющий сформулировать предложения по пересмотру требований, содержащихся в стандартах на естественное освещение зданий и сформулированных применительно к традиционному остеклению.

Ключевые слова: естественный свет, призматические панели, окна, глубина помещения.

1. Введение

В стандартном освещённом блоку помещении с вертикальным окном зона эффективного естественного освещения примыкает к окну, тогда как участки, находящиеся дальше от этой зоны, получают значительно меньше естественного света [1]. Увеличение размера окна для расширения эффективной зоны естественного освещения может способствовать небольшому увеличению уровня естественной освещённости в дальней части помещения, но приводит к чрезмерной солнечной засветке примыкающей к окну части помещения [2]. Это непропорциональное распределение естественного света в пространстве приводит к тепловому и зрительному дискомфорту в передней части помещения, в то время как в его задней части требуется дополнительное искусственное освещение, что нежелательно для наблюдателей [3, 4]. Следовательно, определение подходящего соотношения размеров помещения и окна в соответствии с климатическими условиями является важным условием обеспечения зрительного комфорта и экономии энергии [5]. Равномерное распределение освещения требуется для достижения желаемого зрительного и теплового комфорта, что особенно важно в жарких регионах.

Использование обычных солнцезащитных устройств, таких как шторы или жалюзи, уменьшает количество естественного света, попадающего в комнату, и ухудшает распределение дневного света в пространстве [6–8]. По этой причине были предложены инновационные системы естествен-

ного освещения, позволяющие устранить недостатки традиционных методов. Например, призматические панели для перенаправления естественного света улучшают его распределение за счёт затенения и перенаправления солнечного света [9–11].

Целью данного исследования является, прежде всего, рассмотрение работы призматических панелей для определения оптимального соотношения размера окна и геометрии помещения при установке призматических панелей в окнах. Вторая цель – обеспечение как можно более глубокого проникновения естественного света в помещения с разной глубиной и разными значениями отношения площади окна к площади стены (ООС) и ограничение чрезмерного прямого солнечного освещения, которое может оказать негативное воздействие на находящихся в помещении людей. Ещё одним важным параметром является климат Измира, позволяющий судить о том, можно ли применять призматическую систему в соответствующей географической и климатической зоне.

2. Моделирование рассматриваемого помещения

2.1. Измерение естественной освещённости и оптических характеристик материалов

Базовое помещение представляет собой глубокую комнату размером 6×12 м и высотой 3,8 м. Размер окна составляет 5,5×2,8 м. Измерения естественной освещённости проводились 21 декабря 2017 года три раза, в 9:30, 12:30 и 15:30, в условиях облачного неба. 19 точек измерения были расположены с шагом 0,6 м вдоль средней линии комнаты, перпендикулярной окну. Оптические характеристики материалов были определены с использованием яркомера и люксметра в соответствии с [5]. Коэффициенты отражения стен, потолка и пола оказались равными 0,90, 0,85 и 0,60 соответственно. Остекление имеет коэффициент пропускания 0,80.

Проверка правильности полученных результатов осуществлялась посредством сравнения того, насколько хорошо результаты моделирования в *Relux* совпадают с фактическими результатами измерений. Коэффициенты детерминации (R^2) были рассчитаны для определения точности модели и состава

¹ Перевод с англ. А.Г. Савицкой

вили 0,93, 0,99, 0,97 для моментов времени 9:30, 12:30 и 15:30 соответственно, что говорит о высокой точности расчётов в программе *Relux*.

2.2. Призматическая панель в модели *Relux*

Для повышения качества естественного освещения помещений были выбраны призматические панели *Siteco 45/45* компании *Siteco* [12]. Они напоминают размещённые внутри окна жалюзи с равным 45° углом наклона пластин. Призматические панели были установлены в верхней части окна на высоте между 2,00 и 3,80 м над уровнем пола. Такое расположение панелей относительно уровня глаз предотвращает возможность появления бликов при перераспределении естественного света призматическими панелями. Нижняя часть окна позволяет смотреть наружу. Расстояние между панелями было установлено равным 0,30 м. Во всех помещениях, имеющих разные глубины и ООС, были установлены одинаковые призматические панели (рис. 1), характеристики которых приведены в табл. 1.

2.3. Альтернативные варианты

Альтернативные глубины помещений и размеры окон были выбраны в соответствии с приводимым в литературе нормами и смоделированы в *Relux*. Во-первых, при помощи приведённого в [13] уравнения (1) была определена предельная глубина помещения:

$$\frac{L}{W} + \frac{L}{H_w} < \frac{2}{1 - R_b}, \quad (1)$$

где L – глубина помещения, W – ширина помещения, H_w – высота верхнего бруса оконной коробки над уровнем пола, R_b – средний коэффициент отражения поверхностей в дальней половине помещения.

Согласно (1), максимальная допустимая глубина помещения оказалась равной 9 м, и чтобы избежать недостаточной освещённости в дальней половине помещения и её дополнительного электрического освещения глубина помещения не должна превышать это значение. С учётом этого предельного значения, были определены три отношения глубины помещения к его ширине (AR):

Рис. 1. Схематическое изображение принципа действия призматических панелей и их применения

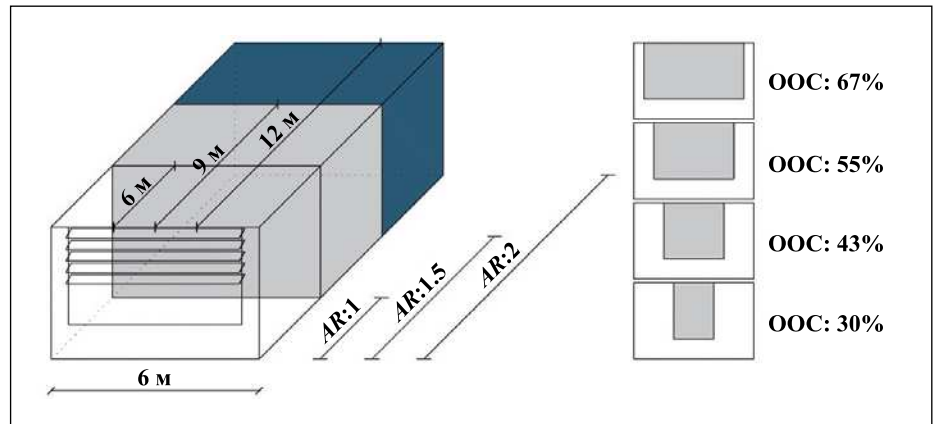
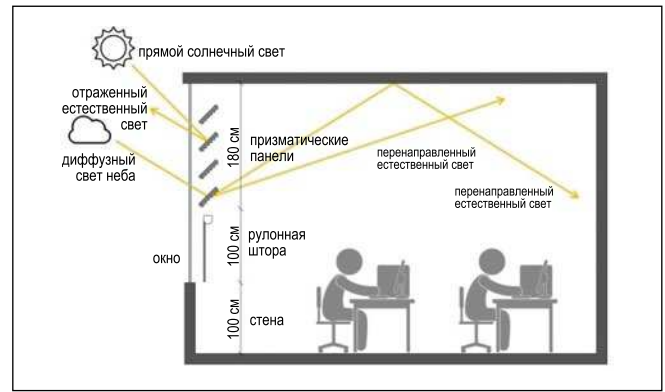


Рис. 2. Схематическое представление этапов определения AR и ООС

$AR = 1$ (при глубине помещения 6 м, меньшей предельного значения).

$AR = 1,5$ (при глубине помещения 9 м, равной предельному значению).

$AR = 2$ (при глубине помещения 12 м, превышающей предельное значение).

Поскольку большие окна увеличивают солнечную засветку, а также вызывают чрезмерный нагрев помещения и зрительный дискомфорт, при каждом значении AR площадь окна ступенчато уменьшалась, как это показано на рис. 2. Начиная с исходного варианта с ООС, равным 67 %, ширину окна на каждом шаге уменьшали на 50 см с обеих сторон до достижения минимально допустимого значения ООС, равного 30 % [14].

В соответствии с [14], коэффициенты отражения стен, потолка и пола были заданы равными 0,50, 0,85 и 0,20 соответственно. Точки измерения располагались с шагом 60 см на расстоянии 75 см от пола и 60 см от стен. Таким образом, для помещений глубиной 12, 9 и 6 метров количества точек измерения оказались равными 171, 126 и 81 соответственно. Моделирование проводилось применительно к дням солнцестояния и равноденствия и времени суток 10:00, 13:00

и 16:00. Навес с прозрачностью 10 % располагался в нижней части окна, чтобы избежать чрезмерного воздействия солнечного света, поскольку все оценки проводились применительно к ясному небу МКО и выходящему на юг помещению. В случае облачного неба дополнительный навес не понадобится, поэтому будет возможна зрительная связь с внешней средой.

3. Результаты

Ожидается, что количество точек измерения с освещённостью, большей чем 300 лк, будет наибольшим, а количество точек измерения с освещённостью, большей чем 1000 лк, будет наименьшим. В соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК), пространственная автономность естественного освещения (ПАЕО) (*Spatial Daylight Autonomy*) должна быть не меньшей, чем 55 %, а годовая естественная экспозиция (ГЕО) (*Annual Sunlight Exposure*) не должна превышать 7 %..

Для упрощения расчётов освещённость в каждой точке измерения считалась неизменной на протяжении некоторого процента от годового ра-

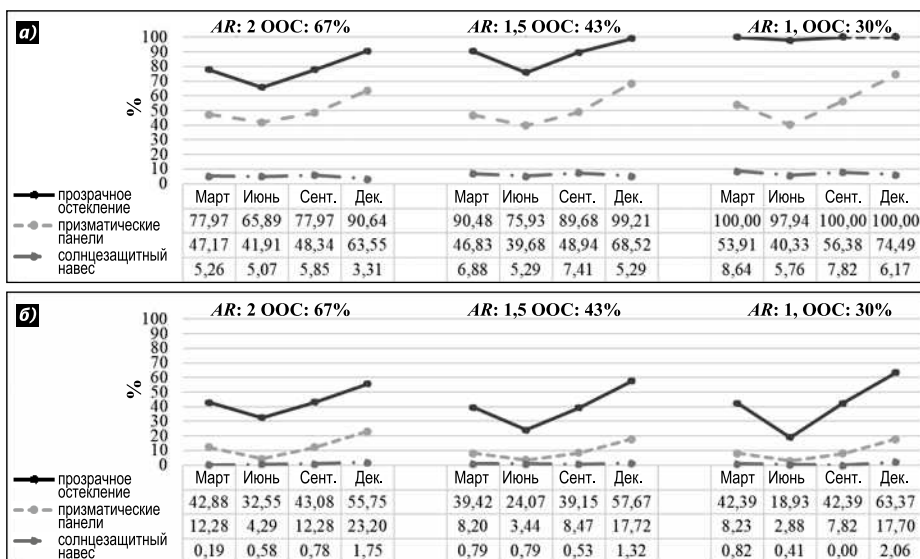


Рис. 3. Естественное освещение помещений с ООС, оптимальными для связанных с глубиной помещения значений AR : (а) – освещённость превышает 300 лк; (б) – освещённость превышает 1000 лк

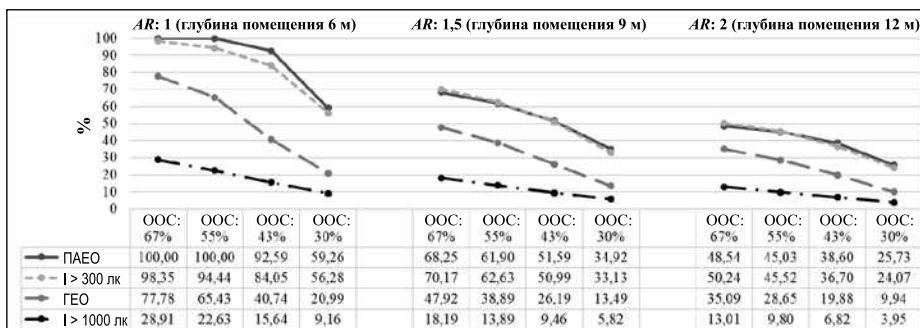


Рис. 4. Значения ПАЕО и ГЕО и выраженные в процентах площади участков, на которых освещённость превышает или равна 300 или 1000 лк

бочего времени. Например, предполагалось, что освещённость в каждой точке измерения, смоделированная в *Relux* для 10:00 21 марта, сохраняется в весенние месяцы в период с 8:00 до 11:00 на протяжении 180 рабочих часов, что составляет 7,5 % от общего годового рабочего времени (при 2400 рабочих часах в год). Аналогичным образом, освещённости, рассчитанные применительно к 13:00 и 16:00, сохраняются, соответственно, в период с 11:00 до 15:00 на протяжении 240 рабочих часов и в период с 15:00 до 18:00 на протяжении 180 рабочих часов, что составляет, соответственно, 10 и 7,5 % от общего годового рабочего времени. Этот же метод был использован для 21 июня, 23 сентября и 21 декабря. В результате был определена выраженная в процентах от общего годового рабочего времени продолжительность времени, на протяжении которого освещённость в точке измерения оказывается не меньшей

чем 300 лк. Точки измерения, освещённости в которых оказываются не меньшими чем 300 лк, на протяжении не менее 50 % рабочих часов в год, были отмечены на рабочей плоскости, и отношение количества этих точек к общему количеству точек измерения было рассчитано для определения значения ПАЕО. Для расчёта ГЕО были определены точки измерения, в которых освещённость превышала 1000 лк в течение более 250 рабочих часов в год, и было рассчитано отношение количества этих точек к общему количеству точек измерения.

При равном 2 значении AR (глубина помещения 12 м), ООС, равное 67 %, оказалось соответствующим оптимальным размерам окна, обеспечивающим достаточный уровень естественной освещённости (более чем 300 лк) на 50,24 % площади, тогда как прямой солнечный свет попадал в этом случае на 13,01 % площади (освещённость при этом превышала

1000 лк). Значения естественной освещённости в помещении уменьшились из-за обеспечиваемого призматическими панелями затенения, но все ещё оставались на приемлемом уровне. При равном 1,5 значении AR (глубина помещения 9 м) доля площади с освещённостью выше чем 300 лк сократилась почти вдвое по сравнению с незатенённым помещением и составила 50,99 %, в случае помещения с ООС, равным 43 %. Что касается равного 1 значения AR (глубина помещения 6 м), то оптимальной оказалась конфигурация с ООС, равным 30 %, поскольку в этом случае адекватное естественное освещение обеспечивалось на 56,28 % площади помещения (рис. 3).

4. Общая оценка

- Зимой дневной свет проникает в помещения глубже из-за более низкого положения солнца, а освещённость увеличивается по всём помещению. Призматические панели не способны защитить от солнца в эти месяцы, и косые солнечные лучи, проходящие между панелями, приводят к значительному увеличению освещённости до уровней, превышающих 1000 лк. Это чрезмерное количество естественного света является причиной реализации высоких значений ГЕО.

- Летом количество естественного света, попадающего в помещение, уменьшается из-за более высокого положения солнца. При этом солнцезащитное действие панелей более заметно, так как солнечный свет, падающий под прямым углом, отражается структурой призмы. Это приводит к уменьшению участков, на которых освещённость превышает 1000 лк, что обеспечивает в эти месяцы ГЕО, попадающие в пределы допустимого диапазона значений.

- Весной и осенью количество естественного света, попадающего в помещение, и его распределение практически одинаковы. Значения освещённости в помещении выше, чем летом, и ниже, чем зимой.

- Доля площадей участков с освещённостью, превышающей 300 лк, рассчитанное безотносительно к конкретным промежуткам времени, практически точно соответствует полученному для рассматриваемого пространства значению ПАЕО. Однако расчётное значение ГЕО значительно

Характеристики призматических панелей

Ширина, мм	Соответствует окну
Длина, мм	750
Толщина, мм	12
Прозрачность, %	65
Преломляющий угол призмы, град.	45

превышает выраженную в процентах относительную площадь участков, на которых освещённость больше или равна 1000 лк (рис. 4).

- В помещении глубиной 12 м наиболее удовлетворительное согласно МЭК значение ПАЕО оказалась равным 48,54 % при ООС, равном 67 %. ПАЕО, равные 51,59 и 59,26 %, были обеспечены, соответственно, в помещении глубиной 9 м с ООС, равным 43 %, и в помещении глубиной 6 м с ООС, равным 30 %.

- Значения ГЕО, полученные для всех вариантов помещения, превысило равное 7 % значение ГЕО, предельно допустимое согласно рекомендациям МЭК. Самые близкие значения ГЕО были получены при равном 30 % наименьшем значении ООС при всех глубинах помещения. Эти значения составили 9,94, 13,49 и 20,99 % в помещениях глубиной, соответственно, 12, 9 и 6 м.

5. Выводы

Данное исследование дополнит список литературы, посвящённой обеспечению «полезного» естественного освещения, то есть естественного освещения, не создающего чрезмерную экспозицию, улучшающего зрительную работоспособность и, тем самым, производительность труда и самочувствия находящихся в помещении людей. Современные стандарты на естественное освещение и предыдущие исследования в этой области содержат требования к размерам окон для имеющих разную геометрию помещений, но только для обычного остекления. Однако в данном исследовании подчёркивается, что прозрачного остекления без какой-либо системы регулирования естественного освещения недостаточно для удовлетворения требований к зрительной работоспособности в помещениях, используемых, в основном, в дневное время, та-

ких как в учебных и офисных зданиях. Показано, что можно эффективно управлять естественным освещением при помощи современных систем, таких как призматические панели на вертикальных окнах. Во избежание проблем, связанных с количеством и распределением естественного света, на ранних стадиях проектирования было бы полезным рассмотрение таких систем одновременно с определением размеров оконных проёмов. Таким образом, в данном исследовании для помещений с установленными внутри окон призматическими панелями получены зависящие от глубины помещения оптимальные значения ООС и рекомендован пересмотр требований к естественному освещению, содержащихся в действующих стандартах на естественное освещение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reinhart, C. F. A simulation-based review of the ubiquitous window-head-height to daylit zone depth rule-of-thumb // Proc. of the 9th Int/ IBPSA Conf. August 15–18, 2005, Montréal, Canada.
2. Kim, J., Wineman J. Are windows and views really better? A quantitative analysis of the economic and psychological value of views // New York: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. – 2005.
3. Bayram, G., Kazanasmaz, T. Simulation based retrofitting of an educational building in terms of optimum shading device and energy efficient lighting criteria // Light and Engineering. – 2016. – Vol. 24, No. 2. – P. 45–55.
4. Байрам Г., Казанасмаз Т. Оптимизация солнцезащитных устройств и повышение энергоэффективности искусственного освещения учебного здания // Светотехника. – 2016. – № 4. – С. 44–52.
5. Littlefair, P.J. Solar shading of buildings. London: Construction Research Communications by permission of Building Research Establishment. – 1999.
6. Laura, B., Marino, C., Minichiello, F., Pedace, A. An overview on solar shading

Таблица

systems for buildings // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 62. – P. 309–317.

7. Ünver, R. Prediction of interior daylight availability for external obstructions in Istanbul // Light and Engineering. – 2009. – Vol. 17, No. 3. – P. 54–64.

8. Юнвер Р. Прогноз возможности естественного освещения помещений при наличии наружных препятствий (в условиях Стамбула) // Светотехника. – 2009. – № 2. – С. 35–40.

9. Ruck, N., Aschehoug, Ø., Aydinli, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkowweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Michel, L., Scartezzini, J-L, Selkowitz, S. Daylight in Buildings-A source book on daylighting systems and components // Lawrence Berkeley National Laboratory: Washington, DC, USA. – 2000.

10. Kazanasmaz, T., Firat Örs, P. Comparison of advanced daylighting systems to improve illuminance and uniformity through simulation modeling // Light and Engineering. – 2014. – Vol. 22, No. 3. – P. 56–66.

11. Ёрс П.Ф., Казанасмаз Т. Расчётное сравнение современных систем естественного освещения в целях улучшения уровня и равномерности освещённости // Светотехника. – 2015. – № 1. – С. 28–35.

12. Siteco Stationary and Movable Prism Systems. [Online] Available from: <https://www.siteco.com/en/home> [Accessed August 2017].

13. BS8206–2:1992. Code of Practice for daylighting. London: BSI. – 1992.

14. van Dijk, D., Platzer, W.J. Reference office for thermal, solar and lighting calculations // IEA-SHC Task 27. – 2001.



Бюшра Кёсе (Büşra Köse), М. Sc.(2019 г.). Аспирантка (Ph.D.) факультета архитектуры Измирского технического университета. Область научных интересов: проектирование освещения и энергоэффективность зданий



Туğче Казанасмаз (Tuğçe Kazanasmaz), Ph.D., профессор. Профессор кафедры архитектуры Измирского технического университета, Измир, Турция. Имеет 19-летний опыт преподавания в области архитектурного освещения, строительной физики и энергоэффективного проектирования

О вариантах основной формулы атмосферной коррекции

О.В. НИКОЛАЕВА

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва
E-mail: nika@kiam.ru

Аннотация

Исследуется точность основной формулы атмосферной коррекции, позволяющей определять альbedo подстилающей (земной) поверхности по коэффициенту энергетической яркости отражающей системы атмосфера-подстилающая поверхность. Задача атмосферной коррекции рассматривается в трёхмерной геометрии с учётом пространственной неоднородности подстилающей поверхности. Показано, как точность восстановления альbedo зависит от применяемого варианта основной формулы.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, коэффициент энергетической яркости, альbedo поверхности, многомерные эффекты.

Введение

При дистанционном зондировании Земли из космоса измеряются значения интенсивности (энергетической яркости) солнечного излучения (СИ)¹, отражённого системой атмосфера-подстилающая (земная) поверхность (ПП). По этим значениям и известным значениям интенсивности внеатмосферного СИ находится коэффициент энергетической яркости (КЯ)² этой системы. Задача атмосферной коррекции состоит в исключении из КЯ атмосферных искажений и определении альbedo (коэффициента отражения) ПП. Впоследствии по полученным альbedo можно определять состав и свойства ПП.

В задачах атмосферной коррекции, как правило, атмосфера предполагается горизонтально однородной, а ПП – неоднородной. ПП и верхняя граница атмосферы разбиваются на пиксели. Основная формула атмосферной коррекции связывает альbedo в земных пикселях и значения КЯ в атмосферных пикселях.

Первоначально основная формула была найдена в предположении, что в атмосферный пиксель попадает СИ только с расположенного точно под ним земного пикселя. Иначе говоря, задача решалась в приближении независимых пикселей (*Independent Pixel Approximation, IPA*). При этом интенсивность СИ в задаче с произвольным значением альbedo ПП была представлена комбинацией этой интенсивности с чёрной (неотражающей) и с красной (изотропно излучающей) ПП [1]. Формула позволяет явно определять альbedo ПП по значению КЯ и активно используется в задачах атмосферной коррекции [2].

При повышении пространственного разрешения появилась необходимость учитывать, какой вклад в регистриру-

емый в каждом атмосферном пикселе сигнал вносит излучение, отражённое от каждого земного пикселя. Здесь используются два способа.

Первый способ опирается на эмпирическое обобщение *IPA*-модели, в котором КЯ в атмосферном пикселе зависит от альbedo в соответствующем земном пикселе и альbedo окружения данного пикселя [3]. Здесь возможно использовать явный и, соответственно, быстрый алгоритм, в котором сначала находятся все альbedo окружения, а затем – альbedo всех земных пикселей [3–5].

Во втором способе строится система нелинейных уравнений, в которой учитывается не только отражение СИ от земного пикселя в атмосферный, но и переотражение между земными пикселями [6]; неизвестными величинами являются альbedo всех земных пикселей. Решение такой системы уравнений крайне времязатратно. Оно может быть несколько ускорено за счёт упрощения системы уравнений при исключении переотражения между далеко расположенными земными пикселями. При выполнении атмосферной коррекции в горной местности при моделировании переотражения между земными пикселями приходится учитывать рельеф [7].

В работе [8] предложена формула атмосферной коррекции, явно связывающая альbedo в каждом земном пикселе с КЯ во всех атмосферных пикселях. Формула позволяет оперативно находить альbedo в каждом пикселе с учётом переотражения от других пикселей [9]. Формула опирается на представление интенсивности СИ в задаче с произвольным значением альbedo ПП линейной комбинацией интенсивностей в задаче с чёрной ПП и в задачах с ПП с одним белым (отражающим всё излучение по закону Ламберта) пикселем и остальными чёрными пикселями.

В настоящей работе предложена другая явная формула, использующая традиционную линейную комбинацию интенсивностей в задаче с чёрной ПП и в задачах с одним красным и остальными чёрными пикселями, а также рассматривается вопрос об идентичности этих вариантов формулы и их точности при восстановлении альbedo пространственно-неоднородной ПП.

Задача о переносе света в атмосфере

Рассмотрим задачу переноса монохроматического излучения в трёхмерной области (рис. 1):

$$\begin{aligned} \hat{T}^{3D} I = & \mu \frac{\partial I}{\partial z} + \xi \frac{\partial I}{\partial x} + \eta \frac{\partial I}{\partial y} + k(x, y, z) I(x, y, z, \mu, \varphi) - \\ & - k_s(x, y, z) \int_{\Omega} P(x, y, z, \gamma_s(\mu, \mu', \varphi, \varphi')) \\ & I(x, y, z, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

¹ Подразумевается, что все светотехнические величины в статье спектральные. – Прим. ред.

² В «Справочной книге по светотехнике», под общ. ред. Ю.Б. Айзенберга и Г.В. Бооса, 2019 (п. 2.2.3.5.1) принято другое название этой безразмерной величины – «показатель энергетической яркости». – Прим. ред.

$$\begin{aligned} -X < x < X, \quad -Y < y < Y, \quad 0 < z < H, \\ -1 < \mu < 1, \quad 0 < \varphi < 2\pi, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\xi = \sin \theta \cos \varphi, \quad \eta = \sin \theta \sin \varphi, \quad \mu = \cos \theta,$$

$$\gamma_s(\mu, \mu', \varphi, \varphi') = \mu \mu' + \sqrt{1 - \mu^2} \sqrt{1 - (\mu')^2} \cos(\varphi - \varphi'). \quad (3)$$

Здесь решение $I(x, y, z, \mu, \varphi)$ – интенсивность СИ в пространственной точке с координатами (x, y, z) в направлении $\Omega(\mu = \cos \theta, \varphi)$. Коэффициент экстинкции $k(x, y, z)$, коэффициент рассеяния $k_s(x, y, z)$ и индикатриса рассеяния $P(x, y, z, \gamma_s)$ в общем случае зависят как от высоты z , так и от горизонтальных координат x, y . Индикатриса рассеяния зависит от величины $\gamma_s(\mu, \mu', \varphi, \varphi')$ – косинуса угла между направлениями (μ, φ) и (μ', φ') .

На верхней границе, $z = 0$, трёхмерной области $-X < x < X, -Y < y < Y, 0 < z < H$ (рис. 1) задано условие падения параллельного пучка СИ в направлении $\Omega_0(\mu_0 = \cos \theta_0, \varphi_0)$:

$$\begin{aligned} I(x, y, 0, \mu, \varphi) = I_0 \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \text{ при } \mu > 0, \\ -X < x < X, \quad -Y < y < Y. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь I_0 – интенсивность внеатмосферного СИ, а δ – дельта-функция Дирака.

На нижней границе, $z = H$, зададим отражение от поверхности по закону Ламберта:

$$\begin{aligned} I(x, y, H, \mu, \varphi) = A(x, y) \frac{1}{\pi} \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I(x, y, H, \mu', \varphi') \\ \text{при } \mu < 0, \quad -X < x < X, \quad -Y < y < Y. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $A(x, y)$ – альbedo ПП в точке (x, y) . Будем предполагать, что ПП разбита на N непересекающихся пикселей U_j . В пределах каждого пикселя альbedo ПП зададим его средним значением:

$$A_j = \frac{1}{|U_j|} \iint_{U_j} dx dy A(x, y). \quad (6)$$

Здесь $|U_j|$ – площадь j -го пикселя. На облучённых боковых границах, где $\gamma_s(\mu, \mu_0, \varphi, \varphi_0) > 0$, задаётся краевое условие вида (4). На необлучённых боковых границах, где $\gamma_s(\mu, \mu_0, \varphi, \varphi_0) < 0$, задаётся нулевое краевое условие. Таким образом, имеем соотношения

$$\begin{aligned} I(-X, y, z, \mu, \varphi) = J(\mu, \varphi) \text{ при } \xi > 0, \\ -Y < y < Y, \quad 0 < z < H, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I(X, y, z, \mu, \varphi) = J(\mu, \varphi) \text{ при } \xi < 0, \\ -Y < y < Y, \quad 0 < z < H, \end{aligned} \quad (8)$$

$$I(x, -Y, z, \mu, \varphi) = J(\mu, \varphi) \text{ при } \eta > 0,$$

$$-X < x < X, \quad 0 < z < H, \quad (9)$$

$$I(x, Y, z, \mu, \varphi) = J(\mu, \varphi) \text{ при } \eta < 0,$$

$$-X < x < X, \quad 0 < z < H, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} J(\mu, \varphi) = I_0 \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \text{ при } \gamma_s(\mu, \mu_0, \varphi, \varphi_0) > 0, \\ J(\mu, \varphi) = 0 \text{ при } \gamma_s(\mu, \mu_0, \varphi, \varphi_0) < 0. \end{aligned} \quad (11)$$

В качестве решения задачи (1)–(11) будем рассматривать средние по каждому атмосферному пикселю значения КЯ

$$R_j = \frac{1}{|U_j|} \frac{\pi}{\mu_0 I_0} \iint_{U_j} dx dy I(x, y, 0, \tilde{\mu}, \tilde{\varphi}). \quad (12)$$

Координаты $(\tilde{\mu}, \tilde{\varphi})$ определяют направление отражённого СИ. Далее рассматривается только отражение в зенит $\Omega_{\text{zenith}}(\tilde{\mu} = -1, \tilde{\varphi} = 0)$ (рис. 1). Заметим, что для других направлений $(\tilde{\mu}, \tilde{\varphi})$ все последующие рассуждения также справедливы.

Для каждого земного пикселя определим также коэффициент пропускания атмосферы:

$$T_j = \frac{1}{|U_j| \pi I_0} \iint_{U_j} dx dy \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I(x, y, H, \mu', \varphi'). \quad (13)$$

Определение альbedo поверхности

Найдём явную зависимость КЯ от альbedo ПП. Для этого введём базовые функции как решения следующих задач:

- *Задача с чёрной поверхностью:*

$$\hat{T}^{3D} I^b = 0, \quad I^b(x, y, H, \mu, \varphi) = 0 \text{ при } \mu < 0,$$

$$I^b(x, y, 0, \mu, \varphi) = I_0 \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \text{ при } \mu > 0. \quad (14)$$

- *Задачи с поверхностью, состоящей из одного белого и остальных чёрных пикселей:*

$$\begin{aligned} \hat{T}^{3D} I_i^w = 0, \quad I_i^w(x, y, 0, \mu, \varphi) = I_0 \delta(\mu - \mu_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \\ \text{при } \mu > 0, \end{aligned} \quad (15)$$

$$I_i^w(x, y, H, \mu, \varphi) = a_i(x, y) \frac{1}{\pi} \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_i^w(x, y, H, \mu', \varphi')$$

при $\mu < 0$,

$$a_i(x, y) = 0 \text{ при } (x, y) \notin U_i, \quad a_i(x, y) = 1 \text{ при } (x, y) \in U_i.$$

- *Задачи с поверхностью, состоящей из одного красного и остальных чёрных пикселей:*

$$\hat{T}^{3D} I_i^r = 0, \quad I_i^r(x, y, 0, \mu, \varphi) = 0 \text{ при } \mu > 0,$$

$$I_i^r(x, y, H, \mu, \varphi) = a_i(x, y) I_0 \text{ при } \mu < 0. \quad (16)$$

На боковых границах в задачах (14) и (15) используются краевые условия (7)–(10), а в задаче (16) – нулевые краевые условия.

Представим решение задачи (1)–(11) как линейную комбинацию «чёрной» и «красных» базовых функций – решений задач (14) и (16):

$$I(x, y, z, \mu, \varphi) = I^b(x, y, z, \mu, \varphi) + \sum_{i=1}^N \gamma_i I_i^r(x, y, z, \mu, \varphi). \quad (17)$$

Действительно, при любых значениях величин γ_i функция (17) удовлетворяет уравнению (1) и краевым условиям (4), (7)–(10). Краевое условие (5) в j -ом пикселе для функции (17) имеет вид

$$\gamma_j = \left[\sum_{i=1}^N \gamma_i T_{ji}^r + T_j^b \right] A_j, \quad j = 1, \dots, N, \quad (18)$$

где величины T_{ji}^r и T_j^b суть усреднённые по j -му земному пикселю коэффициенты пропускания (13) для базовых задач

$$T_{ji}^r = \frac{1}{|U_j| \pi I_0} \iint_{U_j} dx dy \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I_i^r(x, y, H, \mu', \varphi'), \quad (19)$$

$$T_j^b = \frac{1}{|U_j| \pi I_0} \iint_{U_j} dx dy \int_0^1 d\mu' \mu' \int_0^{2\pi} d\varphi' I^b(x, y, H, \mu', \varphi').$$

Введём два вектора и две матрицы:

$$\begin{aligned} \gamma \{ \gamma_j \}, \hat{\mathbf{A}} \{ A_{i,j} = A_j \delta_{i,j} \}, \\ \mathbf{t}^b \{ T_j^b \}, \hat{\mathbf{T}}^r \{ T_{ji}^r \}. \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера. Тогда система (18) принимает вид

$$\gamma = \hat{\mathbf{A}} (\mathbf{t}^b + \hat{\mathbf{T}}^r \gamma).$$

Отсюда находим вектор \mathbf{a} неизвестных величин из разложения (17):

$$\gamma = (\hat{\mathbf{E}} - \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{T}}^r)^{-1} \hat{\mathbf{A}} \mathbf{t}^b. \quad (21)$$

Здесь $\hat{\mathbf{E}}$ – единичная матрица. Из равенства (17) найдём КЯ в j -ом пикселе

$$R_j = R_j^b + \sum_{i=1}^N \gamma_i R_{ji}^r. \quad (22)$$

Здесь R_j^b и R_{ji}^r – значения КЯ (12) в j -ом пикселе для базовых задач:

$$\begin{aligned} R_j^b &= \frac{1}{|U_j|} \frac{\pi}{\mu_0 I_0} \iint_{U_j} dx dy I^b(x, y, 0, -1, 0), \\ R_{ji}^r &= \frac{1}{|U_j|} \frac{\pi}{\mu_0 I_0} \iint_{U_j} dx dy I_i^r(x, y, 0, -1, 0). \end{aligned} \quad (23)$$

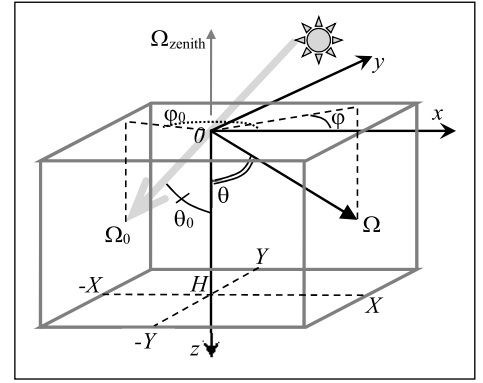


Рис. 1. Область решения уравнения переноса солнечного излучения

Равенство (22) запишем в матричной форме:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}^b + \hat{\mathbf{R}}^r \boldsymbol{\gamma}, \quad (24)$$

где

$$\mathbf{r} \{ R_j \}, \mathbf{r}^b \{ R_j^b \}, \hat{\mathbf{R}}^r \{ R_{ji}^r \}. \quad (25)$$

Подставляя равенство (21) в выражение (24), получаем соотношение

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}^b + \hat{\mathbf{R}}^r (\hat{\mathbf{E}} - \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{T}}^r)^{-1} \hat{\mathbf{A}} \mathbf{t}^b,$$

которое приводится к выражениям

$$(\hat{\mathbf{E}} - \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{T}}^r) (\hat{\mathbf{R}}^r)^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{r}^b) = \hat{\mathbf{A}} \mathbf{t}^b$$

или

$$(\hat{\mathbf{R}}^r)^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{r}^b) = \hat{\mathbf{A}} [\mathbf{t}^b + \hat{\mathbf{T}}^r (\hat{\mathbf{R}}^r)^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{r}^b)].$$

Введём векторы \mathbf{u} и \mathbf{w} :

$$\mathbf{u} = (\hat{\mathbf{R}}^r)^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{r}^b), \quad \mathbf{w} = \mathbf{t}^b + \hat{\mathbf{T}}^r (\hat{\mathbf{R}}^r)^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{r}^b). \quad (26)$$

Тогда альbedo ПП в j -ом пикселе определится отношением элементов этих векторов:

$$A_j = u_j / w_j. \quad (27)$$

В работе [8] значения альbedo получены представлением решения задачи (1)–(11) линейной комбинацией «чёрной» и «белых» базовых функций – решений задач (14) и (15):

$$A_j = q_j / v_j, \quad (28)$$

где

$$\mathbf{q} = \hat{\mathbf{T}}^{ww} (\hat{\mathbf{R}}^{wb})^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{r}^b), \quad \mathbf{v} = \hat{\mathbf{T}}^{wb} (\hat{\mathbf{R}}^{wb})^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{r}^b) + \mathbf{t}^b, \quad (29)$$

$$\hat{\mathbf{R}}^{wb} \{ R_{ji}^{wb} = R_{ji}^w - R_j^b \}, \quad \hat{\mathbf{T}}^{wb} \{ T_{ji}^{wb} = T_{ji}^w - T_j^b \},$$

$$\hat{\mathbf{T}}^{ww} \{ T_{ij}^w = T_{ij}^w \delta_{i,j} \}. \quad (30)$$

Подчеркнём, что в формулах (27) и (28) матрицы $\hat{\mathbf{R}}^r$, $\hat{\mathbf{R}}^{wb}$, $\hat{\mathbf{T}}^r$, $\hat{\mathbf{T}}^{wb}$ и $\hat{\mathbf{T}}^{ww}$ и векторы \mathbf{t}^b , \mathbf{r}^b описывают отражение и пропускание атмосферы для базовых задач (14)–(16) с учётом многократного рассеяния СИ в атмосфере и не зависят от альbedo ПП.

Рис. 2. Максимальные по пикселям отклонения коэффициентов энергетической яркости в задачах с отражающей (участок рапса на вспаханном поле) и с чёрной поверхностями, $d = 1$ км

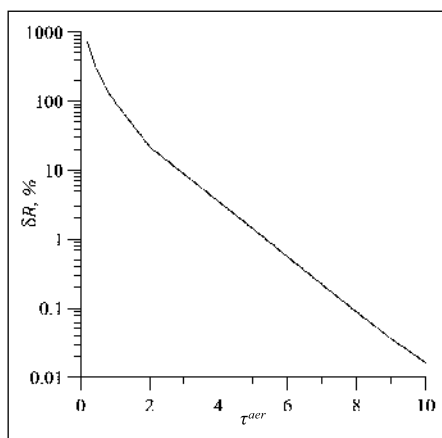
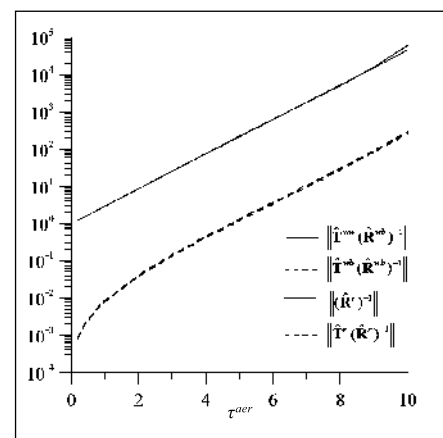


Рис. 3. Нормы матриц, используемых при определении альбедо, $d = 1$ км



Соотношения (26)–(29) представляют собой два варианта основной формулы атмосферной коррекции, позволяющей находить альбедо ПП по значениям КЯ. Каждому варианту основной формулы отвечает свой вариант дискретизации прямой задачи. Здесь не требуется искать решение системы нелинейных уравнений, как в алгоритме согласно [6], и использовать итерационный процесс.

Отметим, что для перехода к *IPA*-приближению нужно найти средние значения всех элементов матриц $\hat{\mathbf{R}}^r$, $\hat{\mathbf{T}}^r$ и векторов \mathbf{r}^b , \mathbf{t}^b :

$$\tilde{r}^r = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N R_{ji}^r, \quad \tilde{T}^r = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N T_{ji}^r, \quad \tilde{r}^b = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_j^b, \\ \tilde{t}^b = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j^b.$$

Здесь \tilde{r}^r и \tilde{r}^b – средние по снимку КЯ в задачах с красной и чёрной ПП, а \tilde{T}^r и \tilde{t}^b – средние по снимку коэффициенты пропускания в этих задачах. Формула (27) для альбедо в *IPA*-приближении принимает вид

$$A_j = [R_j - \tilde{r}^b] / [\tilde{R}^r \tilde{t}^b + \tilde{T}^r (R_j - \tilde{r}^b)]. \quad (31)$$

Возникает вопрос: являются ли формулы (27) и (28) эквивалентными. Действительно, излучение красного пикселя не зависит от излучения, падающего на этот пиксель, тогда как излучение белого пикселя – зависит. В красном пикселе поверхность предполагается пространственно-однородной, а в белом пикселе – нет. Далее вопрос об эквивалентности формул (27) и (28) исследуется численно.

Численные результаты

Рассмотрим слой стандартной атмосферы [10]. Используем микрофизическую модель аэрозоля, разработанную для Беларуси [11]. Коэффициенты экстинкции k , рассеяния k_s и индикатрису рассеяния $P(\gamma_s)$ считаем не зависящими от пространственных координат. Находим эти величины по теории Ми [12] для $\lambda = 0,55$ мкм. Отметим, что формулы коррекции (27) и (28) получены без каких-либо предположений о λ СИ.

На первом этапе атмосферу полагаем прозрачной: для аэрозольной оптической толщины τ^{aer} используются зна-

чения 0,2, 0,4 и 0,8. Оптическую толщину по рэлеевскому рассеянию τ находим по формуле

$$\tau = 0,008569 \lambda^{-4} (1 + 0,0113 \lambda^{-2} + 0,00013 \lambda^{-4}) \Big|_{\lambda=0,55 \text{ мкм}} \approx$$

$\approx 0,097$ [13]. Выбираем зенитный угол солнца $\theta_0 = 40^\circ$.

Высоту слоя атмосферы полагаем равной 100 км. Рассмотрим область $[-5, 5] \times [-5, 5]$ км на земной поверхности. Размер пикселя $d \times d$ выбираем в трёх вариантах: $d = 1, 0,5$ и $0,25$ км (последний размер соответствует характеристикам прибора «MODIS»). В качестве ПП принимаем вспаханное поле ($A = 0,06858$ [14]), в центре которого расположен участок рапса ($A = 0,153$ [14]), имеющий форму круга радиусом $\rho = 2$ км.

Рассмотрим случай, когда квадратные пиксели равномерно покрывают участок ПП. Вводим сетку по высоте z с шагом в 3 км, а по x и y – в 0,25 км. Решения задач (1)–(11) и (14)–(16) находим сеточным методом дискретных ординат [15] в трёхмерной (x, y, z) геометрии. По формулам (19) и (23) находим коэффициенты отражения и пропускания, из их значений составляем матрицы (20), (25) и (30). Обратные матрицы $(\hat{\mathbf{R}}^{\text{wb}})^{-1}$ и $(\hat{\mathbf{R}}^r)^{-1}$ находим методом подпространств Крылова. Наконец, по явным формулам (27) и (28) находим альбедо в каждом пикселе.

В табл. 1 представлены погрешности определения альбедо по формулам (27) и (28) в зависимости от размера пикселя d и оптической толщины аэрозоля τ^{aer} . Погрешности приведены отдельно для пикселей, находящихся на и вне границы сред (границы круга). Погрешность находится как наибольшее по пикселям отклонение (%) вычисленных альбедо от точных. Как можно видеть, обе формулы (27) и (28) обладают высокой точностью.

При этом погрешности обеих формул при одинаковом размере пикселей сравнимы. Максимальное по всем пикселям отклонение вычисленных альбедо друг от друга возрастает с уменьшением d и с ростом τ^{aer} , но для прозрачной атмосферы не превышает 0,15 % (табл. 2).

Далее рассмотрим более плотную атмосферу с τ^{aer} от 1 до 10 включительно для случая самого грубого пространственного разрешения ($d = 1$ км). При росте τ^{aer} влияние альбедо ПП на КЯ становится всё меньше (рис. 2).

Поэтому строки матриц $\hat{\mathbf{R}}^{\text{wb}}$ и $\hat{\mathbf{R}}^r$, см. формулы (25) и (30), становятся всё менее различимыми. Как следствие, нормы матриц, используемых при вычислении альбедо по формулам (27) и (28), растут (рис. 3). Поэтому даже малые погрешности при решении сеточным методом за-

Погрешности (%) определения альbedo по формулам (27) и (28) в зависимости от размера пикселя d и оптической толщины аэрозоля τ^{aer} отдельно для пикселей, находящихся на и вне границы сред

	$\tau^{aer} = 0,2$				$\tau^{aer} = 0,4$				$\tau^{aer} = 0,8$			
	На границе		Вне границы		На границе		Вне границы		На границе		Вне границы	
$d, \text{ км}$	(27)	(28)	(27)	(28)	(27)	(28)	(27)	(28)	(27)	(28)	(27)	(28)
0,25	0,031	0,027	0,091	0,077	0,075	0,069	0,071	0,073	0,071	0,065	0,41	0,26
0,5	0,059	0,053	0,039	0,04	0,12	0,11	0,07	0,07	0,27	0,21	0,1	0,1
1	0,085	0,075	0,13	0,11	0,04	0,05	0,14	0,19	1,01	0,91	1,27	1,07

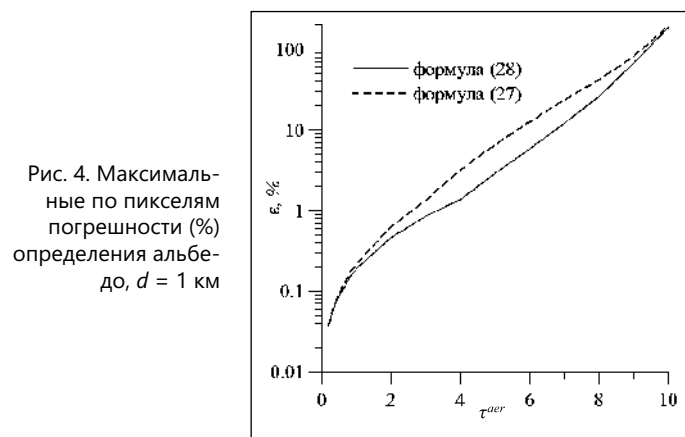


Рис. 4. Максимальные по пикселям погрешности (%) определения альbedo, $d = 1 \text{ км}$

дач (1)–(11) и (14)–(16) приводят к большим погрешностям определения альbedo. Таким образом, погрешности определения альbedo по обеим формулам (27) и (28) возрастают с ростом τ^{aer} (рис. 4). Аналогично при обработке реальных измерений для больших τ^{aer} к большим погрешностям определения альbedo будут приводить даже небольшие ошибки измерения значений КЯ.

Отметим, что при больших τ^{aer} для отдельных пикселей погрешность определения альbedo существенно меньше, чем максимальная по пикселям, ср. рис. 4 и рис. 5. В свою очередь, погрешность определения альbedo в IPA-приближении много больше погрешностей формул (27) и (28); реально IPA-приближение можно использовать только при $\tau^{aer} < 1$.

В IPA-приближении не учитывается влияние на значение альbedo в текущем земном пикселе значений КЯ в соседних атмосферных пикселях. Чтобы оценить это влияние, запишем равенства (26) и (27) в виде

Таблица 2
Отклонения (%) альbedo, полученных по формулам (27) и (28), в зависимости от размера пикселя d и оптической толщины аэрозоля τ^{aer}

$d, \text{ км}$	$\tau^{aer} = 0,2$	$\tau^{aer} = 0,4$	$\tau^{aer} = 0,8$
0,25	0,017	0,05	0,15
0,5	0,01	0,022	0,07
1	0,006	0,014	0,025

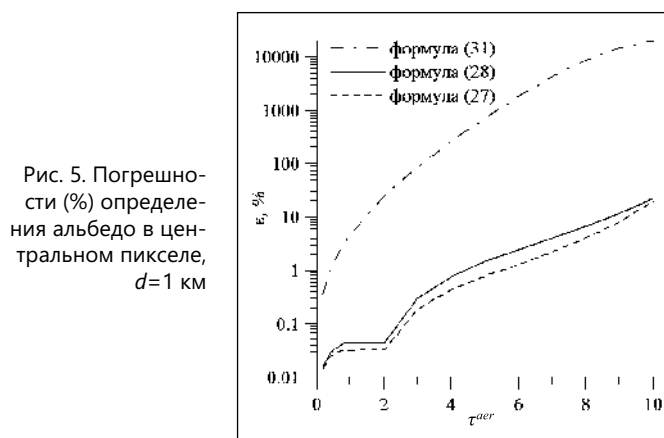


Рис. 5. Погрешности (%) определения альbedo в центральном пикселе, $d = 1 \text{ км}$

$$A_j = \left[\sum_{k=1, k \neq j}^N f_{j,k} (R_k - R_k^b) + f_{j,j} (R_j - R_j^b) \right] / \left[T_j^b + \sum_{k=1, k \neq j}^N g_{j,k} (R_k - R_k^b) + g_{j,j} (R_j - R_j^b) \right]. \quad (32)$$

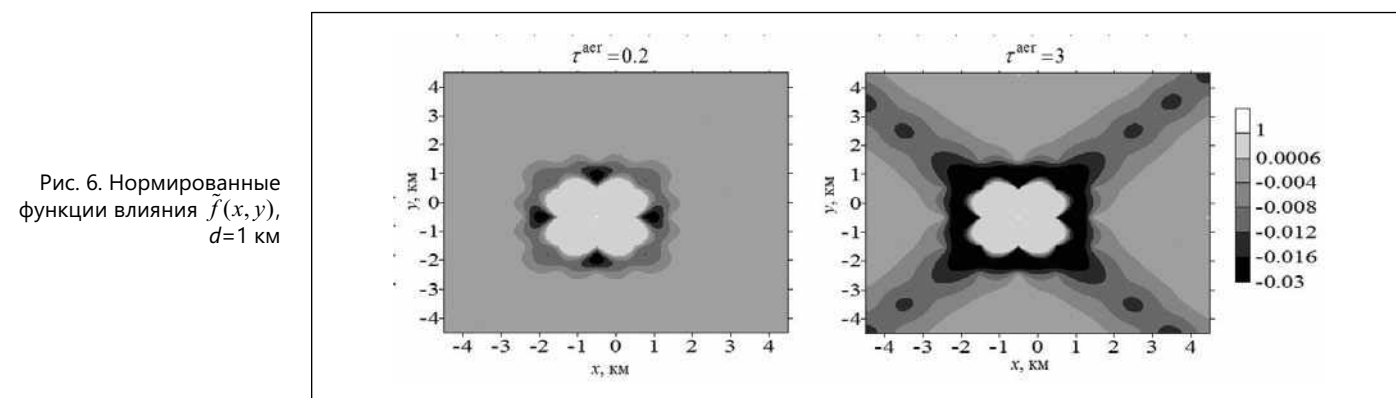


Рис. 6. Нормированные функции влияния $\tilde{f}(x, y)$, $d = 1 \text{ км}$

Здесь $f_{j,k}$ и $g_{j,k}$ – (j, k) -ые элементы матриц $(\hat{\mathbf{R}}^r)^{-1}$ и $\hat{\mathbf{T}}^r (\hat{\mathbf{R}}^r)^{-1}$. Выберем номер j , отвечающий центральному (расположенным вблизи начала координат) пикселю, атмосферному и земному. Каждому номеру пикселя k поставим в соответствие его координаты x, y . Получим функции влияния $f(x, y)$ и $g(x, y)$. Поскольку оказывается, что абсолютное значение $g(x, y)$ в среднем на два порядка меньше значения $f(x, y)$, основной вклад от соседних пикселей зависит от функции $f(x, y)$. Найдём нормированную функцию влияния $\tilde{f}(x, y) = f(x, y) / \max(f(x, y))$. Можно видеть (рис. 6), что с ростом τ^{aer} влияние соседних пикселей существенно растёт.

Наконец, остановимся на временах счёта. Решение одной базовой задачи (14), (15) или (16) на процессоре с тактовой частотой 3,2 ГГц занимает время $t_0 \approx 28$ с. Общее время расчёта всех базовых задач равно $t_0(2N + 1)$, где N – число пикселей. Время обращения одной матрицы $\hat{\mathbf{R}}^{wb}$ или $\hat{\mathbf{R}}^r$ методом подпространств Крылова составляет порядка $(N/100)^4$ с.

Заключение

Предложен новый вариант основной формулы атмосферной коррекции, позволяющей по известным значениям КЯ отражающей системы атмосфера-ППП и по известным параметрам атмосферы находить значения альbedo пространственно-неоднородной ламбертовской ПП. Формула является явной и позволяет проводить восстановление альbedo оперативно. Направление визуирования она содержит как свободный параметр.

В новом варианте основной формулы используются решения базовых задач с чёрной (неотражающей) ПП и с ПП, содержащей один красный (изотропно излучающий) и остальные чёрные пиксели. В старом варианте используются базовые задачи с ПП, содержащей один белый (изотропно отражающий) и остальные чёрные пиксели. Здесь изотропно излучающий пиксель предполагается пространственно-однородным, а изотропно-отражающий – нет.

Фактически предложено два варианта дискретизации красной задачи для уравнения переноса СИ в атмосфере, каждый из которых приводит к единственному решению обратной задачи восстановления альbedo ПП (земной).

Выполнено сравнение двух вариантов формулы на примере задачи восстановления по надирным измерениям альbedo вспаханного поля с участком растительности. Показано, что оба варианта формулы имеют высокую точность, если альbedo ПП оказывает достаточное влияние на КЯ, и превосходят по точности вариант формулы, полученный в ИРА-приближении. Поэтому оба варианта формулы могут использоваться для атмосферной коррекции спутниковых снимков.

При применении представленных вариантов формулы атмосферной коррекции к реальным спутниковым снимкам следует учитывать, что форма пикселей в этой формуле никак не задана, а размер разных пикселей может быть разным. Поэтому, выбрав на снимке целевой пиксель (в котором нужно восстановить альbedo), следует задать окружающие пиксели, вычислить в них КЯ с помощью какого-

либо метода интерполяции и далее применить основную формулу атмосферной коррекции (для «чёрно-белого» варианта формулы такая методика рассмотрена в статье [9]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaufman Y.J., Tanre D., Gordon H.R., Nakajima T., Lenoble J., Frouin R., Grassl H., Herman B.M., King M.D., Teillet P.M. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect // Journal of Geophysical Research. – 1997. – Vol. 102, No. D14. – P. 16,815–16,830.
2. Ju J., Roy D.P., Vermote E., Masek J., Kovalskyy V. Continental-scale validation of MODIS-based and LEDAPS Landsat ETM+ atmospheric correction methods // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 122. – P. 175–184.
3. ENVI. Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide. 2009. 44 p.
4. Белов А.М., Мясников В.В. Атмосферная коррекция гиперспектральных изображений с помощью приближённого решения уравнения переноса MODTRAN // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 489–494.
5. Katkovsky L.V., Martinov A.O., Siliuk V.A., Ivanov D.A., Kokhanovsky A.A. Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data // Remote Sensing. – 2018. – No. 10. – P. 1698.
6. Тарасенков М.В., Белов В.В. Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 7. – С. 622–626.
7. Lenot X, Achard V, Poutier L. SIERRA: A new approach to atmospheric and topographic corrections for hyperspectral imagery // Remote Sensing of Environment. – 2009. – Vol. 13. – P. 1664–1677.
8. Николаева О.В. Новый алгоритм восстановления альbedo поверхности по данным спутникового зондирования // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 3. – С. 204–209.
9. Николаева О.В. Исследование точности алгоритма восстановления альbedo поверхности с высоким пространственным разрешением по фрагменту спутникового изображения // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 7. – С. 541–547.
10. ГОСТ 4401–81 «Атмосфера стандартная. Параметры».
11. Кацев И.Л., Зега Э.П., Прихач А.С. Микрофизическая модель аэрозольной атмосферы Беларуси и сопредельных регионов // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29. – С. 572–578.
12. Mishchenko M.I., Dlugach J.M., Yanovitskij E.G., Zakharova N.T. Bidirectional reflectance of flat optically thick particulate layers: an efficient radiative transfer solution and applications to snow and soil surfaces // JQS-RT. – 1999. – Vol. 64. – P. 409–432.
13. Hansen J.E., Travis L.D. Light Scattering in Planetary Atmospheres // Space Science Reviews. – 1974. – Vol. 16. – P. 527–610.
14. Баула Г.Г., Брычихин М.Н., Истомина М.Н., Кротков А.Ю., Сжёнов Е.Ю., Ризванов А.А., Третьяков В.Н. Формирование базы данных гиперспектральных оптических характеристик сельскохозяйственных культур в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра // Космонавтика и ракетостроение. – 2013. – № 4. – С. 178–184.
15. Николаева О.В., Басс Л.П., Кузнецов В.С. Радуга-6 – программа решения стационарного и нестационарного уравнений переноса излучения в 1D, 2D, 3D областях / Сб. аннотат. Междунар. симп. «Атмосферная радиация и динамика», Санкт-Петербург, 21–24 июня 2011 г. – С. 81–82.



Николаева Ольга Васильевна, математик.

Окончила в 1993 г. факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им.

М.В. Ломоносова по специальности «Прикладная математика». Старший научный сотрудник Института прикладной математики РАН. Область научных интересов: прямые и обратные задачи для уравнения переноса излучения

Взвешивание значимости различных цветов на основе субъективных оценок цветовых предпочтений¹

П. БОДРОГИ, Д. КАРЕЛЛА, Т.К. КХАН

Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Германия

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

Аннотация

В настоящей работе наблюдатели осуществляли субъективную оценку цветовых предпочтений применительно к разным сочетаниям цветных объектов в разных сценах. При этом наблюдатели должны были оценить значимость (так называемый вес) каждой из семи цветовых групп или групп цветовых тонов (*hue*) (телесной, красной, оранжевой, жёлтой, зелёной, синей и лиловой). Сцены освещались светом с высокими общими индексами цветопередачи и четырьмя различными коррелированными цветовыми температурами (КЦТ). Красному и оранжевому цветам были присвоены самые высокие веса (это означает, что красный и оранжевый цвета являются наиболее важными при оценке субъективных цветовых предпочтений); жёлтый, зелёный и синий цвета были промежуточными, в то время как телесному цвету был присвоен небольшой вес. КЦТ оказывает лишь небольшое влияние на цветовые предпочтения, в то время как характер сцены (например, «офис» или «картина») влияет на них очень сильно. В рамках одной цветовой группы объекты с большей чистотой цвета (*chroma*) имеют больший вес во всех сценах. Последний результат позволил получить формулу для расчёта весов.

Ключевые слова: взвешивание значимости, формула весов, субъективная оценка, цветовое предпочтение, группы оттенков, коррелированная цветовая температура (КЦТ), показатель цветового различия (*CRI*).

1. Введение

Субъективная оценка цветовых предпочтений привлекла большое внимание исследователей. Цветовое предпочтение можно определить как

субъективную оценку того, насколько наблюдателю нравится цветовой облик находящихся в помещении цветных объектов [1], причём эта оценка зависит от наблюдаемой сцены и области применения освещения [2]. Известно, что на цветовое предпочтение влияют следующие физические параметры осветительной установки: чистота цвета (*chroma*) и цветовой тон (*hue*) объекта при освещении источником света с конкретным спектром излучения, индекс точности воспроизведения цвета (*colour fidelity index*) [3], размер области, охватываемой цветовой гаммой (*colour gamut size*) [4, 5], форма области, охватываемой цветовой гаммой [6], коррелированная цветовая температура (КЦТ) источника света [7, 8] и характерный уровень освещённости [9–11] на плоскостях, на которых расположены цветные объекты. При оценке цветовых предпочтений, наблюдатели внимательно изучают находящиеся в помещении цветные объекты, обращая больше или меньше внимания на присутствующие в освещённой сцене цветные объекты, относящиеся к той или иной цветовой категории или группе (например, красной, оранжевой, жёлтой, зелёной, синей или лиловой). Другими словами, разным цветовым группам наблюдатели присваивают разные веса. Это «взвешивание» и является предметом настоящей статьи. Проблема взвешивания рассматрива-

ется в литературе следующим образом. В [12] при определении так называемого индекса восхваления (*flattery index*) (разновидность индекса цветовых предпочтений) использовались следующие веса (*W*): $W = 5$ для цветных образцов *CIE TCS-1* и *TCS-3* – *TCS-8* и $W = 15$ для *TCS-2* (тёмный серовато-жёлтый цвет) и *TCS-14* (умеренный оливково-зелёный цвет или цвет листьев). Самый высокий вес $W = 35$ был присвоен образцу *TCS-13* (светлый желтовато-розовый цвет или телесный цвет). Однако эти веса были умозрительными, так как они не были получены в результате проведения визуальных экспериментов. Насыщенные цвета (красный, жёлтый, зелёный, синий, лиловый) в процесс определения индекса восхваления включены не были ([12, табл. II]).

Позже были получены процентные соотношения количества случаев, когда все цветовые тона оценивались по трём главным критериям их значимости при освещении тёпло-белым и холодно-белым светом; при этом наблюдатели оценивали естественность и «живость» (*vividness*) цветных объектов (свежие фрукты, овощи и карта цветов), освещённых разными источниками света [13]. Результирующие веса объектов, принадлежащих к разным цветовым группам, приведены в табл. 1. (Точнее, задача наблюдателей состояла в том, чтобы в каждой сцене выбрать три главных, по их мнению, цветовых тона [13]). Как видно из табл. 1, красно-оранжево-жёлтые объекты оказались наиболее значимыми, а КЦТ оказала на вес лишь незначительное влияние.

В другом эксперименте [14] второстепенная задача наблюдателей состояла в том, чтобы проранжировать восемь цветных объектов (реальных, а не искусственных), присутствующих в сцене, в соответствии с их значимостью, оценивая при этом сходство их внешнего вида при освещении дву-

Таблица 1

Процент случаев, когда цветовому тону наблюдатели ставили одну из трёх высших оценок при оценке цветопередачи под тёпло-белым и холодно-белым светом [13]

Цвет	Красный	Оранжевый	Жёлтый	Жёлто-зелёный	Зелёный	Бирюзовый	Синий	Лиловый
Тёпло-белый свет	91	69	71	12	27	8	2	20
Холодно-белый свет	90	64	74	15	27	7	2	21

¹ Перевод с англ. А.Г. Савицкой

Общие средние веса (W_i) и их среднеквадратические отклонения (СКО) для всех наблюдателей и всех сцен ($i = 1-7$), рассмотренных в настоящей статье. Последние столбцы: сравнение с весами (относительно красного), приведёнными в [7, 13–16] (ссылки на литературу приведены в верхней строке). W_i' – общий средний вес без учёта картины; C_i – характеристическое для цветовой группы значение чистоты цвета *SIECAM02*, полученное на основе результатов спектральных измерений; W_i^* – значение W_i относительно красного цвета (красному цвету соответствует $W_i^* = 1,00$); r_1 – коэффициент корреляции Пирсона между весом из литературы и полученными в настоящей работе значениями W_i (коричневый телесный цвет был рассмотрен только в [14]); r_2 – коэффициент корреляции Пирсона между весом из литературы и данными, полученными в настоящей работе (без учёта картины)

i : цвет	W_i	СКО	W_i'	C_i	W_i^*	[13]	[14]	[15]	[16]	[7]
1: коричневый/телесный	1,69	1,11	1,72	24,1	0,50	–	0,75	–	–	–
2: красный	3,40	1,10	3,36	68,5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3: оранжевый	3,48	1,30	3,65	64,6	1,03	0,73	1,25	0,50	0,89	0,72
4: жёлтый	2,68	1,30	2,75	53,1	0,79	0,80	0,50	0,33	0,19	0,15
5: зелёный	2,81	1,16	2,76	46,6	0,83	0,30	0,50	0,61	0,86	0,47
6: синий	2,89	1,19	2,80	45,6	0,85	0,02	0,50	0,28	0,35	0,37
7: лиловый	2,22	1,21	2,24	34,5	0,65	0,23	0,25	0,22	0,46	0,43
r_1	–	–	–	–	–	0,58	0,58	0,69	0,68	0,72
r_2	–	–	–	–	–	0,63	0,63	0,62	0,64	0,68

мя источниками света (ранжирование осуществлялось в рамках экспериментального исследования точности воспроизведения света (*colour fidelity*)). Наблюдатели должны были присвоить баллы 1 (самый высокий), 2, 3, 4 или 5 (самый низкий) только пяти объектам (тем, которые были сочтены наиболее важными) из всего набора из восьми объектов. Были получены следующие средние баллы: оранжевый цвет – 1, цвет красная роза – 2, собственная рука – 3; лимон, банан, салат, синесиреневая роза – 4, лиловый лук – 5. Эти результаты, в свою очередь, подчёркивают важную роль красно-оранжевых объектов (табл. 2). Обсуждение табл. 2 будет дополнительно проведено в разделах 2 и 3.

В дальнейшем восемнадцать наблюдателей провели оценку цветовых предпочтений в случае цветных объектов (цветные ткани, карта цветов, банки с напитками, фрукты), помещённых в смотровую кабину [15]. Наиболее сильно на сделанные наблюдателями оценки повлияли красный, зелёный и оранжевый цвета (табл. 2). В другом эксперименте испытуемые оценивали помещение, заполненное различными цветными объектами, по трём шкалам: «насыщенный – тусклый», «нормальный – смещённый» и «нравится – не нравится» [16]. Доля наблюдателей, которые при проведении этих оценок включили определённую цветовую группу в тройку самых важных,

составила примерно 66 % для оранжевого цвета, 14 % для жёлтого цвета, 64 % для зелёного цвета, 26 % для синего цвета, 34 % для лилового цвета и 14 % для белого цвета (приблизительные процентные значения можно увидеть на приведённой в [16] диаграмме). Эти результаты подчёркивают, в свою очередь, важность красного и оранжевого цветов, как правило, играющих более важную роль, чем другие цвета. Зелёный цвет также получил высокую оценку, возможно, потому, что в наблюдаемой сцене присутствовали насыщенные зелёные объекты (табл. 2).

В другом исследовании наблюдатели оценивали внешний вид помещения при различных условиях освещения, исходя при этом из того, чувствовали ли они, что освещение делает цвет объектов нормальным или смещённым, насыщенным или тусклым, и из своего мнения о том, нравится или не нравится им то, как освещение выделяло объекты [7]. Объекты различных цветов включали в себя печатные изображения, одежду, различные цветные потребительские товары с упаковками, маркированными чернилами или красителями, и природные объекты, такие как цветы. Доля наблюдателей, которые при проведении этих оценок включили определённую цветовую группу в тройку самых важных, составила примерно 94 % для

красного цвета, 68 % для оранжевого цвета, 14 % для жёлтого цвета, 44 % для зелёного цвета, 35 % для синего цвета, 40 % для лилового цвета и 12 % для белого цвета (табл. 2) (приблизительные процентные значения можно увидеть на приведённой в [7] диаграмме). Приведённые выше результаты подтверждают, что веса W_i различных цветовых групп (красной, оранжевой, жёлтой, зелёной, синей и т.д.) оказывают существенное влияние на суждения о цветовых предпочтениях, и это следует учитывать при определении индекса цветового предпочтения (*colour preference index*) CP . Это можно записать, например, в виде:

$$CP = (W_1 \cdot CP_1 + W_2 \cdot CP_2 + \dots + W_N \cdot CP_N). \quad (1)$$

где W_i – вес цветовой группы i ($i = 1, \dots, N$), а CP_i – индекс цветового предпочтения, определённый для i -ой цветовой группы. Несмотря на их важность, эти веса не учитываются в широко используемых сегодня метриках цветопередачи. Зависимость весов от состава содержащей объекты сцены (например, от наличия в сцене насыщенных зелёных объектов или объектов с сильным эмоциональным воздействием, таких как картины) в сочетании с влиянием КЦТ источника света систематически не исследовалась. Соответственно, цель настоя-

Таблица 3

Пол (П), возраст (В, лет) и культурные корни (К) наблюдателей (Н)
(Г- Германия, К – Китай, В – Вьетнам)

Н	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
П	Ж	М	М	Ж	М	М	М	М	М	М	Ж	М	М	М	М	М	М	М	М	М	М	Ж	М
В	34	29	24	25	24	23	25	21	47	33	31	28	27	30	31	33	27	22	36	24	26	24	53
К	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	К	Г	Г	Г	Г	В	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г

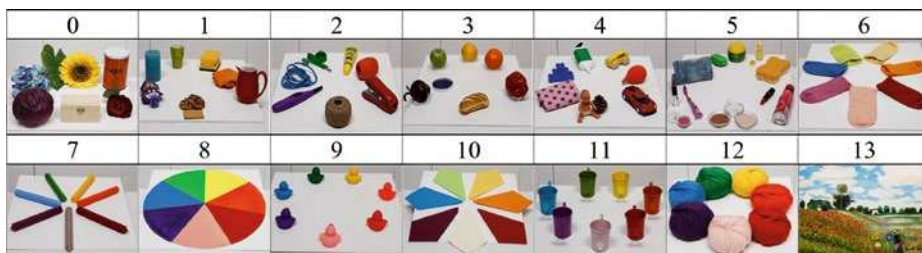


Рис. 1. Сцены (совокупность цветных объектов или картина). Верхний ряд, слева направо: 0 – тренировочная сцена, 1 – кухня; 2 – офис; 3 – пищевые продукты; 4 – детская комната; 5 – ванная; 6 – ткани. Нижний ряд, слева направо: 7 – свечи; 8 – цветной круг; 9 – утки; 10 – салфетки; 11 – лейки; 12 – мотки шерсти; 13 – картина (ручная репродукция «Макового поля» Моне)

щей статьи – ответить на следующие вопросы:

1. Каковы веса различных групп цветных объектов (например, красных, оранжевых, жёлтых, зелёных и т.д.) при определении цветового предпочтения? Метрика цветовых предпочтений должна учитывать эти веса, (см. уравнение (1)).

2. Является ли влияние КЦТ существенным? Данные, приведённые в табл. 1, не говорят о существенном влиянии КЦТ.

3. Влияет ли состав сцены с цветными объектами на веса разных цветов? Сцена может, например, содержать картину, вызывающую более сильную эмоциональную реакцию по сравнению с нейтральными офисными объектами. Сцена также может быть заполнена более или менее на-

сыщенными объектами, цвета которых относятся к определённой группе цветовых тонов, и эти хроматические различия также могут влиять на веса различных цветов. Например, если бы в сцене в качестве представителя группы зелёных тонов использовался насыщенный зелёный цвет, то это могло бы привести к увеличению веса этого цвета.

Чтобы ответить на поставленные выше вопросы, был проведён описанный ниже зрительный психофизический эксперимент.

2. Методика проведения эксперимента

Наблюдатели должны были решить, нравится ли им, и если да, то в какой степени, цветовой облик той или

Рис. 2. Опросный лист для оценки степени внимания (в настоящей статье это называется весом), уделяемого разным цветным группам (цветам) при определении предпочтений в части цветового облика совокупности цветных объектов или картины (так называемой сцены, см. рис. 1). Цвета: коричневый/телесный, красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, синий и лиловый. Оценки уделяемого внимания: 0 для «совсем нет», 1 для «очень мало», 2 для «мало», 3 для «немного», 4 для «много» и 5 для «очень много»

Категории рейтинга:	Совсем нет 0	Очень мало 1	Мало 2	Немного 3	Много 4	Очень много 5
Коричневый/телесный						
Красный						
Оранжевый						
Жёлтый						
Зелёный						
Синий						
Лиловый						

иной из двенадцати различных совокупностей цветных объектов, а также картины (так называемые «сцены», см. рис. 1) при равных 3200, 4200, 5000 и 5500 К КЦТ источника света, освещающего сцену. При ответе на этот вопрос наблюдателям приходилось оценивать по шкале вопросника, насколько большое внимание они уделяли каждой из следующих цветовых групп (короче, цветов): коричневым и телесным цветам (они считались относящимися к одной категории), а также красным, оранжевым, жёлтым, зелёным, синим и лиловым цветам (рис. 2). Для каждого цвета наблюдатель должен был выбрать только одну оценку: 0 для «совсем нет», 1 для «очень мало», 2 для «мало», 3 для «немного», 4 для «много» и 5 для «очень много». Как отмечалось во введении, эти оценки называют «весами» соответствующих цветов. Каждая сцена была скомпонована из искусственных объектов разного цвета (кроме картины, которая была приобретена целиком), так что все сцены содержали все семь цветов.

Наблюдатели должны были заполнить отдельную анкету для каждой из 13 сцен и для каждой из 4 КЦТ. Цветные объекты и картина были по-разному расположены на белом фоне на горизонтальной плоскости стола, на которой горизонтальная освещённость была равна $2300 \text{ лк} \pm 4\%$ (максимальное отклонение) при всех четырёх КЦТ. Причиной выбора такого высокого уровня освещённости было намерение исследовать веса при наилучшем уровне цветовых предпочтений, которое согласно результатам предыдущих исследований обеспечивается при освещённостях, превышающих 2000 лк [11]. Четыре КЦТ, которые измерялись с использованием расположенной на столе белой образцовой пластины, были равны 3228 ± 55 , 4184 ± 110 , 5000 ± 24 и 5541 ± 114 К. Знак \pm указывает на максимальные различия КЦТ в разных местах стола (рис. 1).

В эксперименте приняли участие 23 наблюдателя (4 женщины и 19 мужчин), в состав которых вошли 21 немец, 1 вьетнамец и 1 китаец, причём на момент проведения эксперимента все они проживали в Германии не менее трёх лет (табл. 3). Все наблюдатели были сотрудниками лаборатории, в которой работают авторы, и все они проявляли интерес к све-

тотехнике и имели (более или менее большой) опыт работы в этой области. Они были в возрасте от 21 до 53 лет (среднее значение: 29,4). Все наблюдатели имели хорошую или исправленную остроту зрения и нормальное цветовое зрение.

Войдя в экспериментальную комнату (с окрашенными в белый цвет стенами), наблюдатель должен был в течение 2 мин адаптироваться к случайно выбранной начальной КЦТ. В этот период были разъяснены задание и вопросник. Затем наблюдатель должен был в течение 30 с посмотреть на сцену № 0 (тренировочную сцену, см. рис. 1) при этой КЦТ и заполнить анкету (рис. 2). После этого наблюдатель просматривал 13 сцен (по 30 с на каждую) и оценивал (без ограничения по времени) их одну за другой. Затем устанавливалась следующая случайно выбранная КЦТ, и наблюдатель должен был адаптироваться к ней в течение 2 мин, после чего выполнить вышеописанную процедуру оценки веса. Каждый наблюдатель оценивал каждую сцену при каждой КЦТ только один раз (повторов не было).

Четыре спектра (3200, 4200, 5000 и 5500 К) были получены с помощью стабильного мощного высокоэффективного четырехканального СД генератора света, включающего в себя красный, зелёный, синий и тепло-белый каналы. На рис. 3 показана их относительная спектральная яркость, а в табл. 4 приведены колориметрические характеристики этих спектров. Как следует из табл. 4, все спектры имеют высокие индексы точности воспроизведения цвета ($R_f = 91-92$) с белой точкой в окрестности линии чёрного тела или линии дневного света ($|Duv| < 0,002$).

Спектральные коэффициенты отражения цветных объектов в сценах (рис. 1) измеряли с помощью спектрорадиометра Konica-Minolta CS2000 с полем измерения 1° при освещении сцен галогенной лампой накаливания. Сначала измеряли спектральную энергетическую яркость горизонтально расположенной на столе белой образцовой пластины, а затем заменяли эту пластину объектом и измеряли спектральную энергетическую яркость объекта в том же направлении, после чего рассчитывали спектральные коэффициенты энергетической яркости. Эта процедура была повторена для всех объектов и для всех сцен. В случае

Рис. 3. Относительная спектральная энергетическая яркость для четырёх излучений (3200, 4200, 5000 и 5500 К), использовавшихся при проведении эксперимента

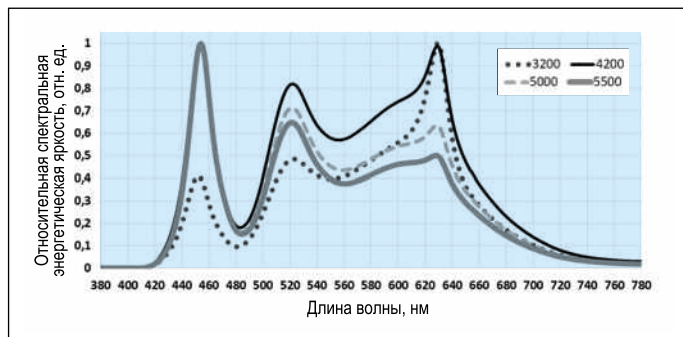
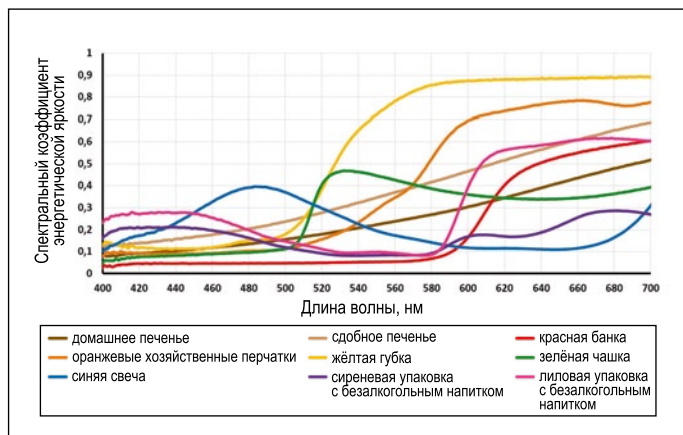


Рис. 4. Спектральные коэффициенты энергетической яркости объектов сцены «кухня» (пример), см. рис. 1



картины были измерены тридцать два характерных элемента поверхности (которые представляли семь цветовых групп, см. рис. 2). На рис. 4 в качестве примера показаны спектральные коэффициенты энергетической яркости объектов сцены «кухня».

С использованием полученных спектральных коэффициентов отражения, для всех измеренных цветных поверхностей со следующими параметрами CIECAM02: $D = 1$ (принудительное (*forced*)), $F = 1,0$, $c = 0,69$ и $N_c = 1,0$ (среднее окружение (*average surround*)), были рассчитаны значения CIECAM02 H , S и J . На рис. 5 для КЦТ 3200 К на графике $H-S$ CIECAM02 отображены измеренные цвета объектов, использовавшихся в 13 сценах.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Общие средние веса цветов и межличностные различия

Табл. 2 содержит общие средние веса семи цветов, значения их среднеквадратических отклонений (СКО) и характеристические значения чистоты цвета различных цветов, полученные на основе результатов спектральных измерений (раздел 2), а также используемые для сравнения литературные данные, описанные в разде-

ле 1. Как следует из табл. 2, красный и оранжевый цвета получили наивысшие средние оценки (3,4–3,5, то есть между «немного» и «много»), жёлтый, зелёный и синий цвета были промежуточными (2,7–2,9, то есть «немного»), лиловый цвет имел меньший вес (2,2 т.е. «мало»), в то время как коричневый/телесный цвет получил оценку между «очень мало» и «мало» (1,7). Из табл. 2 также следует, что обусловленное различиями между наблюдателями общее среднеквадратическое отклонение (СКО) весов, определённых наблюдателями для всех четырёх КЦТ, тринадцати сцен и семи цветов, равнялось 1,3.

Если рассмотреть сцены по отдельности, то самое высокое значение общего СКО имело место в случае сцены № 13, то есть для картины (1,5), что, возможно, обусловлено большими межличностными различиями в восприятии при оценке этого объекта («Маковое поле» Моне), оказывающего эмоциональное воздействие и более сложное по сравнению с характеризирующей самым низким СКО (1,2) более декоративной и простой сценой № 4 (детская комната). Мы также рассчитали усреднённые значения общих оценок без учёта картины (Wi' в четвёртом столбце табл. 2), и получили результаты, немного отличающиеся от полученных с учётом картины (Wi во

Колориметрические характеристики четырёх спектров (3200, 4200, 5000 и 5500 К), использовавшихся при проведении эксперимента

Номинальное значение КЦТ, К	3200	4200	5000	5500
R_a	95	96	95	95
R_f	92	91	91	91
R_g	105	103	103	104
Duv	-0,0006	-0,0003	0,0017	0,0019
КЦТ, К	3228	4184	5000	5541

Таблица 4

работы могут иметь следующие причины:

1. Разные задачи, например, оценка сходства цветового облика при освещении двумя источниками света [14] в сравнении с оценкой цветовых предпочтений в случае одного источника света.

2. Наблюдение куба [14] в сравнении со свободным наблюдением (как в настоящей работе).

3. Различие в выборе оцениваемых цветных объектов (например, в [16] были включены несколько насыщенных зелёных объектов).

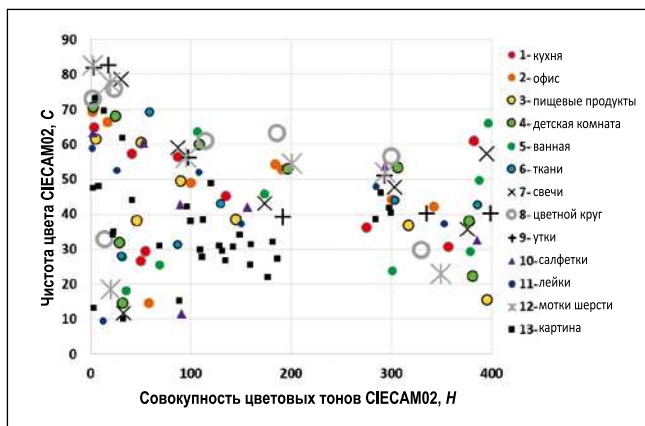
Мы также вычислили коэффициенты корреляции Пирсона между полученными нами результатами (без учёта картины) и литературными данными, см. последнюю строку табл. 2. Мы обозначили это как r_2 (в отличие от коэффициентов r_1 , которые были получены с учётом картины). Разница между r_1 и r_2 не была существенной ни для одних из пяти литературных данных ($p > 0,88$, двусторонний r -z критерий Фишера).

Результаты трёхстороннего дисперсионного анализа (ANOVA), и их оценка при помощи пакета программ SPSS® (частная эта в квадрате, η^2)

Переменные	df	F	σ	η^2
КЦТ	3	8,747	0,000	0,003
Сцена	12	19,109	0,000	0,030
Цвет	6	384,351	0,000	0,234
КЦТ * Сцена	36	0,568	0,982	0,003
КЦТ * Цвет	18	2,927	0,000	0,007
Сцена * Цвет	72	24,191	0,000	0,188
КЦТ * Сцена * Цвет	216	0,602	1,000	0,017

Таблица 5

Рис. 5. Цвета использованных в сценах объектов на графике H-C CIECAM02 при КЦТ 3200 К (пример; см. рис. 3). $H = 0$ и $H = 400$ – характерный красный, $H = 100$ – характерный жёлтый, $H = 200$ – характерный зелёный, $H = 300$ – характерный синий



3.2 Совместное влияние трёх независимых переменных – цвета, сцены и КЦТ

В табл. 5 приведены результаты трёхстороннего дисперсионного анализа (ANOVA) и их оценка при помощи пакета программ SPSS®.

Как следует из табл. 5, хотя влияние КЦТ на сделанные наблюдателями оценки и было существенным, величина его оказалась небольшой (0,003). Наибольший эффект (0,234) имел место в случае независимой переменной «цвет», причём значительное влияние оказывает также и переменная «сцена» (0,030). Взаимосвязи между цветом и КЦТ (слабая зависимость, $\eta^2 = 0,007$) и между цветом и сценой (сильная зависимость, $\eta^2 = 0,188$) оказались существенными.

3.3 Влияние КЦТ

Слабое, но существенное влияние КЦТ ($\eta^2 = 0,003$) на веса продемонстрировано на рис. 6, на котором можно заметить две пары непересекающихся доверительных интервалов: коричневый/телесный цвет (№ 1) при 4200 К имеет меньший вес, чем при других КЦТ (т.е. он привлёк меньше внимания, когда наблюдатели оценивали свои цветовые предпоч-

втором столбце табл. 2). Если сравнивать четыре КЦТ, то общие СКО весов варьировались от 1,27 до 1,36. При индивидуальном рассмотрении цветов было установлено, что для жёлтого и оранжевого цветов общее СКО оказалось равным 1,3, для коричневого/телесного и красного цветов – примерно 1,1, а для зелёного, синего и лилового цветов – примерно 1,2.

В последних столбцах табл. 2 средние веса W_i сравниваются с литературными данными, полученными из источников, описанных во введении. Эти данные были преобразованы в значения весов, приведённых к весу красной группы (вес которой считался равным 1,00). Для случая, описанного в [13], мы усреднили дан-

ные, приведённые в [13, табл. 1] для тёпло-белого и холодно-белого цветов, и получили умеренную положительную корреляцию со значениями W_i , полученными в настоящей работе ($r_1 = 0,58$; см. табл. 2). Для случая, описанного в [14], мы вычли медианные приоритетные данные (*median priority data*) из 6, а затем соотнесли их с красным цветом (табл. 2). Между этими данными и значениями W_i , полученными в настоящей работе, была обнаружена умеренная положительная корреляция ($r_1 = 0,58$). Для данных, приведённых в [7, 15, 16], была получена умеренно хорошая корреляция (со значениями r_1 между 0,68 и 0,72).

Различия между литературными данными и результатами настоящей

тения при 4200 К), тогда как синий цвет (№ 6) имеет меньший вес при 3200 К (то есть синий цвет привлекает меньше внимания при освещении тёпло-белым светом).

3.4 Влияние сцены

На рис. 7 продемонстрировано совместное влияние параметров «сцена» и «цвет» ($\eta^2 = 0,188$) на переменную *относительный вес* (по отношению к весу коричневого/телесного цвета (№ 1) для соответствующей сцены), рассчитываемый по формуле $R_{ik} = W_{ik} / W_{1k}$, где W_{1k} – вес коричневого/телесного цвета, а W_{ik} – средний вес, присвоенный всеми наблюдателями цвету i ($i = 1-7$; см. номера цветов в табл. 2) при наблюдении сцены k ($k = 1-13$, см. рис. 1).

На рис. 7 видны явные различия между распределениями относительного веса всех семи цветов. Используя в качестве входных данных 13×7 средних относительных весов R_{ik} , приведённых на рис. 7, 13 сцен были автоматически сгруппированы в программе SPSS® методом кластерного анализа k -средних с равным четырёх фиксированным количеством кластеров. Все 13 сцен были сгруппированы в соответствии со сходством или различием соответствующих им распределений относительных весов семи цветов (рис. 7). В табл. 6 приведены итоговые относительные веса семи цветов в четырёх центрах кластеров сцен, найденных методом кластерного анализа k -средних, которые сравниваются с общими относительными весами, рассчитанными по данным табл. 2 (последний столбец табл. 6).

Как следует из табл. 6, четыре центра кластеров демонстрируют характерные распределения относительных весов среди семи цветов. Эти распределения отличаются от распределения общего относительного веса, отражённого в последнем столбце. Например, «красный» центр кластера «Картина» имеет относительный вес 2,86, и это больше, чем общий средний относительный вес красного цвета (2,00). Чтобы обозначить принадлежность сцен к тому или иному кластеру, мы назвали четыре кластера следующим образом: «Офис», «Картина», «Кухня» и «Салфетки». Сцены «офис» и «лейки» относятся к 1-му кластеру («Офис»), «картина» относится ко 2-му кластеру («Картина»), «кухня»,

Рис. 6. Слабое ($\eta^2 = 0,003$), но существенное (ANOVA: $df = 3$, $F = 8,747$; $p < 0,0001$) влияние КЦТ на веса различных цветов. 1 – коричневый/телесный; 2 – красный; 3 – оранжевый; 4 – жёлтый; 5 – зелёный; 6 – синий; 7 – лиловый. Показаны 95 % доверительные интервалы (межличностное непостоянство) средних весов

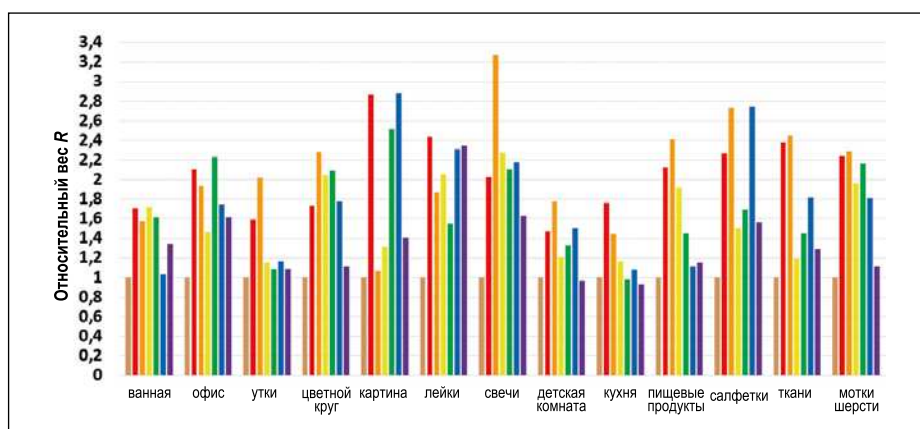
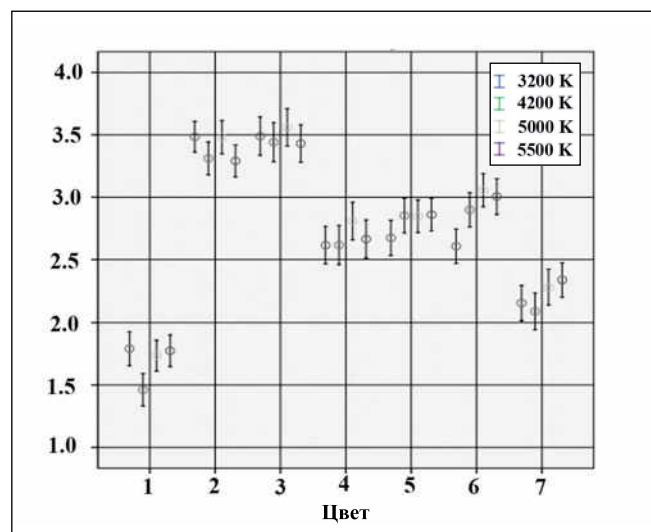


Рис. 7. Совместное влияние сцены и цвета ($\eta^2 = 0,188$). Средние *относительные веса* (по отношению к весу коричневого/телесного цвета для соответствующей сцены), присвоенные наблюдателями. Цветные столбцы: первый – коричневый/телесный цвет; второй – красный цвет; третий – оранжевый цвет; четвёртый – жёлтый цвет; пятый – зелёный цвет; шестой – синий цвет; седьмой – лиловый цвет

«продукты питания», «детская комната», «ванная», «ткани» и «утки» относятся к 3-му кластеру («Кухня»), а «свечи», «цветной круг», «салфетки» и «мотки шерсти» относятся к 4-му кластеру («Салфетки»). Картина была отнесена к индивидуальному кластеру из-за более сложного изобразительного содержания, вызывающего сильный эмоциональный отклик у наблюдателей при оценке цветовых предпочтений для различных цветов на поверхности картины.

3.5 Объяснение различий между сценами в распределениях весов и прогнозирование весов

Чтобы объяснить различия между сценами в распределениях весов (рис. 7) и существование кластеров сцен (табл. 6), мы предположили, что причина сильного взаимодействия сцены и цвета, отражённого на рис. 7,

заключается в том, что при оценке цветовых предпочтений больше внимания привлекают объекты конкретной сцены, принадлежащие к одной и той же цветовой группе, но имеющие большую чистоту цвета. В разных сценах объекты одного и того же цвета имели разные значения чистоты цвета, что следует из разброса значений чистоты цвета на рис. 5.

Чтобы исследовать эту гипотетическую роль чистоты цвета объектов, для каждого цвета ($i = 1-7$) и каждой сцены ($i = 1-12$, т.е. кроме картины) было рассчитано характеристическое значение чистоты цвета C_{ik} , полученное посредством усреднения чистоты цвета измеренных объектов (при наличии нескольких объектов одного цвета чистота цвета усреднялась с учётом всех объектов) по всем четырём КЦТ. Картина была исключена, потому что, как упоминалось выше, при оценке цветовых предпочтений она оказывает

Результаты кластерного анализа. Центры кластеров, то есть характерные распределения относительных весов (R) (относительно веса коричневого/телесного цвета) семи цветов для четырёх кластеров сцен, которым присвоены наименования, позволяющие объединить сцены в кластере. Относительные общие веса рассчитаны на основании данных табл. 2. Сцены: 1 – кухня; 2 – офис; 3 – продукты питания; 4 – детская комната; 5 – ванная; 6 – ткани; 7 – свечи; 8 – цветной круг; 9 – утки; 10 – салфетки; 11 – лейки; 12 – мотки шерсти; 13 – картина

№ кластера	1	2	3	4	Общий вес
Сцены, входящие в кластер	2, 11	13	1, 3–6, 9	7, 8, 10, 12	
Наименование кластера	«Офис»	«Картина»	«Кухня»	«Салфетки»	
Коричневый/телесный цвет	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Красный цвет	2,27	2,86	1,84	2,07	2,00
Оранжевый цвет	1,90	1,07	1,95	2,64	2,06
Жёлтый цвет	1,76	1,32	1,39	1,95	1,58
Зелёный цвет	1,89	2,52	1,32	2,01	1,66
Синий цвет	2,03	2,88	1,29	2,13	1,70
Лиловый цвет	1,98	1,40	1,13	1,35	1,31

более высокое эмоциональное воздействие: присутствующим на картине красному (маки) и синему (небо, зонт) цветам были присвоены более высокие веса, поскольку эти цвета, как правило, осознанно оказываются в центре внимания зрителя из-за вызывающего эмоции содержания картины.

На втором этапе была рассчитана усреднённая по всем сценам, кроме картины ($k = 1-12$), чистота каждого цвета ($i = 1-7$) C_i (C_i – это усреднённое по i значение C_{ik} , $k = 1-12$). После этого для всех цветов и всех сцен была рассчитана относительная чистота цвета $C_{ik, rel} = C_{ik}/C_i$. Если в случае данного цвета и данной сцены значение этой относительной чистоты цвета $C_{ik, rel}$ оказалось высоким, то это означает, что в этой конкретной сцене этот цвет имеет относительно высокую чистоту. Умножая $C_{ik, rel}$ на общие средние веса W_i из табл. 2, получаем предположительные веса $W_{ik, pred}$:

$$W_{ik, pred} = C_{ik, rel} \cdot W_i, \quad (2)$$

где $C_{ik, rel} = C_{ik}/C_i$, $i = 1-7$, $k = 1-12$.

Коэффициент корреляции Пирсона между W_{ik} и $W_{ik, pred}$ оказался равным 0,84 (рис. 8).

Столь сильная положительная корреляция между W_{ik} и $W_{ik, pred}$ ($r = 0,84$), подразумевает, что если в какой-то конкретной сцене чистота цвета объекта из данной цветовой группы (например, оранжевой) относительно высока, то в этой сцене этому объекту будет приписан больший вес. Значения C_i (см. последний столбец табл. 2), полученные в результате исследований, проведённых в настоящей статье, можно рассматривать как чистоты цветов, характерные для соответствующих цветовых групп.

Таким образом, уравнение (2) может применяться для прогнозирования весов цветов в любой новой сцене

($k = 14$), которая состоит из цветовых групп, исследованных в настоящей статье (коричневая/телесная, красная, оранжевая, жёлтая, зелёная, синяя и лиловая). Если характерные значения чистоты цвета $CIECAM02$ (C_{i14}) в этой новой сцене ($k = 14$) известны, то прогнозируемая величина $W_{ik, pred}$ может быть рассчитана с использованием значений W_i и C_i , приведённых в табл. 2. Для прогнозирования оценок весов в новой сцене (0 для «совсем нет», 1 для «очень мало», 2 для «мало», 3 для «немного», 4 для «много» и 5 для «очень много»), значение $W_{ik, pred}$, рассчитанное помощи уравнения (2), должно быть пересчитано в соответствии с линией наилучшего соответствия, приведённой на рис. 8 и описываемой уравнением (3). Результат пересчёта обозначается как $W_{ik, pred}'$:

$$W_{ik, pred}' = 0,7868 \times W_{ik, pred} + 0,6014. \quad (3)$$

Следует отметить, что для достоверности расчётов новые сцены, для которых предполагается спрогнозировать веса, не должны содержать вызывающих эмоциональное воздействие элементов, таких как мазки кистью на картине. В картине важны определённые цвета, потому что они отражают намерения художника, например, если главной темой картины является человек в лиловой одежде, то лиловые мазки выделяются *автоматически*.

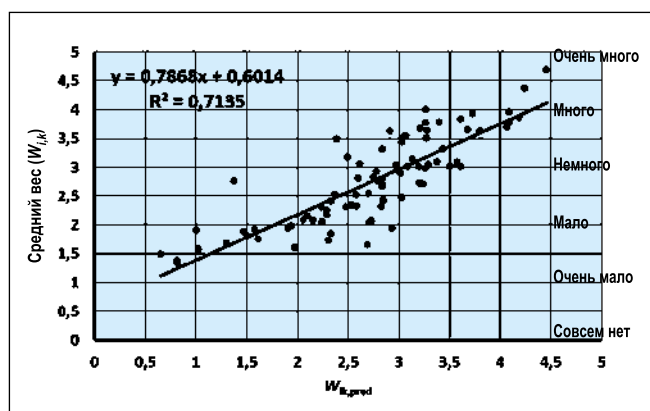


Рис. 8. Прогнозирование средних весов (W_{ik}) для разных цветов ($i = 1-7$) и сцен ($k = 1-12$) при помощи значений $W_{ik, pred}$, полученных с использованием уравнения (2) (за исключением картины)

4. Выводы

При принятии решений о цветовых предпочтениях в различных сценах с цветными объектами, участники психофизического эксперимента, описанного в настоящей статье, оценивали веса различных цветовых групп (или групп цветовых тонов) в соответствии с тем, сколько внимания они уделяли каждой из семи групп (включающих объекты коричневого/телесного, красного, оранжевого, жёлтого, зелёного, синего или фиолетового цвета). Сцены освещались светом с высокими общими индексами цветопередачи и четырьмя различными коррелированными цветовыми температурами. КЦТ источника света оказывала небольшое, но существенное влияние на веса различных цветов. Красный и оранжевый цвета получили наивысшие средние оценки (3,4–3,5, то есть между «немного» и «много»), жёлтый, зелёный и синий цвета были промежуточными (2,7–2,9, то есть «немного»), фиолетовый цвет имел меньший вес (2,2 т.е. «мало»), в то время как у коричневого/телесного цвета получил оценку между «очень мало» и «мало» (1,7), что частично соответствует литературным данным.

Содержание сцены (например, «картина» или «типичные цветные объекты в офисе») оказало сильное влияние на веса всех семи цветов. Соответственно, были идентифицированы четыре кластера сцен (офис, живопись, кухня и салфетки) с характерными центрами (то есть распределениями весов семи цветов). Чтобы интерпретировать различия между сценами (за исключением картины) в распределении веса, мы предположили, что входящим в одну и ту же цветовую группу объектам с более высокой чистотой цвета присваивается больший вес. Эта гипотеза привела к выводу уравнения (3), основанного на уравнении (2). Уравнение (3) может использоваться для прогнозирования весов в любой новой сцене, которая состоит из объектов, относящихся к рассмотренным цветовым группам (коричневые/телесные, красные, оранжевые, жёлтые, зелёные, синие и фиолетовые цвета), за исключением сцен с высоким эмоциональным содержанием (например, картины). В будущем метрики цветовых предпочтений должны учитывать веса различных групп цветовых тонов,

возможно, с использованием уравнения (3). Картина представляла собой отдельный кластер из-за её сложного изобразительного содержания (форма, размер, композиция), оказывающего сильное эмоциональное воздействие. Картины с различным изобразительным содержанием следует рассмотреть отдельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Esposito T, Houser K.* Models of colour quality over a wide range of spectral power distributions// *Lighting Research and Technology* 2018; first published online on April 13; DOI 10.1177/1477153518765953.
2. *Lin Y, Wei M, Smet KAG, Tsukitani A, Bodrogi P, Khanh TQ.* Colour preference varies with lighting application// *Lighting Research and Technology*. – 2015. – no.49. – С. 316–332
3. Commission Internationale de l'Éclairage. CIE224–2017, CIE2017// *Colour Fidelity Index for accurate scientific use*, Vienna: CIE. – 2017.
4. *Islam M.S, Dangol R, Hyvärinen M, Bhusal P, Puolakka M, Halonen L.* User preferences for LED lighting in terms of light spectrum// *Lighting Research and Technology*. – 2013. – no.45. – С. 641–665
5. *Dangol R, Islam MS, Hyvärinen M, Bhusal P, Puolakka M, Halonen L.* User acceptance studies for LED office lighting: Preference, naturalness and colourfulness// *Lighting Research and Technology*. – 2015. – no.47. – С. 36–53
6. *Wei M, Houser K.W, David A, Krames M.R.* Colour gamut size and shape influence colour preference// *Lighting Research and Technology*. – 2017. – no.49. – С. 992–1014
7. *Royer M, Wilkerson A, Wei M.* Human Perceptions of Color Rendition at Different Chromaticities// *Lighting Research and Technology*. – 2018. – no.50. – С. 965–994
8. *Huang Z, Liu Q, Westland S, Pointer MR, Luo MR, Xiao K.* Light dominates colour preference when correlated colour temperature differs// *Lighting Research and Technology*. – 2018. – no.50. – С. 995–1012.
9. *Wei M, Bao W, Huang H.P.*, Consideration of Light Level in Specifying Light Source Colour Rendition// *LEUKOS*2018; published online on 11 May; DOI 10.1080/15502724.2018.1448992.
10. *Wei M.* Maintaining Colour Preference under Different Light Levels. 15th China International Forum on Solid State Lighting, Shenzhen. – 2018.
11. *Khanh T.Q, Bodrogi P, Guo X, Anh P.Q.* Towards a user preference model for interior lighting Part 2: Experimental results and modelling// *Lighting Research and Technology* 2018; published online on December 13; DOI 10.1177/1477153518816474.
12. *Judd D.B.* A flattery index for artificial illuminants// *Illum. Eng.* . – 1967. – no.62. – С. 593–598

13. *Rea MS, Freyssinier JP.* Color Rendering: Beyond Pride and Prejudice// *Color Research and Application*. – 2010. – no.35. – С.401–409.

14. *Bodrogi P, Guo X, Khanh TQ.* Semantic interpretation of the CIE2017 colour fidelity index. Proc. CIE2019 29th Quadrennial Session, Washington. – 2019.

15. *Wei M, Houser KW.* Systematic Changes in Gamut Size Affect Color Preference// *LEUKOS*. – 2017. – no.13. – С. 23–32.

16. *Royer M, Wilkerson A, Wei M, Houser K, Davis R.* Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape// *Lighting Research and Technology*. – 2017. – no.49. – С. 966–991.



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

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



Диана Карелла (Diana Carella). Окончила Дармштадский технический университет, Дармштадт (Германия). С 15 января 2013 года по 5 октября 2017 года являлась научным со-

трудником в Лаборатории светотехники Дармштадского технического университета. В настоящее время работает инженером по свету в Институте по сертификации и испытаниям VDE, Оффенбах, Германия



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

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

Асимметричное приближение эффективной среды для описания оптических характеристик случайно-неоднородных сред с дискретными вкраплениями

Л.А. АПРЕСЯН, Т.В. ВЛАСОВА

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: leon_apresyan@mail.ru, tv-nano@mail.ru

Аннотация

Симметричное приближение Бруггемана, известное также под названием приближения эффективной среды (*Effective Medium Approximation, EMA*), широко используется в приложениях, в том числе при описании рассеяния света на неоднородных структурах, содержащих дискретные вкрапления. Однако в последнем случае не учитывается естественная асимметрия топологии наполнителей композита, составляющего структуру, в котором дискретные рассеиватели по большей части окружены материалом односвязной матрицы. В данной работе предложены два варианта асимметричных *EMA* для случая статистически изотропной среды, содержащей дискретные вкрапления, основанных на учёте различия структуры полей внутри и вне рассеивателей. Один из вариантов не слишком сильно отличается от обычной формы *EMA* и приводит к такому же значению порога протекания, а для второго значение порога отличается от обычного даже в случае сферических рассеивателей. Приведены выражения для соответствующих порогов протекания в модели хаотически ориентированных эллиптических частиц. Выполнено сравнение предложенных приближений со стандартными приближениями Максвелла-Гарнетта и Бруггемана для случая частиц серебра в диэлектрической матрице.

Ключевые слова: эффективные параметры случайно-неоднородных сред, гомогенизация, приближения Бруггемана и Максвелла-Гарнетта, порог протекания.

1. Введение

При описании оптических характеристик макроскопически неоднородных сред, к которым относятся многие

природные среды, а также искусственные композиты, широко используются разнообразные «правила смешения» («*mixing rules*»), позволяющие приближённо заменять реальную мелкомасштабную по сравнению с длиной волны случайно-неоднородную среду однородной с некоторыми эффективными параметрами (см., напр., обзор [1] и цитированную там литературу). Из большого числа известных моделей расчёта эффективных параметров выделяются приближения Максвелла-Гарнетта (*Maxwell Garnett approximation, MGA*) и эффективной среды Бруггемана (*Effective Medium Approximation, EMA*). Первое из них строится для модели однородной среды со случайными вкраплениями, а второе рассматривает симметричный композит, заполненный случайным образом распределёнными частицами с разными макроскопическими характеристиками. При этом *MGA* является асимметричным приближением, в котором одна из компонент выделена и играет роль матрицы. Вследствие этого *MGA*, в отличие от симметричного *EMA*, не позволяет описывать порог протекания, связанный с возникновением «слипания» случайных вкраплений с ростом их концентрации в бесконечный кластер, что принято считать недостатком этого приближения. При малых концентрациях неоднородностей вдали от порога оба приближения дают одинаковые результаты. В данной работе мы получим простые асимметричные модификации *EMA*, основанные на модели однородной среды со случайными рассеивателями, и вместе с тем позволяющие описывать возникновение порога протекания.

2. Вывод уравнений асимметричных *EMA*

Рассмотрим однородную среду с диэлектрической проницаемостью

ε_0 , содержащую статистически однородно распределённые частицы с диэлектрической проницаемостью ε_1 , занимающие объёмную долю f_1 , так что объёмная доля свободной от частиц среды $f_0 = 1 - f_1$. Считая среду мелкомасштабной, так что размеры частиц и расстояния между ними малы по сравнению с длинами волн рассматриваемых излучений, воспользуемся квазистатистическим приближением. В нём электрические и магнитные свойства среды описываются независимо. Рассматривая случай однородного внешнего поля $E_{\text{out}} = \text{const}$, создаваемого источниками, находящимися вне среды (строгую постановку граничных условий можно найти в [2]), эффективную диэлектрическую проницаемость ε^* можно определить как [1]

$$\varepsilon^* = \langle \varepsilon E \rangle_v / \langle E \rangle_v = (f_0 \langle \varepsilon_0 E_0 \rangle + f_1 \langle \varepsilon_1 E_1 \rangle) / \langle E \rangle, \quad (1)$$

$$\langle E \rangle = f_0 \langle E_0 \rangle + f_1 \langle E_1 \rangle. \quad (2)$$

Здесь угловые скобки с индексом v означают усреднение по «физически бесконечно малому объёму», малому по сравнению с полным объёмом среды, но содержащему большое число частиц,

$$\langle \rangle_v = \frac{1}{V} \int_V \dots dr, \quad (3)$$

а такие же скобки без индекса – статистическое усреднение, включающее усреднение по объёмам каждой из компонент (для простоты мы не вводим специальных обозначений для векторных величин).

Входящие в (1) поля E_0 и E_1 можно рассматривать, соответственно, как флуктуирующие поля вне и внутри «характерной частицы». Все дальнейшие приближения связаны со статистическими гипотезами о свойствах этих полей. Ограничимся для простоты случаем сферических частиц (обобщение на модель эллипсоидов легко получить с учётом результатов [3]). В простейшем приближении, справедливом в пределе сильно разреженных сред (формально при $f_1 \rightarrow 0$), поле вне частиц E_0 полагают равным полю в их отсутствие, $E_0 = E_{\text{out}}$, полностью пренебрегая тем самым влиянием рассеяния на E_0 . При этом поле внутри ха-

рактерной частицы будет выражаться известным соотношением [4]

$$E_1 = A_{10}E_0, A_{10} = \frac{3\varepsilon_0}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0}. \quad (4)$$

В этом приближении в правой части в (1) можно опустить угловые скобки, что после сокращения на E_0 даёт обычное *MGA*,

$$\varepsilon^* = (f_0\varepsilon_0 + f_1\varepsilon_1A_{10}) / (f_0 + f_1A_{10}). \quad (5)$$

Использование *EMA* связано с попыткой учесть взаимное влияние рассеяния на частицах, самосогласованно рассмотрев в качестве «характерной частицы» сферическую частицу, находящуюся в однородном среднем поле $\langle E \rangle$ в «эффективной среде» с диэлектрической проницаемостью ε^* . При этом

$$E_1 = A_{1*}\langle E \rangle, A_{1*} = \frac{3\varepsilon^*}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon^*}. \quad (6)$$

В обычном приближении Бруггема-на [5] считается, что в (1) и при оценке поля вне частиц E_0 следует использовать аналогичные соотношения, т.е.

$$E_0 = A_{0*}\langle E \rangle, A_{0*} = \frac{3\varepsilon^*}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon^*}, \quad (7)$$

что приводит к хорошо известному соотношению

$$f_0 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon^*}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon^*} + f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon^*} = 0. \quad (8)$$

Условия (7) отвечают топологии агрегата, т.е. случаю, когда и компонента с ε_0 состоит из сферических частиц. Однако для рассматриваемого здесь асимметричного случая с выделенной средой и дискретными вкраплениями нет никаких оснований использовать (7) для поля между частицами, поскольку массив среды не имеет прямой связи со сферической формой частиц. Оставаясь в рамках самосогласованного приближения, достаточно считать, что поле вне частиц E_0 приближённо равно среднему полю, т.е., сохранив (6) для частиц, вместо (7) для поля среды положить в (1) $E_0 = \langle E \rangle$. Подставив это соотношение и (6) в (1), после простых преобразований вместо (8) получим

$$f_0 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon^*}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon^*} + f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{2\varepsilon^*} = 0. \quad (9)$$

Более обоснованное, чем (9), приближение, «промежуточное» между

EMA и *MGA*, получается, если в (1) и (2) при расчёте поля внутри «эффективной частицы» в качестве внешнего по отношению к частице поля вместо полного среднего поля $\langle E \rangle$ принять среднее поле между частицами $\langle E_0 \rangle$, что даёт

$$\varepsilon^* = (f_0\varepsilon_0 + f_1\varepsilon_1A_{1*}) / (f_0 + f_1A_{1*}). \quad (10)$$

По форме это соотношение совпадает с *MGA* (5), но с учётом (6) представляет не явное выражение, а уравнение для ε^* , которое нетрудно привести к аналогичному (9) виду

$$f_0 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon^*}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon^*} + f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{3\varepsilon^*} = 0. \quad (11)$$

В следующем разделе мы сравним некоторые свойства рассмотренных здесь приближений.

3. Некоторые следствия

Все описанные в предыдущем разделе приближения допускают формальный переход к случаю полного заполнения среды частицами, $f_1 = 1$, когда $\varepsilon^* = \varepsilon_1$. Эти приближения справедливы в общем случае комплексных диэлектрических проницаемостей. Такие же выражения сохраняются и при переходе от диэлектрической проницаемости ε к описанию проводимости среды σ , и при описании многих других кинетических коэффициентов переноса [6]).

Нетрудно показать [1], что все формы *EMA* (8)–(10) описывают возникновение порога протекания. Однако, если приближение (9), как и обычное

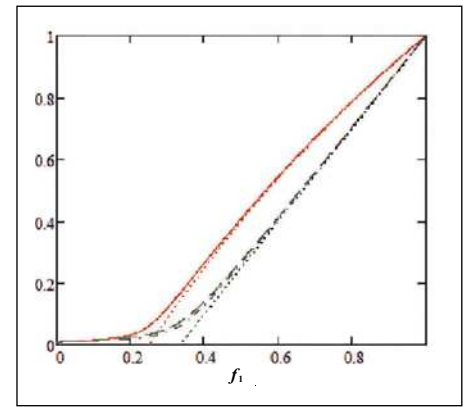


Рис. 1. Эффективная проводимость для среды с проводимостью σ_0 с частицами с проводимостью σ_1 при $\sigma_0/\sigma_1 = 0,01$ в моделях (8) — — —, (9) - - - и (10) — — —. Точками обозначены предельные значения этих кривых для непроводящей среды ($\sigma_0 = 0$)

EMA (8), даёт порог протекания $f_{1c} = 1/3$, то уравнению (11) отвечает уже другой порог: $f_{1c} = 1/4$.

Все приближения (8)–(10) приводят к квадратным уравнениям относительно ε^* , которые легко решаемы. На рис. 1 показаны зависимости от f_1 эффективных проводимостей слабо проводящих частицами в моделях (8)–(10). Из рисунка видно, что модель (9), с порогом $f_{1c} = 1/3$, даёт результат, качественно близкий к даваемому обычной моделью Бруггема-на (8), тогда как модель (10) заметно отличается от (8) из-за различий в значениях f_{1c} .

В качестве ещё одного примера рассмотрим случай серебряных наночастиц в матрице с относительным коэффициентом преломления $n = 1,5$. На рис. 2 показаны графики спектральной зависимости действительной и мнимой частей комплексного показателя

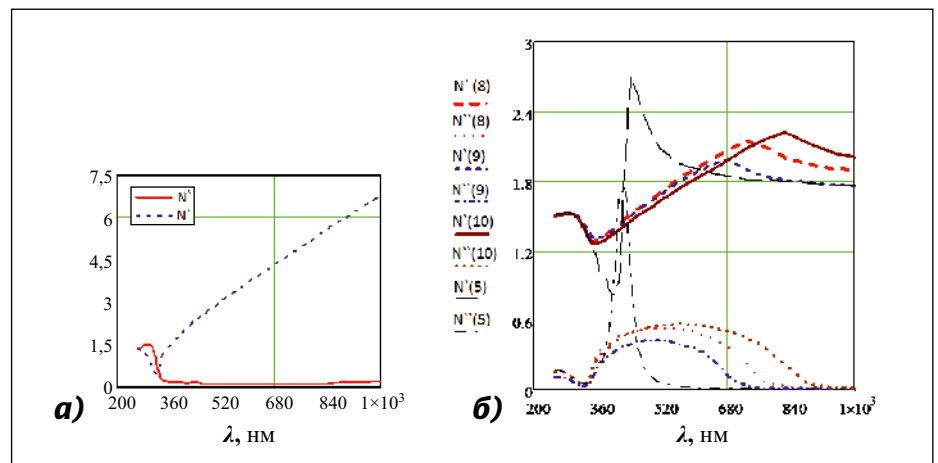


Рис. 2. Действительная и мнимая части показателя преломления $N = N' + iN''$ для объёмного серебра (а), по данным [7], и эффективного показателя преломления N^* для среды с серебряными наночастицами в моделях *MGA* (5) и *EMA* (8)–(10) при $f_1 = 0,1$ (б)

преломления $N = \sqrt{\epsilon}$ для объёмного серебра, а также – эффективного показателя преломления $N^* = \sqrt{\epsilon^*}$ для среды с серебряными наночастицами в моделях *MGA* (5) и *EMA* (8)–(10) при $f_1 = 0,1$. Из графиков видно, что в данном примере все рассмотренные модели эффективной среды по результатам заметно отличаются друг от друга, но количественно разные результаты. При этом, если *MGA* описывает наличие узкого плазмонного резонанса, все схемы *EMA* дают уширенный резонанс со смещённым в красную сторону максимумом («*red shift*»).

4. Обсуждение

Рассмотренные выше примеры показывают, что предложенные модификации дают результаты, качественно аналогичные обычному *EMA* при заметных количественных различиях. Эти приближения легко обобщаемы на случай хаотически ориентированных эллиптических частиц. Для этого достаточно заменить величины A_{1*} и A_{10} соответствующими тензорными выражениями, дополнив входящие в (1) символы усреднения усреднением по хаотическим ориентациям, которое сводится к вычислению одной трети от следа матрицы [1]. При этом в случае эллипсоидов с тензором деполяризации L для модели (10) порог протекания выражается как

$$f_{1c} = 1 / \left(1 + \left\langle \frac{1}{L} \right\rangle \right), \quad (12)$$

а для модели (9) как

$$f_{1c} = 1 / \left(1 + \frac{2}{3} \left\langle \frac{1}{L} \right\rangle \right), \quad (13)$$

где

$$\left\langle \frac{1}{L} \right\rangle = \frac{1}{3} Sp \frac{1}{L}, \quad (14)$$

а деление на L понимается в смысле обращения матрицы. Выражение (13) получается и при использовании непосредственного обобщения стандартной формы *EMA* (8) на случай эллиптических ячеек, если только принять, как это делается обычно, что точкам среды отвечают сферические ячейки. Это выражение сохраняется и для моделей с флуктуирующими факторами

деполяризации L , для чего достаточно дополнения правой части (14) статистическим усреднением по L .

При использовании эффективных параметров в приложениях, естественно, возникает вопрос об условиях применимости тех или иных моделей. Необходимыми являются условия применимости квазистатистического приближения. Однако достаточных условий в общем случае указывать не удаётся, поскольку в реальных задачах частицы не являются строго хаотически распределёнными и могут, к тому же, обладать некоторой сложной внутренней структурой, для которой рассматриваемые статистические модели могут служить лишь грубым приближением (полезное обсуждение отсутствия универсальных эффективных параметров для макроскопически-неоднородных сред имеется в [8]). Поэтому выбор той или иной модели обычно основывается на сравнении даваемых ею результатов с результатами конкретных реальных или численных экспериментов. В качестве последнего примера можно привести работу [9], в которой классическое *EMA* (8) сравнивается с результатами численных расчётов.

5. Заключение

В данной статье рассмотрены два варианта приближения *EMA* для случая среды с дискретными включениями, в которых учитывается отличие односвязной топологии матрицы от топологии одиночных частиц. Один из них не сильно отличается от обычного используемого симметричного приближения Бруггемана и даёт такой же порог протекания, $f_{1c} = 1/3$, тогда как для второго это отличие более существенно и соответствует более низкому значению порога, $f_{1c} = 1/4$. Оба приближения легко обобщаются на случай хаотически ориентированных эллиптических частиц. Можно ожидать, что использование этих приближений найдёт полезные применения в практических приложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apresyan L.A.* Effective electrodynamic parameters of nano-composiote media and the homogenization theory // *Light & Engineering*. – 2019. – Vol. 27. – No. 1. – P. 4–14.
2. *Stroud D.* Generalized effective-medium approach to the conductivity of an inho-

mogeneous material // *Phys. Rev. B*. – 1975. – Vol. 12, No. 8. – P. 3368–3373. DOI:10.1103/PhysRevB.12.3368.

3. *Apresyan L.A., Vlasov D.V., Zadorin D.A., Krasovskii V.I.* On the effective medium model for particles with a complex structure // *Tech. Phys.* – 2017. – Vol. 62. – P. 6–13. DOI:10.1134/S1063784217010029.

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

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

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

7. *Lynch D.W., Hunter W.R.* In: Handbook of Optical Constants of Solids. Ed. Palik E.D. – N.Y.: Academic Press. – 1985. – P. 350–356.

8. *Bohren C.F.* Applicability of effective-medium theories to problems of scattering and absorption by nonhomogeneous atmospheric particles // *J. Atmosph. Sci.* – 1986. – Vol. 43. – P. 468–475. DOI: 10.1175/1520-0469(1986)043%3C0468:AOEMTT%3E2.0.CO;2.

9. *Mishchenko M.I., Dlugach J.M., Liu L.* Applicability of the effective-medium approximation to heterogeneous aerosol particles // *JQSRT*. – 2016. – Vol. 178. – P. 284–294. DOI:10.1016/j.jqsrt.2015.12.028.



Апресян Леон Арсенович, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1972 г. МФТИ. Старший научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: статистическая радиофизика, электродинамика случайно-неоднородных сред



Власова Татьяна Викторовна, кандидат физ.-мат. наук. Окончила в 1983 г. химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова

РАН. Область научных интересов: нанотехнологии, химия катализаторов роста для углеродных наноструктур



АО «КАДОШКИНСКИЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Освещение школ и вузов – это ответственно!

СВЕТИЛЬНИК СО СВЕТОДИОДАМИ GALAD ЮНИОР LED

- Создает максимально равномерное освещение на всех поверхностях, не слепит и не портит зрение
- Обеспечивает требуемую освещенность на рабочей поверхности
- Соответствует требованиям, предъявляемым к светильникам для детских учреждений (ГОСТ-Р-54350-2015)

Освещение образовательных учреждений:

Школы, детские сады, высшие учебные заведения.

IP20



50 000

ГАРАНТИЯ



LED



35 Вт



АО «КЭТЗ», п. Кадошкино,
Респ. Мордовия, ул.
Заводская, 1.



www.galad.ru



(83448) 2-31-21

Развитие образного мышления у студентов направления световой дизайн в рамках дисциплины «Принципы и методы светового моделирования»

Н.В. БЫСТРЯНЦЕВА, И.С. СМЛГА, Д.А. ЧИРИМИСИНА¹, В.В. ЛУКИНСКАЯ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹ E-mail: chirimisinad@gmail.com

Аннотация

На примере мировых образовательных школ архитектуры, искусства и дизайна XX и XXI вв. авторы проводят исторический и сравнительный анализ методик изучения формообразующих элементов композиции как способа развития образного мышления студента. В статье обсуждаются актуальность и эффективность интеграции пропедевтического курса по изучению композиционных первоэлементов в дисциплину «Принципы и методы светового моделирования» (направление «Световой дизайн», Университет ИТМО), излагаются методологические основы дисциплины.

Ключевые слова: световой дизайн, образное мышление, первоэлементы композиции, световое моделирование, восприятие.

1. Введение

Сегодня называться дизайнером модно и престижно. Доказательство тому – увеличение количества поисковых запросов в интернете на тему быстрого (от двух недель до нескольких месяцев) овладения профессией дизайнера. Образовательная деятельность подобных курсов обучения дизайну в основном ориентирована на овладение техническими инструментами – всевозможными графическими и визуализирующими программами, знание которых, безусловно, важно для профессионала. Однако давно известно, что хотя дизайн напрямую и связан с функциональной стороной предметного мира и конструированием формы, он прежде всего является искусством проектирования, то есть решает эстетические и художественные задачи в процессе создания новой формы. Поэтому одними из важнейших задач дизайна как искусства

проектирования являются создание «образа», то есть отражение чувственно воспринимаемых предметов и явлений, а также его «проектирование» для зрителя. «Художник есть рука, которая посредством того или иного клавиша целесообразно приводит в вибрацию человеческую душу» – цитата из хрестоматийной книги В.В. Кандинского «О духовном в искусстве» [1], где «клавиша», естественно, представляет собой взаимодействие геометрических форм и цвета, влияющих на восприятие зрителя. Для того, чтобы создавать образ в дизайне, требуется определённый уровень развития образного мышления и понимания законов восприятия, которые необходимо формировать у будущих специалистов.

Созвучное нашему определению образного мышления дал Л.Г. Медведев, который отмечает: «Образное мышление – динамический процесс, складывающийся из ощущений, восприятия, понятий, представлений, воображения: способность человеческого сознания отражать действительность в наглядно-образной форме» [2, 3, 4]. Основная его функция – создание образов и оперирование ими в процессе решения задач. Одним из этапов постановки образного мышления будущего дизайнера является освоение универсальной базы проектных приёмов и средств художественной выразительности. В статье раскрывается актуальность и эффективность метода изучения формальной композиции – одного из основных инструментов для развития образного мышления в образовании светодизайнеров. Методика рассматривается на практическом опыте обучения магистрантов первого курса направления «Световой дизайн» Университета ИТМО образно-визуальному мышлению в рамках дисциплины «Принципы и методы светового моделирования».

2. Генезис методики обучения формальной композиции в архитектурно-дизайнерском образовании

Сегодня, как и в 1920-е годы, когда формировались первые дизайнерские школы, профессиональное образование в области дизайна и архитектуры во многом базируется на принципах творческого проектирования, которые были сформулированы и реализованы на практике двумя главными школами: Баухаусом в Германии и ВХУТЕМАСом (Высшие художественно-технические мастерские) в России. Для того чтобы понять динамику целей, стоящих перед изучением формальной композиции и первоэлементов, необходимо обратиться к первоисточникам, поскольку именно в Баухаусе и ВХУТЕМАСе эти методы создавались и применялись как пропедевтические дисциплины. Главные элементы, цели и принципы пропедевтических методик Баухауса и ВХУТЕМАСа кратко изложены в таблице.

Причинами возникновения немецкого Баухауса принято считать изменение социально-культурных условий и общественно-политического устройства в начале XX века. Новое отношение человека к миру, выраженное в искусстве художников авангарда, не могло не повлиять на саму систему художественного образования. Впервые новые приёмы обучения были предложены в 1918 г. И. Иттенном – будущим преподавателем школы, а затем, в рамках пропедевтического курса, внедрены в программу обучения школы Баухаус.

В истории создания пропедевтического курса Баухауса также особую роль сыграл В. Кандинский – один из идеологов и основоположников теории современного формообразования. Будучи художником и теоретиком искусства, В. Кандинский создал свой курс, который опирался на научные достижения современной математики, психологии, физиологии и других областей знания с целью создания «науки об искусстве» (*Kunstwissenschaft*). Первым его шагом стала разработка своеобразного «языка» первоэлементов композиции, позволяющего «говорить» о внутреннем эмоционально-духовном смысле произведения, формировать у зрителя восприятие, адекватное замыслу художника. Описание этого «языка» представлено им

Главные элементы, цели и принципы пропедевтических методик Баухауса и ВХУТЕМАСа

	Баухаус	ВХУТЕМАС
Элементы визуального языка	Линия, точка, пятно, плоскость, объём, пространство	Линия, пятно, плоскость, объём, пространство
Цель курса	Развитие композиционно-художественного мышления, формирование творческой свободы, включал чувственно-эмоциональную составляющую	Обучение студентов языку пластических форм, законам формо- и цветообразования
Основополагающие принципы и подходы к обучению в курсе пропедевтики	Комплексное освоение элементов визуального языка, взаимосвязанное с программами последующих тематических мастерклассов (скульптурного, театрального и др.)	Метод задумывался как творческая концепция формообразования рационализма, где основой построения композиции были «элементы архитектуры», от абстрактного к конкретному. Макетирование – как этап проектирования. Деление массива пластической культуры на отдельные дисциплины, с помощью которых осваивались отдельные элементы визуального языка.
Основа педагогической системы (художественные направления)	Экспрессионизм, абстракционизм, функционализм	Рационализм, конструктивизм, «объективно-формальный метод»

в книге «Точка и линия на плоскости» [5]. Этот «язык», состоящий из нескольких основополагающих элементов – «букв» (точки, линии и плоскости) – анализируется с помощью свойств этих первоэлементов и их изменений в процессе взаимодействия в композиции. В. Кандинский полагал, что в основе методики обучения должно лежать овладение умением осмысливать первоэлементы искусства и пользоваться ими.

В это же время во ВХУТЕМАСе, где формировалась своя идеология творчества, основной упор в методике преподавания ставился на выполнении студентами заданий поисково-исследовательского характера с использованием первоэлементов композиции, а также на изучении их свойств и качеств. Вопрос о необходимости научного исследования психологии восприятия человеком архитектурно-художественных форм впервые во ВХУТЕМАСе поставил Н.А. Ладовский [6]. Им же была создана научно-исследовательская лаборатория, где проводились эксперименты по изучению объективных закономерностей психофизиологии восприятия человеком форм предметной среды. В это же время благодаря Н.А. Ладовскому отдельные формальные первоэлементы стали рассматриваться с точки зрения их восприятия в определённых композиционных сочетаниях, что, несомненно, обогатило художественную педагогику школы и также стало приёмом, который активно брали на вооружение единомышленники.

Из анализа опыта работы архитектурно-дизайнерских школ с первоэлементами пластического языка становится ясно, что набор первоэлементов остаётся неизменным. При этом трансформация затрагивает, в частности, целевые установки курсов обучения по поиску языка формальной композиции, которые в начале XX века рассматриваются в качестве **базы для создания теорий о пространствах**. Ситуация изменилась в 1950-х годах благодаря развитию науки о психологии мышления, когда П.Я. Гальпериным была разработана теория поэтапного формирования умственных действий [7]. Получив психолого-педагогическое обоснование, пропедевтические методы выходят на новый образовательный уровень: **переориентируются с результата на процесс, т.е. с создания продукта (проекта) на протекание творческого процесса, развитие образного мышления**. Отказ от готовых приёмов, экспериментирование в процессе творчества, характерные для авангардного течения, логично вылились в необходимость «обучения в поиске» новым законам формообразования и механизмам визуального мышления.

Наследниками методик пропедевтики и творческих традиций ВХУТЕМАСа и Баухауса являются многие современные образовательные учреждения, в число которых входят архитектурно-дизайнерские факультеты таких университетов, как *Bauhaus-Universität Weimar* (Германия), *Illinois Institute of Technology* (США), *Iuav*

University of Venice (Италия), *Yale University* (США), МГУП (Московский государственный университет печати) и МАрХИ (Московский архитектурный институт). Развитие методик приводит к конкретизации формообразующих качеств композиций и их детального осмысления в отдельных направлениях дизайнерской деятельности; конкретно в данной статье речь пойдёт о световом дизайне.

3. Формообразование как пропедевтический курс в контексте светового дизайна

Формообразование получает новое осмысление в области светового дизайна за счёт изменения требований к качеству световой среды. Усложняются принципы построения образа объекта – так, при взаимодействии искусственного света с формой и материалом возникает световой образ объекта, качественно отличный от дневного. Новые требования повлекли за собой изменения в методах формообразования и череду научных открытий.

В 1971–1972 гг авторским коллективом под руководством Н.М. Гусева и Н.И. Щепеткова был выполнен поиск объёмного светомоделирования для ансамбля Дмитриевского и Успенского соборов г. Владимира [14]. Макеты были оборудованы миниатюрными источниками света, яркость и мощность которых можно было регулировать, тем самым меняя структуру световой композиции ансамбля.

В 1977 г. под руководством Г.В. Каменской вышло пособие «Методические рекомендации по проектированию наружного архитектурного освещения зданий и сооружений» [8]. В рекомендациях представлена методика выбора свето-цветового решения с помощью моделирования. Для формирования распределения яркости по фасаду здания была разработана диапроекционная установка для плоскостного моделирования освещения. С помощью пульта меняли яркость и цвет отдельных фрагментов изображения. Установка позволила находить оптимальные для зрителя варианты свето-цветового решения здания или сооружения, которые должны быть воплощены в натуре.

В научно-исследовательской работе А.Г. Батовой было произведено лабораторное светомоделирование на макете стены Соловецкого монастыря, выполненном в масштабе 1:10 [19]. В ходе эксперимента были найдены варианты оптимальных светоконпозиционных параметров (распределение яркости и диапазоны яркостных контрастов). В этой работе исследовалось также влияние искусственного света на зрительное восприятие и интерпретацию архитектоники.

Данные методы предполагают поиск закономерностей построения световой композиции отдельных элементов объекта или архитектурной композиции ансамбля при изменении соотношения яркостей в поле зрения. Влияние параметров освещения на изменение восприятия пространственной организации даёт представление о конструировании (восстановлении) восприятия формы её наглядных компонентов – отдельных элементов, пропорций зданий, тектоники объектов – при естественном освещении.

Методов, использующих формальные свойства первоэлементов в композиции, не так много даже в международной практике; среди вузов, обучающих этим методам, можно выделить *Aalborg University* (Дания) и *Jefferson University* (США). Образовательные программы по световому дизайну больше фиксируют своё внимание на исследовании природных эффектов и материалов (которые, в свою очередь, тоже являются первоосновой) [9,10,11,12].

В международной практике (*Hochschule Wismar* (Германия), *Royal Institute of Technology* (Швеция)) фор-

мообразование рассматривается, в основном, в рамках лабораторного светомоделирования на архитектурных макетах.

В 1999 г. была опубликована статья А.Б. Матвеева «Эстетика освещения», в которой автор намечает несколько важных методов работы со светом, и прежде всего необходимость нахождения ограничений для создания «языка света»: «...свет играет роль одного из компонентов языка, с помощью которого воссоздаётся образ среды. Как всякий язык художественного произведения, свет совместно с другими средствами выразительности должен быть использован в соответствии с законами и ограничениями, свойственными языку данного произведения» [16]. А что говорит не только о необходимости нахождения языка, но и о понимании «свойств данного произведения», то есть свойств композиции в эстетике освещения. Данная методика получила своё развитие в установках архитектурного освещения, где, определяя пограничные параметры отдельных элементов здания (портик, колонна, антаблемент, фронтон и др.), экспериментально закладывались пропорции восприятия композиции архитектуры классического формообразования [17].

В 2008 г. в МАрХИ на кафедре «Дизайн архитектурной среды» возникают методы осмысления пространства как ситуации, имеющей определённый средовой характер. В рамках задания «Павильон пространственных ощущений» студенты – будущие архитекторы и дизайнеры светопропространственных характеристик – использовали формальные средства композиции при создании макета по методике «надрез-отгиб». Цель задания – создание небольшого объекта для «обострённого восприятия» с опорой на решения мастеров-архитекторов XX века, подробное знакомство с принципами пространственной организации архитектуры на примере работ ВХУТЕМАСа и Баухауса и отдельных мастеров (Ф. Райта, Ле Корбюзье, Т. Андо, С. Холла, З. Хадид и др.). Графический анализ позволяет студентам освоить различные композиционные средства при организации пространства и вдохновляет на собственные проектные решения [15].

В 2015 г. на этой же кафедре под руководством А.В. Ефимова была защищена диссертация Н.В. Быстры-

цевой. В этой исследовательской работе был предложен метод проектного поиска взаимодействия параметров разных видов освещения в границах визуального плана или пространственной зоны на основе первичных формальных средств светоконпозиционного построения – точек, линий, пятен и их структуры, а также спектральных и яркостных характеристик, учитывающих информацию о городской среде [14]. Данный подход внёс в проектирование новый этап поиска формообразующих свойств и светоконпозиционных взаимоотношений элементов внутри пространственной организации без привязки к их градостроительной композиции. То есть в процессе проектирования автор пользуется не геометрическими закономерностями при построении формы, а перцептивными, создающими визуально-информационные связи по принципу «внутренней композиции» В. Кандинского. Принцип «внутренней композиции», думается, как нельзя лучше демонстрирует основания для образотворческого проектирования – «жизнь чисто и вечно художественных форм и форм, случайно брошенных на полотно» [18], – работа с абстрактной композицией позволяет автору уйти от изобразительного формирования деталей и работать с сутью формообразования (существующего в объекте, заложенного архитектором и нового – при искусственном свете). Этот приём даёт автору возможность не «смотреть на картину со стороны», а «самому вращаться в картине, в ней жить»-[18]. В контексте такой постановки задачи стало важным не только осмысление художественных свойств светотехнических и оптических параметров, но и изменение отношения к архитектуре города, его пространственной организации, обновление взгляда на его семантическое



Рис. 1. «Объём. Контраст. Цвет». Студентка А. Дубиновская; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2014 г.)

значение. Определение формальных свойств композиции позволило «обнулить» декоративность архитектуры и пространства и работать с первоосновами композиционной организации с помощью устойчивых художественных парадигм: классической, модернистской, постмодернистской [14].

Этот первый шаг к формированию метаязыка в светодизайне получает дальнейшее развитие в методическом курсе направления «Световой дизайн». Апробация данного метода проводится с 2014 г. по настоящее время сотрудниками направления «Световой дизайн» Университета ИТМО в рамках дисциплины «Принципы и методы светового моделирования». Методика составляет основу развития образного мышления в дизайне. Это означает, что в ходе обучения светодизайнер осваивает комплекс композиционных формообразующих элементов, их свойства, способы их взаимодействия, в которых свет используется в качестве главного материала (рис. 1). В свою очередь, свет, будучи инструментом, который способен «создавать множество различных значений одной и той же вещи через её световой образ, её световую форму» [16], может обогатить методику работы с первоэлементами. В данном курсе был апробирован целый ряд методических подходов.

Первый этап апробации методов светомоделирования включал в себя следующие задачи:

1) Анализ формообразующих принципов композиции (классической, модернистской, постмодернистской), их распознавание и работа по разрушению или выявлению их закономерностей в световой композиции (рисунок, макет, фотография).

2) Анализ формообразующих принципов классической композиции (плоскость, объём, пространство) и их взаимодействия с естественным светом при разных суточных изменениях и разной облачности (контраст, нюанс, угол падения), воссоздание данных эффектов при организации световой среды (рисунок, макет, фотография).

3) Анализ взаимодействия формообразующих принципов композиции пространства и их взаимодействие с приёмами освещения (воссоздание эффектов в макете).

Анализ авторского метода архитектора (Тадао Андо, Ле Корбюзье,

МАКЕТЫ ПАВИЛЬОНА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОЩУЩЕНИЙ

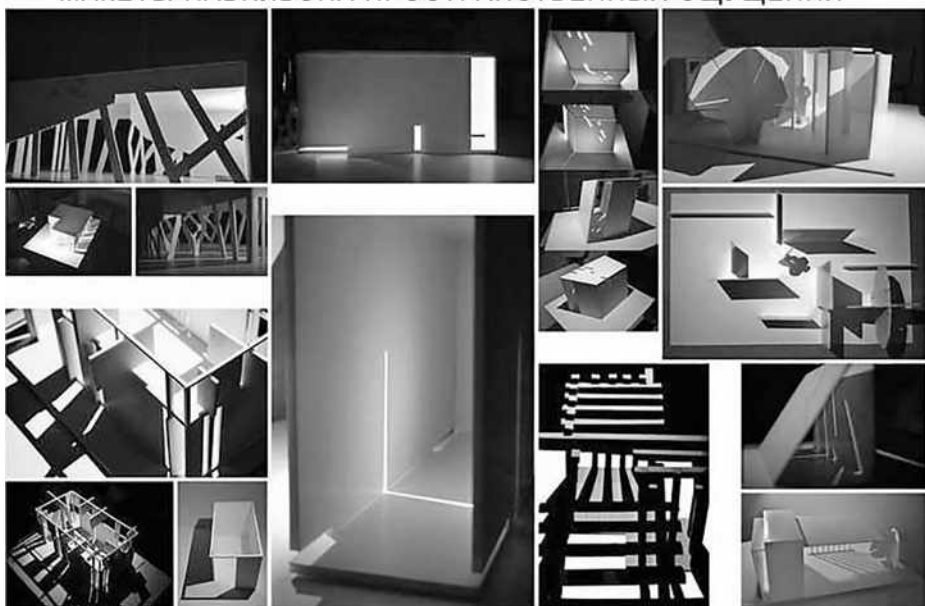


Рис. 2. «Макеты павильона пространственных ощущений». МАРХИ (2008 г.)

Кензо Танге, Стив Холл и др.), работа с формированием павильона пространственных ощущений (павильон, где посредством светопространственной композиции люди погружаются в определённые эмоциональные состояния, обретают новый опыт взаимодействия с пространством) через метод автора (основано на ранней практике МАРХИ) (рисунок, макет, фотография) (рис. 2).

Данная методика дала возможность сформировать практические знания о закономерностях построения световой композиции в архитектурном освещении, а именно осознать: влияние угла падения, яркости светового потока и приёмов освещения на восприятие формы объекта; характерные особенности и отличия искусственного и естественного освещения; взаимодействие колористики объекта и спектральных характеристик источников света. Однако использование конкретных существующих приёмов освеще-

ния, приближение к изобразительной форме зданий в макете и недостаточная свобода в создании оптических эффектов ограничили возможность развития поисково-исследовательского опыта и творческой интуиции студентов. Масштаб восприятия смоделированного в макете решения не позволил получить конкретный практический опыт для применения его в реальном проектировании. Второй этап апробации основан на ранней практике бумажного формообразования, принятой в ГХПА (Санкт-Петербургская государственная художественно-промышленная академия имени А.Л. Штиглица). Её основные положения: отказ от формальной композиции, работа с «природными образами» (закат, полдень, туман, блики), абстрактные объёмно-пространственные построения из бумаги (анализируются: Казимир Малевич – философская база к особой трактовке плоскости в изобразительном пространстве; Влади-



Рис. 3. «Бумагопластика». Студентка А. Бондарь; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2015 г.)



Рис. 4. «Образ объекта». Студент А. Гафуров; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2015)



Рис. 5. «Фотопортрет». Студентка Е. Смирнова; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2015 г.)



Рис. 6. «Фотопортрет». Студент И. Домашневич; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2015 г.)

Рис. 7. «Внешний объём. Искусственное освещение». Студентка А. Хватова; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2018 г.)

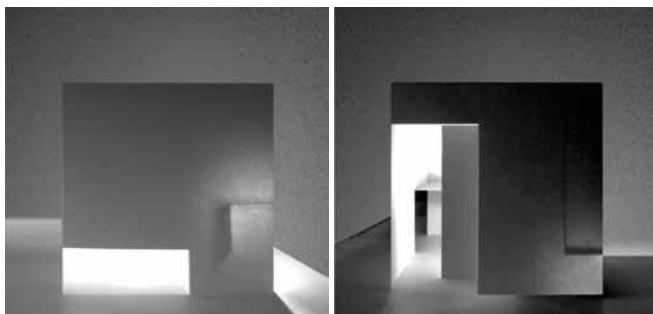


Рис. 8. «Классика. Модернизм. Постмодернизм». Студентка Л. Ангелова; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2018 г.)

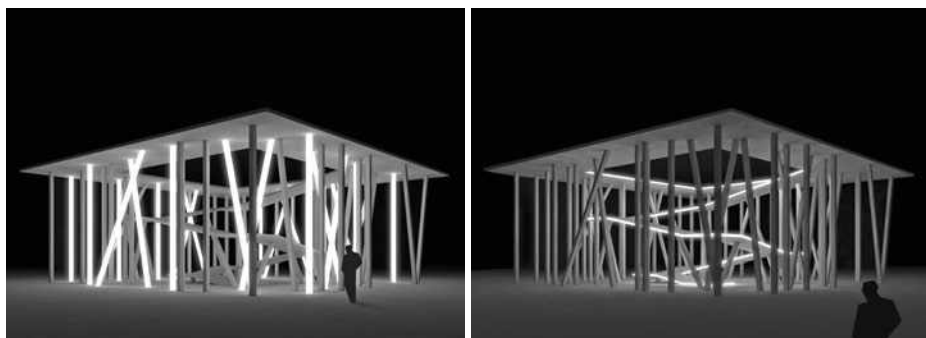


Рис. 9. «Павильон пространственных ощущений». Студентка Ю. Любакова; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2016)

мир Таглин – форма за рамки плоского живописного холста; бумагопластика Александра Родченко – объёмное прочтение изобразительного пространства; В.Ф. Колейчук – типология конструктивных приёмов трансформации плоскости). Особое место занимает образовательный курс бумагопластики Б.Н. Рахманинова («Мнёшь бумагу – раскрепощаешь сознание») (рис. 3).

Работа по этой методике включает в себя:

1) Формирование опыта взаимодействия формы и света. Понимание особенностей светораспределения на различной форме (округлой и жёсткой), проектирование светотени формой самого листа (макет, фотография).

2) Изучение и формирование оптических свойств света, понимание ма-

териала через свойства бумаги (самосвечение, отражённый, прямой свет), спектральные характеристики и цвет света (проведение экспериментов в макете, способ фиксации результатов – фотография).

3) Овладение первоэлементами формальной композиции на плоскости.

4) Освоение инструментов: пропорционирование (пятые доли, модуль) и соотношение объёмов в плоскостной и пространственной композиции, цветовое и графическое кодирование информации, освоение формообразующих принципов (статика-динамика, ритм (изменяющееся повторение)-метр (повторение без изменений) и др.).

5) Экспериментальное освоение возможностей различных материалов. Освоение законов композиции в формате эксперимента. Освоение инструментов: масштаб, работа со светом и формой, влияние световой графики на восприятие формы. Экспериментальное моделирование и композиционный разбор (макет, фотография).

6) Экспериментальное освоение свето-пространственных изменений. Освоение инструментов: контрастное и нюансное освещение, силуэт, создание динамики в кадре, работа с формой тени и образом объекта (макет, фотография) (рис. 4).

7) Формирование опыта передачи смысла на границе иллюстративности и знаковости. Переход от материально-предметного восприятия к формально-образному. Создание условий и факторов, выход из которых всегда лежит в области упрощения, архетипизации. Освоение композиционных инструментов: силуэт и фон, большое и малое, контраст и нюанс, статика и динамика, графика и смысл. Понимание особенностей восприятия природных светотеневых структур (паттернов) (передача смысла). Работа с понятиями «время», «контраст», «движение» (графика, макет, фотография) (рис. 5, 6).

Данная методика позволила формировать поисково-исследовательский опыт. Работы студентов с точки зрения образности носили широкий характер, однако эксперименты не были закономерны, не хватало исследовательской части и выводов. Требовалось уменьшить количество эффектов и увеличить точность используемых композиционных приёмов по выявлению

закономерных изменений при свето-моделировании.

Третий этап – совмещение формальной композиции с поисковым светомоделированием (плоскость, объём, пространство), конкретизация и исследование светокомпозиционных принципов, изучение влияния разных характеристик светового потока (точка, линия, пятно) на формообразующие свойства среды, поиск авторского художественного языка (рис. 7). Методические задачи курса:

1) Освоение приёмов моделирования потока света с помощью оптики, отражателей, ограничителей. На уровне макета анализ приёмов работы со светом (угол падения, угол отражения, яркость, спектр, природные паттерны). Накопление базы приёмов моделирования.

2) Анализ взаимодействия искусственного освещения с пластическими приёмами формообразования (классическое, модернистское, постмодернистское) в плоскости, объёме и пространстве (рис. 8). Работа делится на отдельные светокомпозиционные задачи (ритм – метр, статика – динамика, симметрия – асимметрия, контраст – нюанс, разрушение – объединение).

3) Анализ влияния последовательности воспринимаемых фрагментов, создание визуально-информационных связей по принципу «внутренней композиции» (семиотика, время, пространство) (макет, исследование, фото).

4) Анализ и изучение авторского метода архитекторов, светодизайнеров, дизайнеров при работе с павильоном пространственных ощущений – (презентация, макет, фотография) (рис. 9).

5) Прототипирование и поиск новых форм взаимодействия между светом и разными типами пространств, практическое изучение влияния светового решения на эмоциональный отклик людей (макет, фото, исследование).

6) Анализ и выявление закономерностей восприятия пользователем полученных визуальных образов (социальный опрос) (рис. 10, 11).

Данный метод показал высокие результаты по развитию у студентов образного мышления, формированию своего художественного языка, а также способности понимать механизм формирования психофизиологического состояния человека за счёт

Рис. 10. «Результаты опроса». Студентка М. Ивлева; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2018)

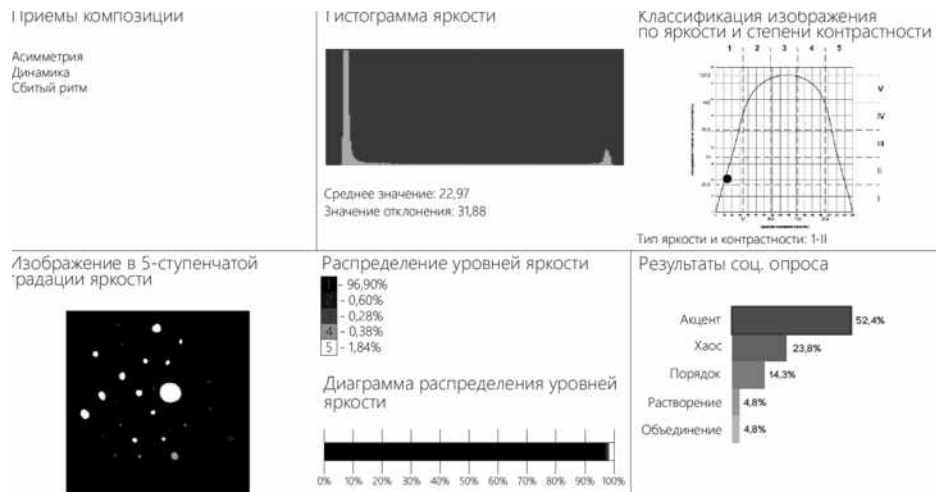
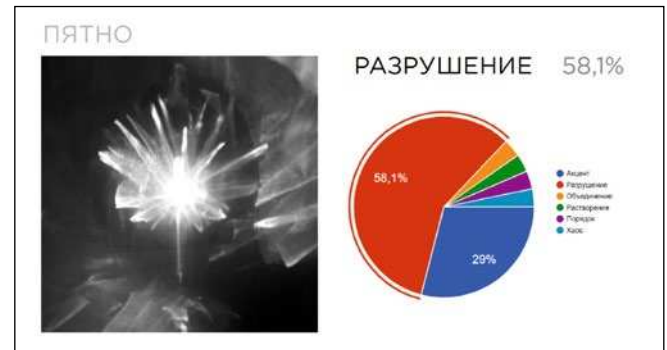


Рис. 11. «Анализ яркости и контрастности». Студентка А. Хватова; направление «Световой дизайн», Университет ИТМО (2018 г.)

влияния света и управлять этим механизмом.

3. Заключение

И сам свет как инструмент для создания композиций, и работа с ним имеют ряд характерных особенностей, связанных с его природой:

– Световое моделирование представляет собой непрерывный процесс экспериментального поиска. Постоянное практическое изучение изменчивости природы световой среды, непредсказуемые эффекты и нюансы, возникающие при работе с оптически линзами, трафаретами, отражающими и рассеивающими материалами, определяют появление уникального образа и развивают творческую интуицию светодизайнера.

– Отличия в природе света как материала обусловлены его более широкими средствами образной выразительности. Связано это с тем, что «в XX столетии свет, продолжая сохранять свою традиционную «прикладную» функцию одного из средств художественной выразительности, постепенно обретает характеристики

самостоятельной формы художественного творчества в синтезе с разными видами искусств – музыкой, сценическим искусством, архитектурой, скульптурой, реже – с монументальной живописью» [13].

– Важно, что свойства и взаимодействие первоэлементов изучаются не только с помощью краски, маркера, карандаша, но и при использовании художественных качеств света – инструмента будущей проектной работы. Параллельно с созданием образа в композиции исследуются свойства и природа света, вырабатывается авторский метод: студенты формируют свой «световой язык», индивидуальную технику работы со светом и его характером.

– Наиболее значимым отличием света как инструмента создания формальной композиции является его пространственно-временное значение при взаимодействии с пользователем. Когда мы смотрим на световое пятно, мы понимаем, что где-то есть источник света, понимаем, какой он интенсивности, какой путь прошёл свет от источника до объекта, видим взаимосвязь с отражающей, поглощающей

или пропускающей поверхностью. При создании визуально-информационных связей внутри световой среды мы смотрим на серию световых пятен, но видим образ, обладающий определённой информацией.

Умение мыслить образами, конструировать связи и понимать их влияние на человека является основополагающей категорией формирования профессионального сознания светового дизайнера. Кроме того, составление базового «словаря» приёмов для обучения профессиональному языку света является методологической необходимостью в условиях работы со студентами, имеющими неодинаковый уровень художественной подготовки. Причиной этого является разный профессиональный и образовательный опыт – в диапазоне от дизайнеров, архитекторов, актёров до специалистов технической (лазерные оптики, инженеры, ИТ) и естественнонаучной (химии, физики) направленности. Вопрос разнонаправленности навыков студентов актуален для многих школ, что обусловлено междисциплинарностью светового дизайна как предмета коммуникации и сотрудничества специалистов многих профессиональных областей.

На наш взгляд, установление баланса и преодоление разрыва между техническими и художественными знаниями и навыками студентов, получивших образование в разных областях науки, искусства и дизайна, в упомянутых школах достигается за счёт введения дисциплин по изучению восприятия света человеком, определяющих ориентированный на человека подход в проектной деятельности. Однако применение методики формообразования, основанной на использовании первичных свойств композиции и художественных свойств света, могло бы стать весомым дополнением к формированию профессионального сознания будущих светодизайнеров, усилению их творческого мышления и отказа от шаблонного восприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кандинский В.* О духовном в искусстве. – М.: Архимед, 1992. – 112 с.
2. *Медведев Л.Г.* Формирование графического художественного образа на занятиях по рисунку: учеб. пособие для студ. ХГФ пед. ин-тов. – М.: Просвещение, 1986. – 159 с.
3. *Зинченко В.П.* Посох Осипа Мандельштама и Трубка Мамардашвили. К началам

органической психологии. – М.: Новая школа, 1997. – 336 с.

4. *Якиманская И.С.* Основные направления исследований образного мышления. – М.: Вопросы психологии, 1985.

5. *Кандинский В.* Точка и линия на плоскости / пер. с нем. Е. Козиной. – Санкт-Петербург: Азбука, 2001. – 236 с.

6. *Хан-Магомедов С.О.* Архитектура советского авангарда: в 2 кн. Книга первая: Проблемы формообразования. Мастера и течения. – М.: Стройиздат, 1996.

7. *Гальперин П.Я.* Умственное действие как основа формирования мысли и образа. Вопросы психологии, 1957. – № 6.

8. *Каменская, Г.В.* Методические рекомендации по проектированию наружного архитектурного освещения зданий и сооружений / Г.В. Каменская, Л.И. Петрова и др. – М.: ЦНИИЭП инж. оборудования, 1977. – 63 с.

9. The MSC programme. URL: <https://www.light.aau.dk/msc-education/> (дата обращения: 15.09.2018).

10. Professional studies master programme lighting design. URL: https://studieren.de/fileadmin/europe/germany/_study/docs/Master_Lighting_Design.pdf (дата обращения: 15.09.2018).

11. Lighting M.S. URL: http://catalog.rpi.edu/preview_program.php?catoid=11&pooid=2431&returnto=256 (дата обращения: 15.09.2018).

12. Architectural lighting design courses. URL: <https://www.kth.se/en/studies/master/architectural-lighting-design/course-overview-1.268138> (дата обращения: 15.09.2018).

13. *Лекус Е.Ю., Быстрянцева Н.В.* Световой дизайн: свет как материал, технология, форма: Коллективная монография // Материалы международной научной конференции «Материал-технология-форма как универсальная триада в дизайне, архитектуре, изобразительном и декоративном искусстве». – М.: МГХПА им. С.Г. Строганова, 2018. – 537 с.

14. *Быстрянцева Н.В.* Комплексный подход в создании световой среды вечернего города: автореф. дис. канд. арх. – М.: Московский архитектурный институт (государственная академия), 2015. – 27 с.

15. *Соколова М.А.* Взгляд изнутри. Проектирование архитектурного пространства: интерьер. Учебное пособие. – М.: БуксМАрт, 2016.

16. *Матвеев А.Б.* Эстетика освещения // Светотехника. – 1995. – № 4–5. – С. 2–4.

17. *Щепетков Н.И.* Световой дизайн города. М.: Архитектура-С, 2006. – 317 с..

18. *Феценко В., Коваль О.* Сотворение знака. Очерки о лингвостетике и семиотике искусства. – М.: Языки славянской культуры, 2014.

19. *Батова А.Г.* Принципы проектирования наружного освещения архитектурных объектов: автореф. дис. канд. арх. – М.: Московский архитектурный институт (государственная академия), 2012. – 27 с.



Наталья Владимировна Быстрянцева, канд. архитектуры. Окончила Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (СГТУ) и Московский архитектурный

институт (МАРХИ). Руководитель международной программы магистратуры «Световой дизайн» Университета ИТМО и рабочей группы проектного офиса «Умный Санкт-Петербург» по направлению «Световая среда». Член творческого объединения светодизайнеров RULD. Лауреат Премии Правительства Москвы в номинации «Архитектура и дизайн», 2014 г. Автор 20 научных публикаций. Разработчик дисциплин «Проблемно-ориентированный подход в проектировании световых решений», «Принципы и методы светового моделирования», «Креативные технологии». Соработчик концепции международной образовательной программы магистратуры «Art&Science» Университета ИТМО



Илья Сергеевич Смилга. Окончил Санкт-Петербургскую государственную художественно-промышленную академию им. А.Л. Штиглица (2001 г.). Руководитель производ-

ственной лаборатории Высшей школы светового дизайна Университета ИТМО. Область научных интересов: проектирование и прототипирование мультимедийных инсталляций, световых объектов



Дарья Андреевна Чиримисина, магистр (2018 г.). Инженер Университета ИТМО. Область научных интересов: световой дизайн, визуальное и не визуальное воздействие света на человека, ВС, интерактивные среды



Валерия Валерьевна Лукинская, магистр (2018 г.). Инженер Университета ИТМО. Область научных интересов: световой дизайн, визуальное и не визуальное воздействие света на человека, восприятие, интерактивные среды

Новое в техническом регулировании рынка

В Москве прошёл бизнес-завтрак на тему «Новинки технического регулирования электро- и светотехнической отраслей», организованный Евразийской премией «Золотой Фотон» при поддержке Ассоциации производителей светодиодов и систем на их основе (АПСС)

Сергей Боровков, генеральный директор «Лайтинг Бизнес Консалтинг», организатора Евразийской премии «Золотой Фотон», открывая мероприятие, отметил, что этим заседанием начинается цикл встреч клуба «Золотой Фотон», которые посвящены проблемам электротехнической и светотехнической промышленности. Всего планируется в этом году провести шесть таких встреч.

Техническое регулирование в отмеченных отраслях – наиболее «горячая» на сегодняшний день тема, поскольку в конце 2019 года были приняты достаточно серьёзные изменения в законодательстве по техническому регулированию.

Всё это окажет существенное влияние на деятельность производителей. Прежде всего, изменяются технические требования к светотехническим приборам и источникам света. И к этому необходимо серьёзно подготовиться.

Сергей Боровков отметил, что до недавнего в Российской Федерации действовало около 4000 органов по сертификации продукции. Из них действующих организаций по сертификации всех видов продукции было 650. Значительная часть этих

организаций в той или иной степени были за последнее время закрыты после проверки их деятельности. Основной претензией к этим организациям являлось полное отсутствие или несоответствие технической испытательной базы нормативным требованиям, и, соответственно, выдача сертификатов без испытаний. Как следствие, все выданные ими сертификаты становятся недействительными.

«Ситуация с техническим регулированием электро- и светотехнической отраслей за последние 3 года сильно изменилась – если раньше можно было получить сертификат соответствия, не проводя никаких испытаний, то сегодня, в большинстве случаев, это уже не так. А в 2020 и 2021 году вступают в действие два новых технических регламента на продукцию – 037/2016 и 048/2019, которые потребуют новых испытаний и затрат со стороны производителей, – отметил Сергей Боровков, – Если производители не смогут вовремя получить сертификаты соответствия новым техническим регламентам, то это может привести к коллапсу на рынке с наличием социально-значимой продукции – ламп и светильников».

Кроме того, компаниям необходимо учесть, что количество органов сертификации резко сократилось, конкуренция между ними снизилась, соответственно стоимость сертификации возрастёт. Именно тому, как компаниям сделать всё вовремя и правильно, был посвящён прошедший бизнес-завтрак.

Первым выступил Игорь Максимов, советник Департамента технического регулирования и аккредитации Евразийской экономической комиссии, рассказавший, что в настоящее время в нашей отрасли принято к исполнению 47 технических регламентов, большая часть из которых вступила в силу. Сейчас идёт работа над, так называемыми «актами второго уровня».

Далее он подробно остановился на регламенте работы компаний по проведению сертификации и ответил на многочисленные вопросы представителей компаний-производителей.

Александр Богданов, руководитель отдела нормативно-технического регулирования «Световые технологии», председатель правления АПСС в своём докладе в первую очередь отметил недостатки регламентов, которые разрабатывались многие годы. Остановившись на самих технических характеристиках для светотехнической продукции в новых регламентах, А. Богданов похвалил разработчиков нормативов за общую корректность этих требований, в то же время раскритиковал избыточность требований как к люминесцентным светильникам и лампам, так и к лампам накаливания.

По его мнению, избыточными являются и требование к уличным светильникам со светодиодным источником света иметь встроенную функцию регулирования светового потока, хотя в настоящее время основной мировой тенденцией для изменения светового потока уличных светильников является его регулирование по цепям питания, т.е. изменением напряжения питания.

Докладчик большое внимание уделил проблеме нормативов по ограничению пусковых токов светотехнического оборудования в новых регламентах. Предложенные ограничения не соответствуют реальной физической картине, и яв-



ляются, как минимум, пожароопасными, т.е. не соответствующими требованиям по безопасности.

А. Богданов уделит внимание и ряду других проблем, просматриваемых в новых нормативных документах, обратив внимание присутствующих, в частности, на вопросы новых критериев по энергоэффективности и вопросов ограничения пульсации световых приборов.

Затем выступавшие эксперты: Роман Беляев, главный метролог ВНИСИ, руководитель группы метрологии и менеджмента качества ИЦ ВНИСИ; Дмитрий Блудов, заместитель руководителя ОС АНО «Сертификационный центр «Связь-сертификат» заместитель руководителя ОС АНО «Сертификационный центр «Связь-сертификат», Игорь Шмаров, заведующий лабораторией «Строительная светотехника», ФГБУ НИИ строительной физики РААСН – осветили важные для рынка темы: требования к энергетической эффективности в Евразийском экономическом союзе, нововведения в нормативно-правовые акты – взгляд со стороны производителей, нормативные документы и способы проверки требований к светотехнической продукции, изменения в области технического регулирования стран ЕАЭС.

Также были рассмотрены экономические и практические аспекты сертификации продукции для производителей и импортёров и изменения СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»

Как сказала по окончании встречи Ольга Грекова, генеральный директор Ассоциации производителей светодиодов и систем на их основе, АПСС поддерживает мероприятия, направленные на информирование сообщества о тех важных изменениях, которые происходят в настоящее время. К сожалению, сложилась ситуация, когда разобраться в нормотворчестве, не вникая вглубь вопроса, становится сложно. И именно информирование, разъяснения экспертами становится востребованной работой. Она поблагодарила организаторов встреч, на которых затрагиваются важнейшие для нашей отрасли вопросы.

*Е. С. Серый,
Специальный корреспондент
журнала «Светотехника»*

В пустыне Негев (Израиль) вышла на проектную мощность солнечная электростанция башенного типа. Принцип её работы – получение водяного пара с использованием солнечной радиации. В центре солнечной электростанции (СЭС) стоит башня, на вершине которой находится резервуар с водой.

Эта солнечная тепловая электростанция «АШЛИМ» расположена недалеко от кибуца с тем же названием в пустыне Негев. Станция работает на технологии *BrightSource* разработанной в Израиле. СЭС считается одним из самых передовых и крупных объектов такого типа в мире.

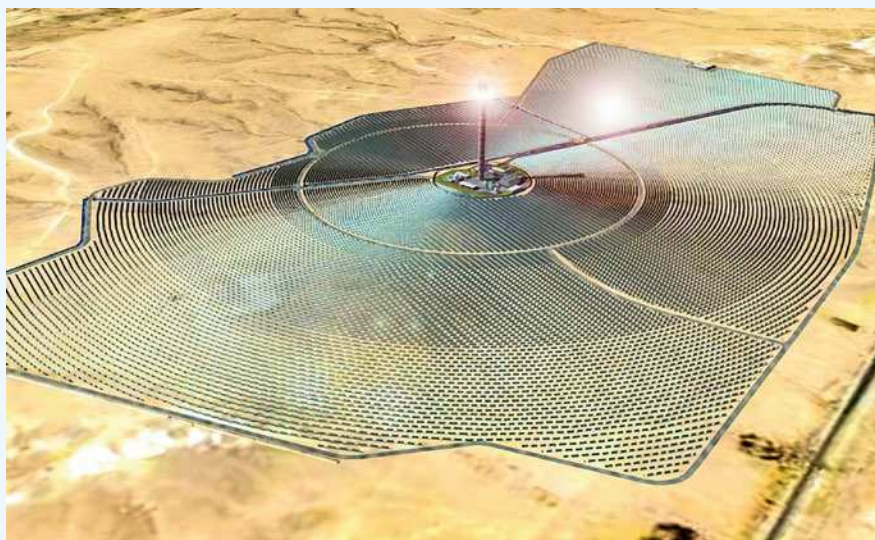
На территории размером с 400 футбольных полей (примерно миллион квадратных метров) расставлены 55000 зеркал, которые отражают солнечный свет в направлении самой высокой солнечной башни в мире высотой в 240 метров. Зеркала управляются компьютерами, отслеживая движение Солнца. Башня имеет установленную мощность 121 МВт и производительность 320 ГВт электро-

энергии в год, что позволяет обеспечить электроэнергией 120000 частных домов.

Для этой станции учёные из университета имени Бен-Гуриона предложили остроумный и простой способ очищения солнечных панелей от пыли, которая значительно снижает КПД панелей, особенно в пустыне. Было создано особое водоотталкивающее покрытие, благодаря которому стекающая по панелям вода захватывает с собой основную часть пыли. Открытие стало возможным благодаря наблюдениям за листьями лотоса, на которые не воздействует пыль из-за особой поверхности, покрытой естественной гидрофобной тканью

Электростанция в пустыне позволит Израилю приблизиться к поставленной правительством цели: обеспечить поставки 10 % потребляемой электроэнергии из возобновляемых источников энергии.

Е.А. Лесман, инженер – энергетик, корреспондент журнала «Светотехника» в Санкт-Петербурге



Защита диссертации Т.В. Мешковой

12 марта в НИУ «МЭИ» на учёном совете МЭИ.012 состоялась успешная защита диссертации Т.В. Мешковой на тему «Качество освещения при неравномерном распределении яркости в поле зрения».

Безопасность, технологичность, функциональность, дизайн среды – вот основы комфорта жизни современного человека. Но что, как не свет, формирует его комфорт? Именно он влияет на эмоциональное состояние человека, формирует его восприятие и отношение к окружающей действительности!

В последнее время основной тенденцией в архитектуре стало использование различных материалов отделки с зеркальным отражением. При освещении подобных помещений возрастает роль многократных отражений, и уже не светильники прямого света вносят основной вклад в освещённость, а отражённый свет от всех поверхностей. Такое обилие зеркально отражающих поверхностей в интерьере повлекло за собой необходимость оценки комфорта пребывания в подобных помещениях.

Так, например, в изначальном проекте станции Тропарёво Сокольнической линии метро предполагалась установка зеркал на потолке. Однако в процессе отделки стало ясно, что зеркальное отражение на полу получается слишком ярким, и создаст дискомфорт у пассажиров. Поэтому, несмотря на то что часть станции уже была отделана в соответствии с проектом, декор демонтировали и несколько упростили. Этих затрат можно было бы избежать при условии предварительного моделирования и оценки качества освещения на станции.

Фактически в руках современного проектировщика для оценки качества освеще-

ния в помещении есть рекомендованный МКО обобщённый показатель дискомфорта *UGR (Unified Glare Rating)*, который используется для оценки дискомфортной блескости. Однако по своей природе он обладает рядом недостатков, так как основан на исследованиях источников малых угловых размеров равномерной яркости круглой формы. Поэтому из-за особенностей алгоритма расчёта светотехнических программ таких, как *DIALux* и *Relux*, *UGR* может учитывать только источники прямого света. Ещё в 1915 г. американская исследовательница Клэрэнс Фери показала, что именно пространственно-угловое распределение яркости определяет ощущение дискомфорта, а значит и критерий качества освещения.

Поэтому целью кандидатской диссертации стало исследование критерия качества освещения, основанного на пространственно-угловом распределении яркости, разработка методики его определения и апробация в экспериментальных и реальных условиях.

В рамках работы была создана экспериментальная установка, проведена её проверка на основе классической теории, сформулирован критерий качества, проведена его проверка в лабораторных и реальных условиях.

Было экспериментально доказано, что основными факторами, влияющими на ощущение дискомфорта, являются распределение яркости в сцене и контраст, при этом новый критерий качества, предложенный на кафедре светотехники НИУ «МЭИ» может являться расширением рекомендованного МКО показателя дискомфорта *UGR* на примере анализа освещения станций Московского и Петербургского метрополитенов.

Так, на станциях Солнцево и Говорово Сокольнической линии метрополитена была показана неинформативность обобщённого показателя *UGR* для оценки качества освещения. Например, на станции Солнцево значение *UGR* максимально, в то время как по оценкам наблюдателей на станции Говорово ощущалась наибольшая степень дискомфорта. Надо отметить, что анализировалась не реальная картина освещения, так как при расчёте не были учтены зеркальные блики на полу и других поверхностях станций. И уже при добавлении фиктивных источников, имитирующих отражённые блики на полу, значения показателя *UGR* превысили допустимые значения. Однако подобные манипуляции при моделировании освещения в помещениях в реальности сопряжены с большим количеством трудностей при расчёте многократных отражений, и проектировщиками совершаться не будут. При этом предложенный критерий качества показал высокую корреляцию с ответами наблюдателей.

Необходимо отметить, что, благодаря новому подходу, появилась возможность точного анализа качества освещения при учёте всего распределения яркости в сцене без дополнительных манипуляций, допущений, ограничений и усреднений.


Оппонентами Т.В. Мешковой выступили д.т.н. Р.И. Столяревская, которая выделила актуальность поднятой проблематики, что подтверждается апробацией доклада на конференции МКО в апреле 2018 года в секции «Качество освещения», а также к.т.н. Д.Н. Макаров, подчеркнувший в своём выступлении практическую значимость алгоритма, который может быть использован проектными организациями для решения задачи достоверной оценки и сравнения осветительной установки по уровню дискомфорта при проектировании.

Было задано много вопросов относительно методики проведения экспериментов в лабораторных условиях и с реальной осветительной установкой, о погрешности измерений при визуальном эксперименте и дальнейших планах исследования предложенного критерия качества.

В прениях выступили В.П. Будаков – д.т.н. профессор кафедры светотехники НИУ «МЭИ», А.А. Григорьев – д.т.н. профессор, зам. зав. кафедры светотехники НИУ «МЭИ», И.Н. Мирошникова – д.т.н. профессор, директор института радиотехники и электроники НИУ «МЭИ».

В ходе доклада и его обсуждения была отмечена масштабность проделанной работы, актуальность, научная новизна, обоснованность, справедливость и достоверность полученных результатов.





СветоСервис ВОЛГОГРАД

Умный свет — для умного города!
«Светосервис-Волгоград».



000 «Светосервис-Волгоград»
400107, г. Волгоград, ул. Карла
Либкнехта, 4



svetoservis.ru



+7 (8442) 36-63-32
+7 (8442) 36-63-31

Наши преимущества:

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

Качество
Надежность
Оперативность



Россия, г. Москва,
проспект Мира, 106



opora-e.com



(495) 785-37-40

**Оформить подписку, купить журнал или статью можно на сайте
журнала «Светотехника» www.l-e-journal.com
(периодичность издания 1 раз в 2 месяца)**

«Светотехника». Полугодовая подписка на 2020 г.

«Светотехника»	бумажная	1 995 руб.
«Светотехника» для физ. лиц	электронная	1 800 руб.
«Светотехника» для юр. лиц	электронная	6 000 руб.

«Светотехника». Годовая подписка на 2020 г.

«Светотехника»	бумажная	3 990 руб.
«Светотехника» для физ. лиц	электронная	3 600 руб.
«Светотехника» для юр. лиц	электронная	12 000 руб.

«Light & Engineering». Полугодовая подписка на 2020 г.

«Light & Engineering»	бумажная	80 долл. США*
«Light & Engineering» для физ. лиц	электронная	70 долл. США*
«Light & Engineering» для юр. лиц	электронная	140 долл. США*

«Light & Engineering». Годовая подписка на 2020 г.

«Light & Engineering»	бумажная	160 долл. США*
«Light & Engineering» для физ. лиц	электронная	140 долл. США*
«Light & Engineering» для юр. лиц	электронная	275 долл. США*

Стоимость журнала

«Светотехника»	бумажная	680 руб.
«Светотехника»	электронная	600 руб.
«Light & Engineering»	бумажная	40 долл. США*
«Light & Engineering»	электронная	35 долл. США*

Стоимость статьи

«Светотехника»	электронная	400 руб.
«Light & Engineering»	электронная	6 долл. США*

*Примечание: по курсу ЦБ на дату оплаты

**Купить журнал «Светотехника» для детей и их родителей можно
на сайте журнала «Светотехника» www.l-e-journal.com
(периодичность издания 3 раза в год)**

Журнал «Светотехника» для детей и их родителей

Бумажная	690 руб.
Электронная	300 руб.

ISSN 0039-7067



9 770039 706006 >

Адрес редакции: 129626, г. Москва, Проспект Мира, д. 106, офис 331
Тел. (495) 682-58-46, 682-19-04, E-mail: bulgakova@l-e-journal.com