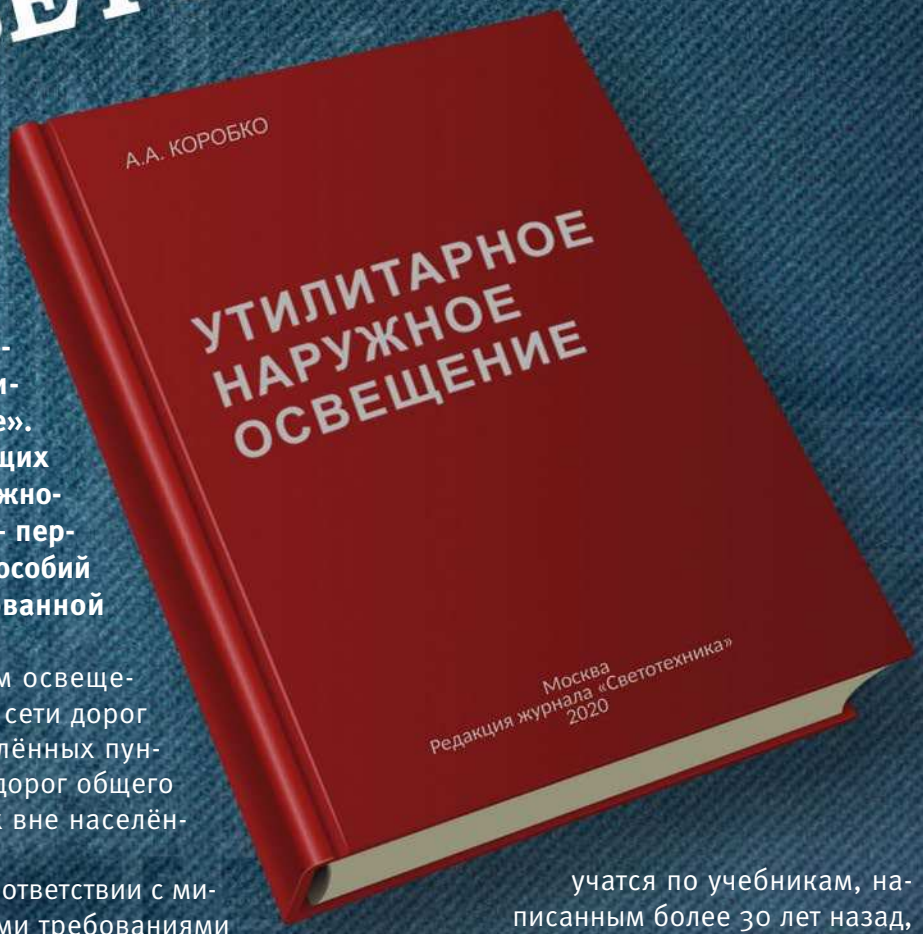
ISSN 0039-7067

СВЕТОТЕХНИКА

6·2020

opora
engineering
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

НОВАЯ КНИГА – УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО СВЕТОТЕХНИКЕ



Вышло из печати учебное пособие А.А. Коробко «Утилитарное наружное освещение». Монография одного из ведущих специалистов в области наружного освещения А.А. Коробко – первая книга из серии учебных пособий по светотехнике, запланированной редакцией нашего журнала.

Книга посвящена вопросам освещения транспортно-пешеходной сети дорог в городских и сельских населённых пунктах, а также автомобильных дорог общего пользования, расположенных вне населённых пунктов.

Весь материал изложен в соответствии с мировым опытом и современными требованиями к наружному освещению, регламентируемыми национальными стандартами, в разработке которых автор пособия принимал непосредственное участие.

Книга предназначена для студентов профильных вузов и специалистов, занимающихся вопросами проектирования, монтажа и эксплуатации установок наружного освещения.

Серия учебных пособий по светотехнике, которая планируется к выходу под научным руководством проф. Ю.Б. Айзенберга и зав. кафедрой Г.В. Бооса, призвана преодолеть отставание учебно-методической литературы по светотехнической специальности, сложившееся и с каждым годом усугубляющееся в нашей стране. Не секрет, что современные студенты-светотехники до сих пор учатся по учебникам, написанным более 30 лет назад, которые – при всех своих несомненных достоинствах и хрестоматийности – не учитывают всё то, что было достигнуто светотехнической наукой, техникой и промышленностью за прошедшие годы.

В ближайшем будущем – в первой половине 2021 года – выйдут следующие два пособия серии: монография М.Е. Клыкова «Управляющая аппаратура для светодиодов и разрядных ламп», посвящённая вопросам расчёта и проектирования устройств включения разрядных ламп и светодиодов, и книга «Введение в светотехнику» известного российского специалиста Л.П. Варфоломеева, предназначенная для студентов бакалавриата и специалистов – не светотехников, работающих в светотехнической отрасли.

Приобрести книгу А.А. Коробко и подать заявки на приобретение готовящихся к выходу пособий можно в редакции нашего журнала по e-mail: bulgakova@l-e-journal.com

СВЕТО ТЕХНИКА
LIGHT & ENGINEERING

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

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

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

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 Biziak*), 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 METAC, 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
Д. Вейтч *(Jennifer Veitch)*, National Research Council of Canada, Канада
А.А. Григорьев, д.т.н., НИУ «МЭИ», Москва
С. Дарула *(Stanislav Darula)*, Academy Institute of Construction and Architecture, Словакия
О.Е. Железникова, к.т.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск
Е.А. Заева-Бурдонская, канд. искусствоведения, МГХПА им. С.Г. Строганова
П.П. Зак, д.б.н., проф., ИБХФ РАН, Москва
Т. Казанасмаз (*Tugce Kazanasmaz*), Измирский технологический институт, Турция
А.А. Коробко к.т.н., БЛ Групп, Москва
С. Мазумдар (*Saswati Mazumdar*), университет Джадавпур, Индия
Д.Н. Макаров, к.т.н., ЗАО «Точка Опоры»
Д.А. Мельников, Министерство Энергетики РФ, Москва
Э. Миллс *(Evan Mills), Lawrence Berkeley Laboratory*, США
Л.Г. Новаковский, к.т.н., ООО «Фарос-Алеф»
Й. Оно *(Yoshi Ohno)*, NIST Fellow, (Президент МКО в 2015–2019 гг.), США
А.Т. Овчаров, д.т.н., проф., ТГАСУ, Томск
Л.Б. Прикупец, к.т.н., ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва
Л.Р. Ронки *(Lucia R. Ronchi)*, Higher School of Specialization for Optics, University of Florence, Италия
А.А. Рябцева, д.м.н., проф., МОНИКИ, Москва
А.К. Соловьёв, д.т.н., проф., НИУ «МГСУ», Москва
К.А. Томский, д.т.н., проф., СПбГИКИТ, С.-Петербург
П. Торнс (*Peter Thorns*), Zumtobel Group, Австрия
Г. Циссис (*Geordes Zissis*), университет Тулузы, Франция
А.Г. Шахпарунянц, к.т.н., генеральный директор ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва
Н.И. Щепетков, д. арх., проф., МАРХИ (ГА), Москва

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Генеральный директор
Н.С. Шерри; sherri@bl-g.ru
Старший научный редактор
Т.В. Мешкова; mtv@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
П.А. Федорищев; fpa@l-e-journal.com
Зав. редакцией
М.И. Титаренко; titarenko@l-e-journal.com
Стилист английской версии
М.Д. Виноградова
Секретарь редакции
Е.А. Булгакова; bulgakova@l-e-journal.com
Дизайнер-верстальщик
А.М. Богданов
Контент-менеджер
Е.С. Серый

ИНОСТРАННЫЕ КОРРЕСПОНДЕНТЫ

Аргентина
Пабло Икстайна (*Pablo R. Ixtaina*), Национальный технологический университет Ла-Платы;
Франция
Георг Циссис (*Geordes Zissis*), университет Тулузы;
Индия
Сасвати Мазумдар (*Saswati Mazumdar*), университет Джадавпур;
Словения
Грега Бизяк (*Grega Biziak*), Люблянский университет;
Турция
– Тугче Казанасмаз (*Tugce Kazanasmaz*), Измирский технологический институт;
– Эрдал Шехирли (*Erdal Sehirli*), универститет 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 26.10.20. Подписано в печать 26.11.20
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 6·2020

В НОМЕРЕ

НОЯБРЬ • ДЕКАБРЬ

Колонка главного редактора 4

Бизнес и инновации 25, 30, 36, 52

Виноградов В.В. Варианты экспериментального дизайна в СССР на примере дизайн-проекта бытовых светильников 5

Столяревская Р.И. Обзор особенностей использования мини-спектрорадиометров с ПЗС-матрицами в прикладной фотометрии 12

Катаев М.Ю., Дадонова М.М. Ефременко Д.С. Коррекция освещённости многовременных *RGB*-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата 19

Ширяев Д.С., Козырева О.А., Полухин И.С., Щеглов С.А., Дегтярёва С.А., Одноблюдов М.А., Бугров В.Е. Система интеллектуального освещения и передачи данных на основе *RGBW*-светодиодов 26

Гиясов А.И. Светопланограф, моделирующий инсоляцию зданий и застройки арктической зоны России 31

Аяз М., Юсел У., Эрхан К., Оздемир Э. Новая энергоэффективная система управления освещением с учётом изменения естественной освещённости в помещении: проектирование и внедрение 37

Талби М., Менсиа Н., Эззауйя Н. Моделирование фотоэлектрической панели с использованием *MATLAB* и *Simulink* и применение метода отслеживания точек максимальной мощности на основе нейронных сетей 46

Ошлаков В.Г., Щербаков А.П. Оптимизация поляризационного нефелометра 53

Агирбас А., Алакавук Э. Оптимизация фасада учебного корпуса с использованием многокритериальных эволюционных алгоритмов 60

Овчукова С.А., Кондратьева Н.П., Коваленко О.Ю. Экономия электроэнергии в световых технологиях сельскохозяйственного производства 68

Ду Ц., Шарплс С. Динамический анализ влияния загрязнения воздуха на наличие естественного освещения в офисе открытой планировки в Лондоне 72

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Конференции и выставки в 2021 году (I квартал) 80

Правила оформления рукописей 81

ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИИ

Защита диссертации В.Г. Тереховым 67

КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

Письмо читателя 30

Содержание журнала «Светотехника» за 2020 год 84

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Новая книга – учебное пособие по светотехнике 1

Светлые решения для умного города от МСК БЛ Групп 10

Умный свет – для умного города! «Светосервис-Волгоград» 71

Освещение беседки «Эолова Арфа» в г. Пятигорске («Светосервис-Ставрополье») 83

Opora *Engineering*: качество, надёжность, оперативность ..... **2 с. обл.**

Управление светом – основа безопасности ..... **3 с. обл.**

Ультрафиолетовые облучатели ЛЗСИ ..... **4 с. обл.**

Уважаемые читатели!

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

В этом году исполняется 90 лет со дня образования Московского энергетического института путём объединения электротехнического факультета Московского высшего технического училища и Электротехнического факультета Московского института народного хозяйства имени Плеханова. Как и многие советские технические университеты, МЭИ – дитя грандиозных планов индустриализации в СССР, которая потребовала подготовки за период с 1930 по 1935 год около 43,5 тысяч инженерно-технических специалистов, в то время как их число в стране в 1929 г. составляло 66 тысяч. Самое деятельное участие в организации нового института приняли К.А. Круг и Б.И. Угримов. К.А. Круг возглавил в МЭИ кафедру основ электротехники, а Б.И. Угримову преподавать в МЭИ не довелось – в августе 1930 года его арестовали по «Делу Промпартии».

В первые два года существования института в нём не было факультетов, а студенты, начиная со второго года обучения, распределялись по специальностям, каждая из которых имела свой учебный план и своего заведующего, что было прообразом будущих кафедр. В 1932 г. в соответствии с вышедшим в этом году партийно-правительственным постановлением о реорганизации высшей школы в структуре МЭИ было создано шесть факультетов – электроэнергетический (ЭЭФ), теплотехнический (ТТФ), электромашино- и аппаратостроительный (ЭМАС), электросвязи (ЭСФ), электрификации транспорта (ЭлТрФ) и инженерно-экономический (ИЭФ), а в 1933 г. к ним добавился физикоэнергетический факультет (ФизЭн).

В 1932 г. в МЭИ были создан светотехнический цикл, которым руководили сначала профессор С.О. Майзель, а затем – профессор М.Я. Лапиров-Скобло. По инициативе профессоров К.А. Круга и Я.Н. Шпильрейна весной 1933 г. был организован Физико-энергетический факультет с двумя выпускающими кафедрами, одна из которых – кафедра светотехники, где предстояло готовить инженеров по специальности «Светотехника и прожекторостроение» и трём основным направлениям – источникам света, световым приборам и осветительным установкам. Заведующим кафедрой был назначен профессор Л.Д. Белькинд.

С тех пор судьба светотехники в нашей стране, да и во многих зарубежных странах, связана с Московским энергетическим институтом. Поэтому 90-летний юбилей МЭИ является и праздником светотехников. Да, в стране были кафедры и в других технических университетах, но, думаю, никто не обидится и согласиться со мной, что кафедра светотехники МЭИ была лидером и даже символом светотехники в нашей стране. Мне кажется, самым ярким символом нашей кафедры является корпус «Е» – дом 13 по Красноказарменной улице в Москве, больше известный в МЭИ как «Бастилия».

Расцвет кафедры и специальности наступил в послевоенное время. С 1948 по 1973 гг. кафедрой руководил профессор В.В. Мешков, большой заслугой которого является превращение кафедры в ведущий в стране педагогический и научный центр. При нём сформировались почти в современном виде основные дисциплины. Он возобновил выпуск научно-технического журнала «Светотехника», став его главным редактором. Публикации в журнале того времени соответствовали высокому научному потенциалу кафедры. Именно в это время на кафедре сформировались основные научные направления светотехники: световое поле, физиология зрения, качественные характеристики освещения, методы расчёта световых приборов, моделирование, конструирование и технология источников излучения. Не хочу и не буду, рискуя кого-то в короткой редакторской колонке упустить и не назвать, перечислять имена сотрудников кафедры, внёсших значительный вклад в развитие светотехники.

Но, как мне кажется, юбилейные настроения не должны заслонять нам реальные существующие проблемы – как кафедры, так и светотехники в стране в целом. В своих многочисленных колонках я уделял немало времени анализу состояния образования на кафедре. Если отбросить детали, то главное сейчас – смена поколений. Здесь и чисто возрастные проблемы, и проблемы содержания дисциплин, уровня научной работы. Представляется главным здесь издание новых учебников по перспективным направлениям современной светотехники. Представляется, что журнал, кафедра и отраслевой НТС ответственны за состояние светотехнической науки.

Однако современным состоянием светотехнического образования серьёзно озабочен и технический комитет МКО по образованию, созданный в прошлом году на конференции в Вашингтоне. Сегодняшнее образование в мире, строящееся на основе бакалавриатов по электротехники или архитектуре, не соответствует вызовам времени, даёт недостаточные знания даже для традиционных требований проектирования, но ещё меньше для проектирования в соответствии с современными требованиями освещения по дизайну, основанными как на эстетике, так и на эргономике. Чтобы дизайн освещения учитывал эти элементы, необходимо предложить образование другого типа. Однако на сегодня ещё более активно развиваются области незрительного действия света, что требует уже принципиально нового подхода в образовании.

Кафедра светотехники МЭИ, где обучение светотехники образует замкнутую систему, при всех названных проблемах могла бы стать образцом образования будущего.

Главный корпус МЭИ – Красноказарменная, 17

Корпус «Е», он же «Бастилия» – Красноказарменная, 13

Варианты экспериментального дизайна в СССР на примере дизайн-проекта бытовых светильников

В.В. ВИНОГРАДОВ
НИТУ «МИСиС», Москва
E-mail: vladimir@vinogradov.us

Аннотация

В статье представлены некоторые перспективные образцы осветительных средств для жилища. Приведены пластические характеристики и идеи творческих решений светильников, разработанных в середине 1980-х годов. Описан проектный подход и творческие методы эксперимента в дизайне. Показан вариант видения и поисковые модели ведущих художников-конструкторов СССР. Вскрыты методики проектного эксперимента. Отмечены наличие и потребность в расширении нетрадиционного дизайнерского подхода к проектированию (использование методики эксперимента). Именно в стенах ВНИИ технической эстетики (ВНИИТЭ) существовали для этого подходящие условия.

Ключевые слова: ВНИИТЭ, методики формообразования, бытовые светильники, световые технологии, образ и воплощение, стайлинг и функционализм, эксперимент в дизайне.

В рамках программы разработки светильников для ВНИСИ им. С.И. Вавилова во ВНИИТЭ в середине 1980-х годов были разработаны оригинальные модели светильников с нетрадиционной композицией и световой схемой [1].

Для описания разработок изделий в статье применяется специфичная профессиональная лексика, свойственная именно коллективу разработчиков. Её ассоциативные посылки позволяли дизайнерам того времени нетривиально подходить к генерации проектного образа [2]. Коллекция светильников создана для комплексного обеспечения потребностей жилища в освещении.

На архивных фотографиях-иллюстрациях представлены модели светильников, спроектированные творческим коллективом. Его состав – Владимир Виноградов, Ирина Преснецова и Алексей Хауке [3]. Дизайнеры этого альянса делали проектную установку на перспективу – разрабатывали проекты, не обеспечивающие мгновенный материальный успех. Обычно задавались художественно-конструкторские работы концептуального и экспериментального характера. При этом учитывались эргономические факторы, технологические закономерности производства и соответствие тенденциям времени. Так проявлялась проектная фаза.

Демонстрировались специфичные проектные алгоритмы, ставка на нестандартную компоновку, конструкцию и активный игровой проигрыш потребительской ситуации [4], а в идеологии проектов – исключение «украшательства» принципов стайлинга, заимствований и плагиата. Возможно, так стирается технократическое и косное восприятие [5].

Кажется, что данный проектный подход бутафорский и непродуктивный? Но такой театральный подход генерирует нетривиальные конструкции и формы. Полагается новое формообразование и расширяется бытовая потребительская ниша.

Показанные ниже светильники изготовлены на Опытном производстве ВНИИТЭ (базировавшемся на территории ВДНХ СССР). В них использовались дюралюминий, сталь, ткань, оргстекло и краска. Модели выполняли токари и фрезеровщики, а подгонку деталей – опытные слесари и макетчики.

При создании светильников творческий альянс дизайнеров создал самые неожиданные образы, использовал чудн***ы***е и смелые ассоциации, задавая яркие ипостаси света. Рабочие девизы, зачастую иррациональные и метафоричные, формируют световую картину, создавая диффузный (рассеянный), направленный, «интеллектуальный» или «разумный» свет.

Особенным направлением разработок стали фантазийные объекты с метафорической образной посылкой. У каждой модели светильника проявлен своеобразный почерк авторов. В формировании концепции светильников дизайнерами использованы имена известных персонажей древнегреческих мифов. Такой принцип творческой фабулы специфично проявился в дизайне светильников.

Некоторые модели созданы для декора, утверждения так называемого пластического ключа в интерьере. Примечательно, что функциональные и эргономические качества объектов-светильников не всегда доминировали в проектных установках.

Выбранный цвет большинства моделей радикальный – «строгий чёрный». Это соответствовало входившему тогда в моду минимализму, резко выделяя объекты дизайна среди прочих аналогов. Объекты оборудования жилища получались контрастными к окружающей среде интерьера жилища. Дешёвая позолота исключалась как свиде-

Рис. 1. Люстра кинетическая «Галактика» двойного света

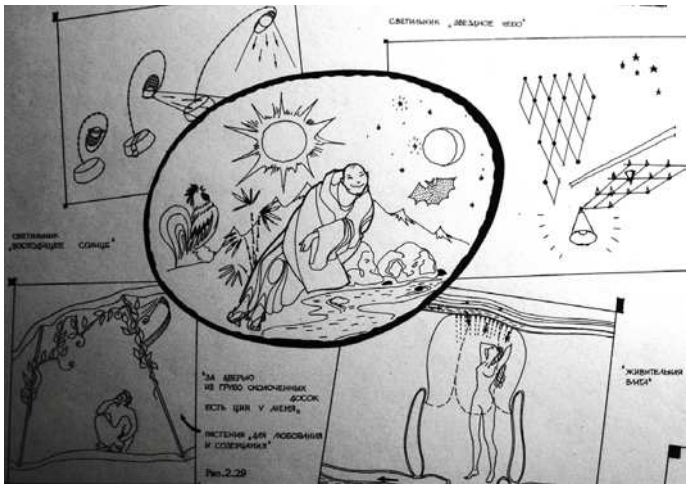


Рис. 2. Графический эскиз применения и осмысления дизайн-идеи светильника «Галактика»

Рис. 3. Модель потолочного кронштейна «Малевич» для подвесного светильника

тельство низкопробного украшения или простейший маркетинговый ход.

Расширить ассортимент по формированию световой среды в квартире должен был потолочный светильник «Галактика» (рис. 1), конструктивно предусматривающий два режима освещения пространства – общего и местного. При этом в полости чёрного металлического отражателя конической формы установлена мощная лампа, и создаётся направленный вниз световой пучок. Световое пятно от светильника можно регулировать, опуская или поднимая его светоизлучающую часть. Художественная структура композиции светильника – ажурный параллелограмм с коническими шарнирами; в узлах конструкции размещены мерцающие миниатюрные лампочки. Сжимая или растягивая решётку можно легко компоновать конфигурацию каркаса. К примеру, в одном варианте выстраивается созвездие «Большая медведица», а при некотором растяжении и сдвиге ромбов её каркаса составляется новая астральная комбинация. Светильник-инсталляция создаёт на потолке комнаты своеобразный, романтично сверкающий парад планет. Можно создавать и вспомогательное мягкое (рассеянное) освещение.

На рис. 2 показана потребительская ситуация применения светильника «Галактика»: в эскизной графике, проектный поиск по созданию образа фантазийной жилой среды.

В только что входившем в моду того времени стилевом направлении «Арт-дизайн» [6] решёно устройство динамического подвеса светоизлучающей части светильника (рис. 3) – «обнажённая» конструкция как принцип формирования образа. Кронштейн, устанавливаемый на потолке кухни, назван звонко «Малевич» и предназначен для перемещения светильника в нужное место пространства. В пластической концепции дизайна устройства заложена идея воссоздать плоскостные графические композиции русских авангардистов в объёмном, трёхмерном виде.

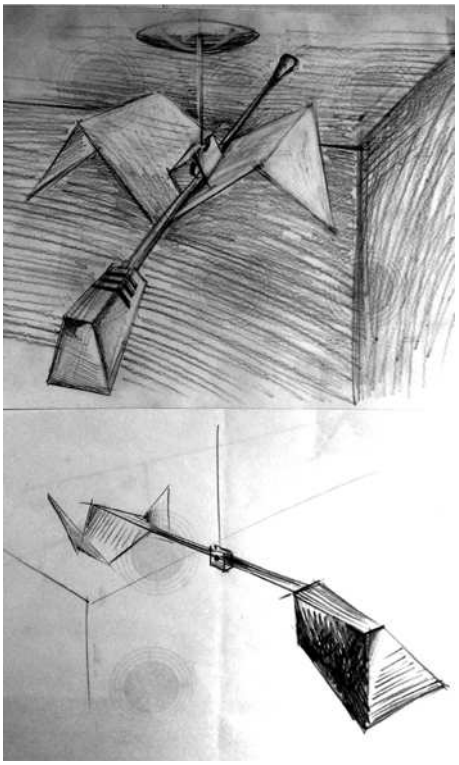


Рис. 4. Мобильный потолочный светильник «Аист» (архивный рисунок)

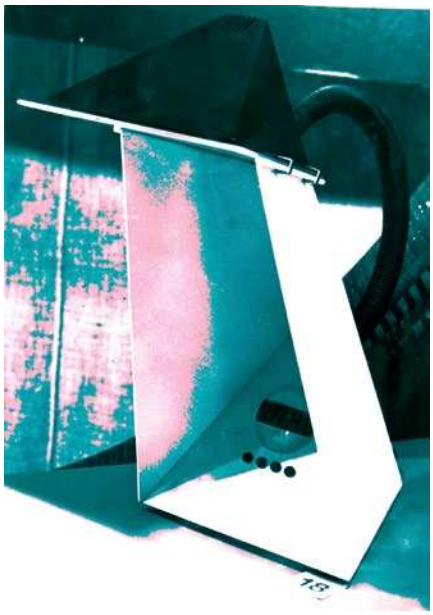


Рис. 5. Настольный светильник «Соня» (действующий макет)

Рис. 6. Модель комнатной люстры «Медея» (варианты раскрытия абажура)

Силуэт кронштейна являет строгую конструктивистскую композицию. Несомненно, его внешний вид навеян картиной Эль Лисицкого «Бей красным клином». Стилистику можно отнести к супрематизму, без декора барочных загогулин. Очевидны параллели между произведениями станкового искусства и реальными дизайнерскими устройствами для освещения пространства.

Конструкция кронштейна проста и надёжна. На круглой монтажной площадке размещено стальное кольцо для перемещения штанги в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На кольце посредством двух цилиндрических втулок выдвигается несущая штанга. Диск основания обеспечивает вращение конструкции вокруг вертикальной оси на 360°. Это позволяет устанавливать светоизлучающую часть в нужную зону пространства и менять точку подвеса светильника. Секрет конструкции в том, что при свободном вращении штанги на кольце, её заклинивает от приложенной нагрузки. Так фиксируется положение подвеса плафона в нужной точке. Причём диаметр поворотного кольца рассчитан так, чтобы при максимальном выдвижении штанги компенсировать крутящий момент.

Подобную задачу – установки в нужном месте пространства светоизлучающей части светильника – «решает» и светильник «Аист» (рис. 4). Его изящный силуэт напоминает парящую в небе птицу. Композицию составляет стержень с коробчатым отражателем и «уравновешивающий» элегантный белый лист-отражатель, сложенный как в оригами. Конструкция подвешивается на потолке за крюк и может перемещаться посредством шнура со скобой-ручкой дельтовидной формы[1].

Переносной светильник «Соня» (рис. 5) создаёт «вечерний» свет в спальне. Внешне похож на кувшин. Ручка-дуга, на задней поверхности, позволяет как из лампы Алладина разливать свет в удобные закоулки. В нижней части светильника расположен электронный будильник. Следует отметить, было модно расширять возможности бытовых предметов дополнительными опциями: например, встроить радиоприёмник, будильник или др. устройства, повышающие комфорт.

Отличительная черта люстры «Медея» (рис. 6) – изменение площади поверхности затеняющего абажура. Сферический абажур выполнен из шёлка – лёгкого роскошного материала с богатым культурным шлейфом. Его светопроницаемость позволяет создавать мягкую светотеневую картину в интерьере и оптимальное освещение. Люстра хороша для создания театрального «уютного» пространственного эффекта в интерьере.

[1] Светильник, кстати, напоминает культовый артефакт 1920-х годов «Летатлин», созданный Владимиром Татлиным.

Рис. 7. Настенный светильник «Данко»

Рис. 8. Волшебная лампа «Шахерезада»

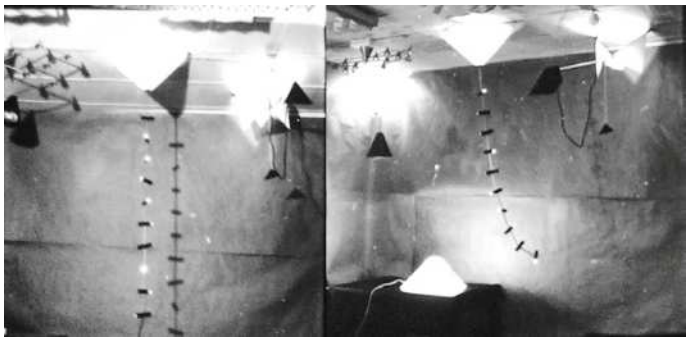


Рис. 9. Размещённые на потолке светильники «Воздушный дракон» и «Аист» (архивное фото)

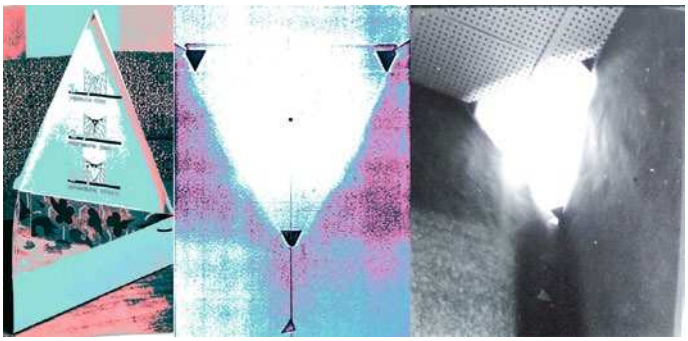


Рис. 10. Угловой светильник «Грань» и упаковочная коробка для него

Для декоративного украшения интерьера был разработан настенный светильник «Данко» (рис. 7). В нём заложена пластическая идея «Гранула света». Интрига дизайна достигнута использованием *3D*-технологий того времени (середина 1980-х годов). В светофильтре из оргстекла выфрезерованы пирамидальной формы призмы (под углом в 120°). Благодаря этой особенности рельефа светофильтр светильника создаёт многоцветный световой эффект (радужный цветной перелив).

Краткое описание конструкции прояснит эстетику напольного светильника («лампы») «Шахерезада» (рис. 8). Поэтично названное дизайнерами устройство вполне подходит для создания театрального пространственного эффекта в интерьере. Металлические детали его выполнены из медного сплава. Ведь, воссоздавая исторические мотивы в экзотическом образе мавританской стилистики, уместен красный оттенок [7]. В центре основания расположена лампочка, излучающая «волшебный свет». В тарелке основания укреплён стержень, его длина около 1,5 м, и он имеет плавный лекальной формы изгиб. Пружинные свойства несущего стержня позволяют растягивать шёлковый шатёр и тем самым создавать гармоничную световую форму. Купол светильника фиксируется конической втулкой и завязывается на кромке основания шнурком со стильной кисточкой. Для него использован белый шёлк, лёгкий и роскошный. Создаётся мягкая светотеневая игра без бликов. Высвечивается изысканное действо света, символизируя богатую культурную традицию Востока.

Рис. 11. Напольный светильник «*UFO*»

Оригинально композиционное решение модели светильника «Воздушный дракон» (рис. 9). Свисающий «хвост Дракона» состоит из гирлянды лампочек. Можно раскладывать его произвольно и как лианой обвивать пространство. В качестве мини источников света применены ГЛН, размещённые в цилиндрических трубках.

Светоизлучающая панель светильника «Грань» (рис. 10) выполнена на основе треугольной стеклянной пластины лунного цвета и крепится на трёх пружинных защёлках. Достоинства конструкции – простота и возможность освещения труднодоступных углов интерьера.

Конструкция напольного светильника «*UFO*» (рис. 11) состоит из белого конуса с отверстиями-иллюминаторами. Композиционным завершением светильника служит плавно изогнутый стержень с дюралевым конусом наверху, отполированным до зеркального блеска. Соль проекта – создание артефакта как некоего светового фантома в жилой среде.

Необычный, на первый взгляд, напольный светильник «Эол» (рис. 12) устроен следующим образом. На массивном устойчивом чёрном диске основания светильника укреплены ручка и крюк с затейливым изгибом. На стойке размещена большая параболическая серебряная полусфера. В точке её фокуса установлена лампа накаливания. Она подсвечивает витражные стеклянные треугольники. На дисковый экран проецируются «волшебные видения» и приходят оптические иллюзии! Цветное марево света, ощущение романтики, тонкие реминисценции – идея светильника. Но это не все его особенности. На стальной проволоке перед отражателем подвешен диск и прикреплены изящные часовые стрелки. По задумке авторов, повинуясь зефиру, стрелки свободно, как в динамичной авангардной композиции, вибрируют.

Эту модель светильника можно уподобить кинетическим скульптурам, так называемым мобилям. Прослеживаются аналогии с произведениями модного американского скульптора 1960-х годов Александра Кальдера. Стирается грань между промышленным дизайном и другими видами искусства, отечественной школой дизайна и западными образцами культуры.

Примечателен внешний вид светильника «Нимб» (рис. 13). Он выполнен в стилистике минимализма. Ко-

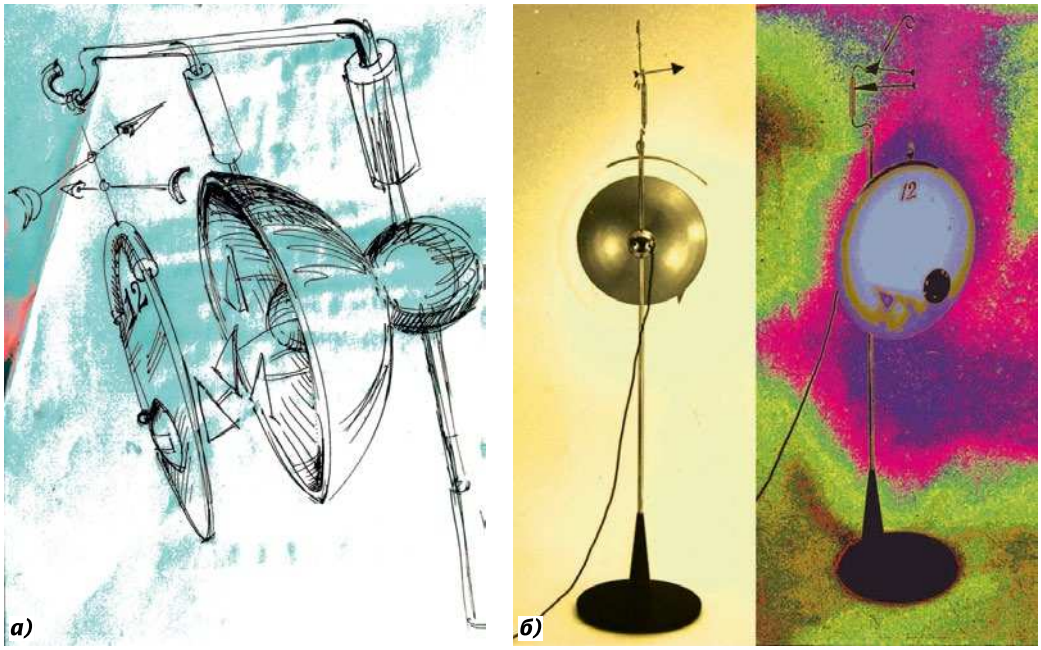


Рис. 12. Эскизы конструкции (*а*) и виды (*б*) напольного светильника «Эол»

нус в центре матового диска – ключевой акцент композиции. Источник света – кольцевая люминесцентная лампа. (Кстати, тогда редко использовавшаяся в быту.) Авторы полагали, что этот световой объект органично впишется в интерьеры хай-тека, популярного в те годы.

Для профессиональной полноты проекта все модели светильников комплектовались специально разработанной промграфикой и упаковкой (рис. 10).

В данном коротком очерке отражено стремление дизайнеров нетрадиционным способом создавать новые формы, а не подгонять внешний вид изделий к распространённым стереотипам и стилям. Методику проектного поиска можно заслуженно отнести к экспериментальному дизайну. Думается, и сегодня разработки данных светильников могут представлять не только исторический, но и практический интерес. Их можно легко модернизировать (оснащать современными источниками света – КЛЛ и светодиодами).

При этом модели этих светильников успешно экспонировались на выставках в ЦДХ СССР, на ВДНХ СССР и в Центре технической эстетики ВНИИТЭ (на Пушкинской площади), вызывали повышенный интерес посетителей, но в серию не пошли.

Рис. 13. Натурная модель потолочного светильника «Нимб»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промдизайн. Каталог работ дизайнера Усовой С.А. и студентов ГПИ МЭИ. – М.: Буки Веди, 2017. – С. 16–19.

2. Проектирование и промдизайн светильников. URL: https://klona.ru/blog/promyshlennyy-dizayn/proektirovanie-i-promdizain-svetilnikov (дата обращения: 15.07.2020).

3. *Виноградов В.В.* Экспериментальный дизайн ВНИИТЭ: от идеи формы к конструкции и материалу / Строгановские чтения 2018: Материалы Межд. научн. конф. «Материал-технология-форма как универсальная триада в дизайне, архитектуре, изобразительном и декоративном искусстве» [составители: А.Н. Лаврентьев и др.]. – М.: МГХПА им. С.Г. Строганова, 2018. – С. 312–317.

4. *Виноградов В.В.* Световой объект как тема формообразования в дизайне XX века: эксперименты и образы / Материалы Межд. научн.-проектн. конф. «Искусство света: дизайн, архитектура, художественное и проектное творчество» [составители: А.Н. Лаврентьев, и др.]. – М.: МГХПА им. С.Г. Строганова, 2019. – С. 199–204.

5. *Ефимов А.В., Колейчук В.Ф.* Эксперимент в дизайне. – М.: ВНИИТЭ, 1987. – 67 с.

6. *Виноградов В.В.* Проектирование предметов быта и альтернативные проекты в Советском дизайне 1980-х годов / Материалы Международной научн. конф., посвящённой 150-летию Музея декоративно-прикладного и промышленного музея искусства при МГХПА им. С.Г. Строганова – «*Museum-Stroganov*-2018. Музеи декоративного искусства, художественной промышленности и дизайна: вчера, сегодня, завтра». – М.: МГХПА им. С.Г. Строганова, 2018.

7. *Lavrentiev A.N., Nazarov Yu.V.* Russian Design: Traditions and Experiment 1920–1990: Academy Editions, ISBN10: 1854904264 / ISBN13: 9781854904263; Academy group, 43 Leinster London W2 3AN, Berlin, 1995.

Виноградов Владимир Васильевич, *художник-дизайнер. Доцент кафедры автоматизированного проектирования и дизайна НИТУ «МИСиС». Ведёт курс «Основы теории дизайна». Рассматривает проектные методы художественного конструирования как информационно-коммуникативную структуру, включающую культурные архетипы и новейшие массовые технологии. Член Союза дизайнеров России*

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

Обзор особенностей использования мини-спектрорадиометров с ПЗС-матрицами в прикладной фотометрии

Р.И. СТОЛЯРЕВСКАЯ

Редакция журнала «Светотехника», Москва
ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва
E-mail: stoly@l-e-journal.com

Аннотация

Статья посвящена особенностям решения задач прикладной фотометрии на основе спектрорадиометрического подхода с использованием современных матричных спектрометров. Спектральное распределение характеристик источника излучения является объективной физической базой определения его световых и цветовых параметров. При этом фотометрические характеристики осветительных приборов и систем освещения рассчитываются на основе регламентированных МКО табулированных спектральных световых эффективностей и ординат кривых сложения цветов. Основная причина смещения акцента в сторону спектральных измерений обусловлена революционным внедрением в системы внутреннего и наружного освещения и светосигнализации светодиодных источников света, имеющих спектры излучения, отличные от спектров традиционных естественных и искусственных источников света. Интегральные методы измерения световых и цветовых характеристик полупроводниковых источников света требуют высочайшего качества коррекции фотометрических каналов (головок) под спектральные эффективности и кривые сложения цветов или учёта поправочного коэффициента коррекции, что, в свою очередь, невозможно без измерения относительных спектральных характеристик излучателей и приёмников излучения.

В статье приведён краткий обзор требований к ПЗС-матричным спектрометрам для их использования в спектрорадиометрических измерениях.

Ключевые слова: спектрорадиометрия, фотометрия, колориметрия, чёрные тела, сферический интегратор, гониоспектрорадиометр, спектральная плотность энергетической освещённости (СПЭО), спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), спектральная плотность потока излучения (СППИ), координаты цвета и цветности, входная оптика, разрешение, полоса пропускания, рассеянный свет, матрица коррекции рассеянного света.

1. Введение

Прикладные задачи фотометрии человечеством решались издревле. Основными инструментами сравнения источников света (ИС) были глаз и затем зрительный фотометр и методика уравнивания яркости в плоскости экрана на основе закона обратных квадратов. В первой половине прошлого века прочные позиции занял селеновый фотоэлемент и люксметр на его основе [1]. К началу 1970-х и, практически, до конца 2010-х лидирующие позиции в световых и цветовых измерениях занимал детекторный подход на основе кремниевых фотодиодов и высококачественных корригирующих светофильтров [2]. Начало 21 века ознаменовалось бурным внедрением светодиодов (СД) во все виды освещения и сигнализации, и, как следствие этого переворота в светотехнике, спектральные методики измерений начали вытеснять интегральные на основе корригированных фотометров, колориметров и яркомеров с кремниевыми фотодиодами в качестве приёмников излучения (ПИ). Основная причина этого процесса – недостаточное качество коррекции под относительную спектральную световую эффективность и ординаты кривых сложения для измерения световых и цветовых характеристик ИС со спектральным составом, существенно иным, чем у стандартного источника типа *A* (базового источника для калибровки всех видов фотометрических головок), и введение требований по использованию различных (а не только для дневного зрения) функций спектральной световой эффективности [3–8]. При этом основанием выбора метода в каждом отдельном случае является оценка погрешности (неопределённости) измерения с учётом используемого оборудования, эталонов и способов калибровки измерительной системы, индивидуальных особенностей измеряемого объекта [9–11].

Анализируя погрешности, заявленные в ходе международных ключевых сличений МКМВ эталонов национальных лабораторий в области детекторной фотометрии, а также спектрорадиометрии [12, 13], можно заключить, что для измерения серых ИС сплошного спектра использование интегральных фотометров весьма успешно (неопределённость может достигать десятых долей процента) и выигрывает по сравнению со спектральным подходом, погрешности которого могут достигать нескольких процентов. Об этом свидетельствуют результаты ключевых международных сличений по спектральной плотности энергетической освещённости (СПЭО) «*CCPR –K1*, *a*» и сличений в области световых измерений с применением фотометрических головок [12,13].

В то же время табулированные МКО функции [14] при спектрорадиометрическом подходе имеют нулевой вклад в методические погрешности (неопределённости) измерений световых или цветовых параметров и расчётов значений зрительных (например, синяя опасная яркость) [15,16] и незрительных (*ipRGC* реакции на свет*)* [17, 18] воздействий излучения.

Развитие и широкое внедрение спектрорадиометрического подхода в рутинную фотометрию обязано следующим факторам:

– мощному развитию эталонной базы в области спектрорадиометрии, особенно отечественной, на основе высокотемпературных моделей чёрных тел и методов определения их термодинамической температуры [19];

– разработке и созданию производства миниатюрных спектрометров на основе современной элементной базы оптики, механики и электроники [20–23];

– созданию новых источников излучения (ИИ) с характеристиками, позволяющими их использование в качестве эталонов спектральных характеристик силы излучения, потока излучения, облучённости, энергетической яркости [24, 25].

Проектируя и создавая ту или иную измерительную систему, нужно очень чётко представлять себе все её узлы, детали и приборы и требования к ним, их калибровке и составляющим погрешности/неопределённости.

2. Общие требования к мини-спектрометрам [26]

Рассматриваемые ниже методические основы спектрорадиометрического подхода в задачах прикладной фотометрии подразумевают, в первую очередь, количественный контроль качества выпускаемых или проектируемых световых приборов и ИИ. Это означает наличие временн***о***го фактора выполнения измерительной задачи, которая сегодня успешно решается применением мини-спектрометров с ПЗС-матрицами. Именно этот класс спектрометров и требования к ним будут рассмотрены в данном обзоре на примере наиболее массово зарекомендовавших себя промышленно выпускаемых спектрорадиометрических систем.

Мини-спектрометр с ПЗС-матрицей на выходе представляет собой средство измерения в области спектрорадиометрии для количественного определения на основании измеренного спектрального распределения энергетических, фотонных и световых величин и является универсальным инструментом в области оптической радиометрии.

Применение матричных мини-спектрометров для измерения радиометрических величин в узком спектральном диапазоне длин волн имеет целый ряд требований к их оснащению. В общих чертах в комплект таких спектрометров входят:

– входная оптика, необходимая для проецирования на входную щель дисперсионной системы яркости, освещённости, силы излучения или потока излучения (в соответствии с измеряемой величиной);

– дисперсионный элемент для разделения спектральных составляющих;

– фокусирующая оптика для фокусировки спектральной составляющей излучения в плоскости матрицы детекторов;

– матрица детекторов, размещённая в плоскости фокусирующей оптики;

– документ о прослеживаемой спектрорадиометрической калибров-

Таблица 1

Количественные индексы оценки МКО качества мини-спектрометров с ПЗС-матрицами

Индекс	Описание индекса
$f_2(\lambda)$	индекс спектрально-направленной характеристики для измерения в режиме освещённости
$f_{2g}(\lambda)$	индекс спектрально-направленной характеристики для измерения в режиме яркости
$f_{2S}(\lambda)$	индекс спектральной симметрии
$f_{2u}(\lambda)$	индекс влияния окружающего поля на спектральную чувствительность
$f_{3.1}(\lambda)$	индекс линейности спектральной чувствительности (фиксированное время интегрирования)
$f_{3.2}(\lambda)$	индекс линейности спектральной чувствительности (фиксированный вход излучения)
$f_{6.T}(\lambda)$	индекс температурной зависимости спектральной чувствительности
$f_8(\varepsilon, \varphi, \lambda)$	спектральный индекс чувствительности к поляризации излучения
$f_9(\lambda)$	спектральный индекс пространственной чувствительности
$f_{12}(\lambda)$	спектральный индекс расстояния фокусировки
$f_{31}(\lambda)$	индекс уширения спектра
$f_{32}(\lambda)$	индекс рассеянного света

Таблица 2

Основные параметры мини-спектрометров с ПЗС-матрицами

№ п/п	Параметр	Назначение параметра
1	Входная оптика	Определяет моду измерения: яркость, освещённость, поток излучения
2	Разрешение	Определяет интервал выборки, оптическое разрешение, полосу пропускания, индекс уширения спектра
3	Рассеянный свет	Один из основных факторов, требующий коррекции в приборе и определяющий одну из наибольших составляющих погрешности измерений
4	Линейность	Параметр, который необходимо знать для фиксированного времени интегрирования при изменяющемся сигнале и для фиксированной интенсивности сигнала при переменном времени интегрирования при оценке результата измерения (погрешности/неопределённости)
5	Калибровка спектрометра	Выбор эталонных источников излучения в зависимости от моды применения (использования) эталона с учётом входной оптики
6	Программный продукт	Программное обеспечение должно учитывать коррекцию рассеянного света, возможность калибровки в заданной моде по соответствующему эталонному источнику излучения, расчёт требуемых параметров по результатам абсолютных или относительных измерений спектра тестируемого светового прибора

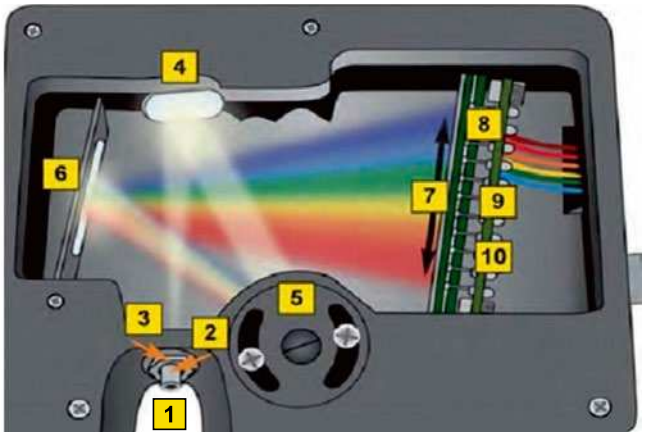


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра *USB4000* фирмы *Ocean Optics*: 1 – разъём волоконно-оптического кабеля, обеспечивающий позиционирование оптического волокна на входной щели спектрометра; 2 – входная щель; 3 – поглощающий светофильтр для устранения рассеянного света и высших порядков решётки на входе; 4 – зеркальный коллиматор; 5 – дифракционная решётка; 6 – фокусирующее зеркало; 7 – собирающие линзы; 8 – ПЗС-матрица; 9 – переменный светофильтр, отрезающий высшие порядки на выходе; 10 – окно на выходе [22]

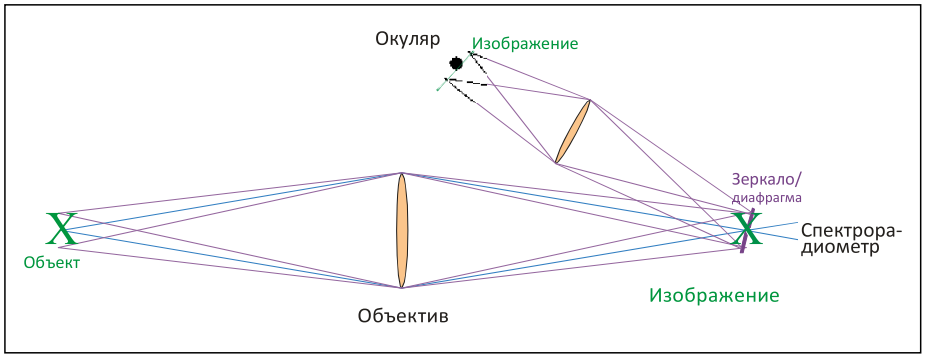


Рис. 2. Схема входной оптики для передачи прямого изображения [24]

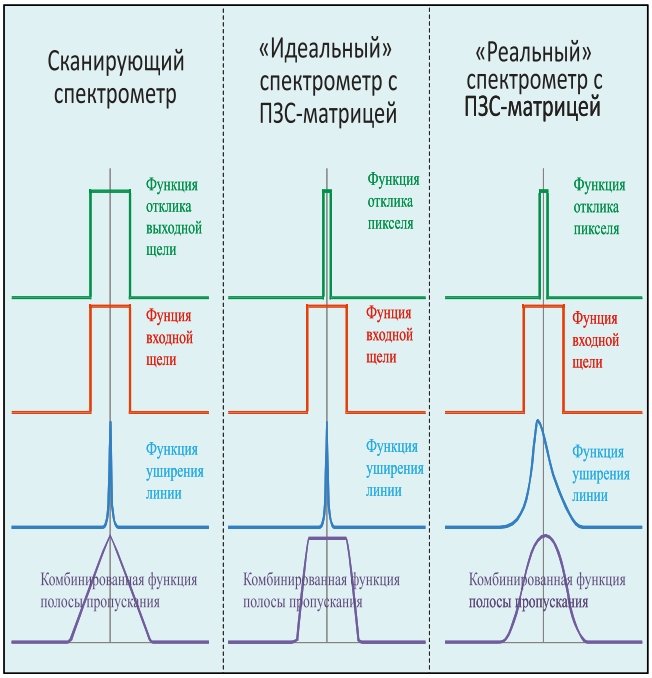


Рис. 3. Влияние на функцию полосы пропускания компонент спектрометров: сканирующего (левый), идеального матричного (средний), реального матричного (правый) [24]

ке (в соответствии с измеряемой спектральной величиной);

– программный продукт, обеспечивающий возможность внесения и запоминания калибровочного спектра, сравнения с ним результатов измерения тестируемого ИИ, расчёт абсолютных значений спектрального распределения заданной величины для тестируемого ИИ, расчёт значений радиометрических, фотонных и фотометрических величин, а также параметров фотобиологической опасности зрительного восприятия и реакций незрительного воздействия и фотосинтетической активной радиации на основании измеренного абсолютного спектрального распределения заданной спектрорадиометрической величины. Существует большое количество мини-спектрометров более или менее точных. Публикация МКО [26] предлагает оценивать их (по примеру фотометров [8]) индексами (табл. 1).

Все показатели (индексы) качества предназначены для ранжирования приборов в зависимости от их исполнения. Индексы не могут использоваться для внесения коррекции, т.е. исправления ошибок, и описывать все приложения и применения спектрометра.

В табл. 2 приведены параметры ПЗС-матричных мини-спектрометров, от которых напрямую зависят результаты их применений

Матричные мини-спектрометры имеют фиксированный (не перемещаемый) дисперсионный элемент, в качестве которого, как правило, используется дифракционная решётка (рис. 1).

2.1. Входная оптика

Измеряемый параметр и схема соответствующей ему измерительной установки определяют входную оптику как аксессуар спектрорадиометра в прикладной задаче.

Калибровка спектрометра и прилагаемый программный продукт должны соответствовать данному аксессуару. В качестве изолированной от внешней среды связи между входной щелью спектрометра и входной оптикой используется волоконный оптический элемент. Обычно это жгуты из оптического волокна малого диаметра, хотя для специальных применений используют и одинарные волоконные световые вводы. Например, одномодовое волокно используется с системами передачи изображения (оптическая система для измерения спектральной плотности энергетической яркости

(СПЭЯ)) на вход спектрометра, что обеспечивает более точное воспроизведение яркостной картинки на входной щели и более высокую пропускную способность входного канала.

С оптическими системами, образующими равномерное распределение освещённости на входной щели спетрорадиометра (измерения в режиме спектральной плотности энергетической освещённости (СПЭО) и спектральной плотности силы излучения (СПСИ), обычно используется мультимодовый волоконный кабель. При этом важно, чтобы пропускание кабеля и параметры входной оптики оставались неизменными минимум в период между калибровкой прибора и его эксплуатацией. Воспроизводимость результатов спектрометрических измерений существенно зависит от качества оптического волокна и конструкции входной оптики.

Для работы в режиме передачи изображения (яркости) на входную щель рекомендуется применять волоконно-оптический жгут большого диаметра, практически это волоконный световод, вход которого оснащён линзовой и/или зеркальной телескопической системой (микроскопом). Три основные схемы такого входа могут быть выполнены по принципам отражённого изображения, прямого изображения и обратной проекции. Схема прямого изображения позволяет переносить изображение объекта на зеркало телескопической системы, которое имеет апертуру для ввода излучения в спектрометр. Эта схема наименее критична и наиболее эффективна, позволяя выполнять прецизионную юстировку изображения объекта на вход спектрометра (рис. 2).

Для работы в режиме измерения освещённости на входе оптоволоконного тракта устанавливается оптика, обеспечивающая равномерное распределение освещённости на входной щели спектрорадиометра. В качестве такой оптики применимы сферы небольшого диаметра или диффузные насадки с характеристиками почти как у рассеивателя Ламберта, т.е. косинусные насадки. Мода измерения спектра по энергетической освещённости, т.е. в режиме СПЭО, позволяет определять и СПСИ, если известно расстояние от ИИ до входной апертуры оптики волоконного тракта и выполняется условие точечности ИИ (закон обратных квадратов):

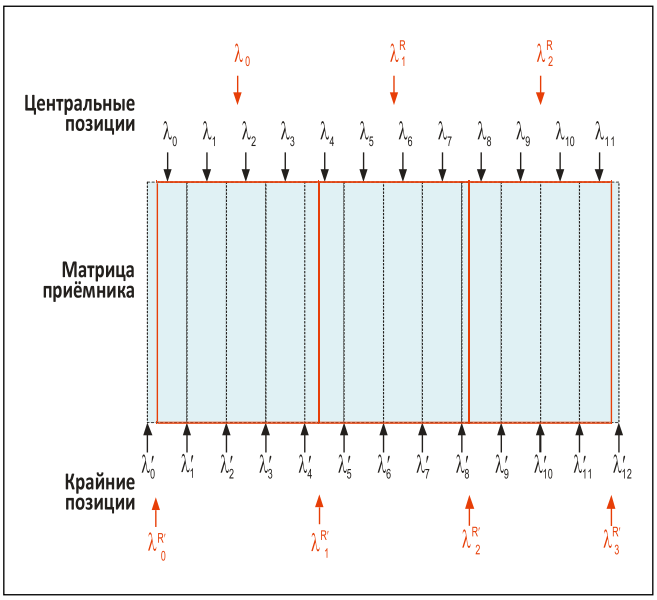


Рис. 4. Схема матрицы детектора, наглядно демонстрирующая повторную выборку длин волн [26]

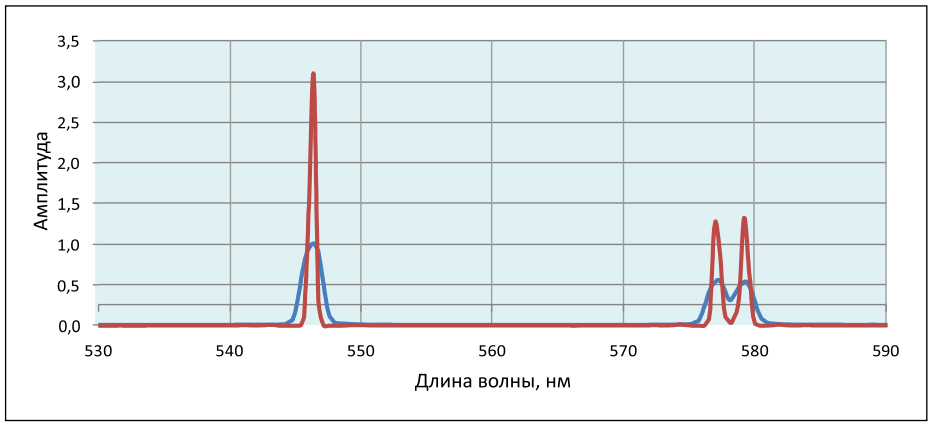


Рис. 5. Пример деконволюции по методу *Richardson–Lucy* для некоторых линий в спектре ртути (синим: измеренный спектр; красным: результат деконволюции) [26]

$$I(\lambda) = E_0(\lambda)d^2,$$

где $I(\lambda)$ – СПСИ, $E_0(\lambda)$ – усреднённая СПЭО на входной диафрагме диффузного рассеивателя, d – расстояние между ИИ и входной диафрагмой оптико-волоконного тракта. Кроме того, такой спектрорадиометр с калибровкой по СПЭО может использоваться в качестве приёмного тракта гониометрической установки, имеющей плечо, соизмеримое с d калибровки. Это позволит определять спектральную плотность потока излучения (СППИ) на основе углового распределения $E(\varphi, \theta, \lambda)$ для тестируемого ИИ., а также соответствующие интегральные поток излучения и световой поток и усреднённые координаты цветности светового прибора. Сочетание матричного мини-спектрометра, калиброванного в моде СПЭО, с гониометрической установкой большого радиуса плеча позволяет решать наибольшее количество задач определения параметров светового прибора [27]. Применение аналогичного спектрорадиометра с входной диффузной насадкой в составе сферического интегратора требует калибровки всей установки по эталонному излучателю СППИ. Такой измерительный стенд позволит определять СППИ тестируемого светового прибора, усреднённые координаты цветности и полный световой поток.

2.2. Разрешение

Рассматривая спектральное разрешение матричного спектрорадиометра, следует понимать, что мы имеем дело со многими составляющими, которые определяют этот параметр в понимании расстояния между двумя пиками спектральных полос, регистрируемого на выходе прибора. В первую очередь эта функция свя-

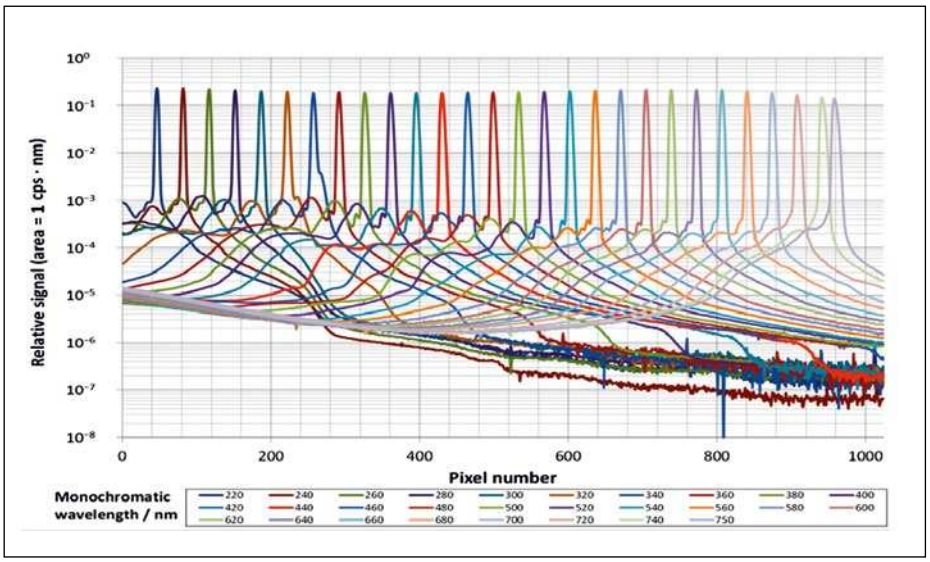


Рис. 6. Пример результата измерений функций уширения линий (СФУЛ) для спектрометра с ПЗС-матрицей [26]. (СФУЛ приведены (нормализованы) к соответствующей им суммарной площади.)
По оси ординат – Относительный сигнал (площадь = 1 отсчёт·нм);
Pixel number – Номер пикселя; Monochromatic wavelength / nm – Монохроматическая длина волны, нм

зана с разрешающей способностью дифракционной решётки и её характеристиками, а также с входной щелью спектрального прибора, количеством пикселей в детекторе и другими не менее важными характеристиками оптической системы прибора. Одна из них – аппаратная функция или **спектральная функция уширения линии (СФУЛ)**, минимизация которой – приоритетная задача при создании прибора. При этом результирующий сигнал измерения представляет собой свёртку (конволюцию) истинного спектра со СФУЛ [20, 26]. Функция **полосы пропускания** – свойство спектрометрической системы, которое описывает относительную чувствительность прибора в зависимости от длины волны при заданном условии входа и выхода излучения (рис. 3).

В матричном спектрометре функция полосы пропускания специфична для конкретных входной щели, решётки, строения детекторов в ПЗС-матрице, положения пикселей в матрице детектора. Для квадратной и трапециевидной функций пропускания ширина полосы соответствует полной ширине на половине максимума сигнала. Входная щель также может вносить вклад в СФУЛ, но у матричного спектрометра нет входной щели, изображение спектра передаётся прямо на матрицу, пиксель которой представляет собой одну из множественных входных щелей. Приборы часто могут предоставлять данные с фиксированными или переменными интервалами длин волн. В отличие от сканирующих спектрорадиометров с одним детектором, матричные спектрорадиометры требуют особого подхода к установке шкалы длин волн и выполнения повторной выборки в геометрии соответствия шкалы длин волн геометрии пикселей в матрице (рис. 4).

Поскольку матричный детектор находится в плоскости дисперсии спектрометра, каждый пиксель соответствует позиции в шкале длин волн. Разница в длине волны между одним пикселем и следующим есть разрешение в пикселях. Это не то же самое, что оптическое разрешение, которое обычно больше. В спецификациях некоторых производителей не указано, какое «разрешение» приведено, поэтому при сравнении приборов следует соблюдать осторожность.

Пиксели обычно имеют фиксированную физическую ширину. Переменная дисперсия длины волны по пикселям даёт переменное разрешение пикселей и интервалы дискретизации, которые присущи массивным спектрорадиометрам. Однако данные могут быть подвергнуты повторной выборке для эффективного получения эффекта переменной физической ширины и интервала выборки с постоянной длиной волны. По сути, метод суммирует полную интенсивность пикселей плюс пропорциональные вклады частичных пикселей и назначает их пикселями с повторной выборкой, как показано на рис. 4. Например, в некоторых системах это обычно делается для получения точек измерения с равными интервалами длин волн.

При калибровке по длинам волн, длина волны привязывается к пикселю. В реалиях пиксель «видит» некоторый интервал длин волн с различным весом, и общий отклик пикселя, являющийся ФПП – функцией полосы пропускания, проявляется для соответствующей монохроматической линии в некотором диапазоне длин волн, т.е. распространяется на несколько соседних пикселей. Эта функция уширения линии связана с характеристиками дисперсионной системы и аберрациями используемой оптики.

Методам измерения функции полосы пропускания и коррекции спектров, измеренных матричными спектрометрами, посвящено большое количество работ и фундаментальных технических отчётов [20, 26, 27], содержащих списки литературы по данному вопросу. Коррекция влияния полосы пропускания особенно важна при измерениях спектров с крутыми спадами, например спектров излучения СД. Цель коррекции – получение спектра, наиболее близкого к спектру, как-бы измеренному идеальным прибором с очень узким спектральным разрешением. На практике полная деконволюция вряд ли возможна, но в большинстве задач определённая степень снижения уширения полосы пропускания вполне достаточна. Процесс детализации спектрального распределения особенно важен при калибровке спектрорадиометра по шкале длин волн. Он требует, чтобы спектр был измерен минимум в двух точках на ширине полосы. Отклик измерительного прибора на монохроматический ИИ практически является СФУЛ, связанной с оптикой прибора, его полосой пропускания, параметрами детектора (чувствительность и интервал выборки по длинам волн). Отклик прибора на серию монохроматических линий излучения содержит серию СФУЛ с меняющимися интенсивностью и положением и зависящую от выборки по длинам волн [28]. На рис. 5 представлен результат деконволюции части линий в спектре ртути по итерационному методу *Richardson-Lucy* [28].

2.3. Рассеянный свет

Рассеянный свет в матричных спектрометрах – источник серьёзных ошибок измерений, и его оценки и коррекция на стадии разработки прибора и в процессе эксплуатации – необходимое условие получения адекватных результатов измерений. Вопросу рассеянного света посвящено множество работ по оценке и коррекции, разработке методик его устранения и методам количественной оценки.

Наличие рассеянного света означает, что определённые элементы ПЗС-детектора «загрязнены» излучением вне действующего спектрального диапазона прибора. Причины появления этого загрязнения весьма разнообразны, например:

– заводские погрешности в штрихах и шероховатостях дифракционной решётки;

– более высокие порядки дифракции для, например, кремниевых детекторов, имеющих широкую спектральную чувствительность;

– двойная дифракция решётками отражённого света;

– переотражение между детектором и другими оптическими элементами;

– отражение и рассеяние от внутренних поверхностей прибора;

– вход и выход излучения в приборе.

Можно количественно оценивать рассеянный свет измерением спектра широкополосного ИИ с применением светофильтров, полностью отрезающих некоторые длины волн, сигнал на которых можно относить к отклику на рассеянный свет, или измерением в линии монохроматического ИИ (перестраиваемый лазер или двойной монохроматор со «сплошным» ИИ на входе), полагая при этом, что появление отклика на других длинах волн спектрометра является результатом воздействия рассеянного света.

Рассеянный свет может описываться СФУЛ (из-за отклика измерительного тракта на монохроматическое излучение) в спектральном и динамическом диапазонах прибора. То есть отклики будут включать в себя реакции на разные монохроматические ИИ, соответственно, с разным временем интегрирования сигнала. Результаты таких измерений приведены, для примера, на рис. 6.

Рассеянный свет может вызывать отклик в действующем диапазоне длин волн прибора – рассеянный свет ближнего поля (РСБП) – и вызывать реакцию на длинах волн, относительно удалённых от реального диапазона длин волн спектрорадиометра – рассеянный свет дальнего поля (РСДП). На рис. 6 вблизи основного пика видны острые пики, а за ними идут широкие. Такая структура спектров обусловлена переотражением и рассеянием излучения на оптических, электронных и механических элементах прибора.

Рассеянием на элементах прибора (дифракционной решётке, стенках, экранах и зеркалах), как правило, обусловлен именно РСДП. На рис. 6 РСДП соответствуют широкие плавные линии, образованные нижними пределами всех СФУЛ. Вклад РСДП значительно меньше вклада РСБП, но в сумме он может иметь существенное влияние в некоторых применениях, особенно в фотометрии и колориметрии.

Один из наиболее эффективных путей коррекции рассеянного света – экспериментально-расчётный метод определения матрицы коррекции рассеянного света в мини-спектрометре с ПЗС-матрицей. Эту матрицу коррекции можно получать измерением СФУЛ монохроматических ИИ (рис. 6). При этом важно, чтобы излучение монохроматического ИИ вне спектральной линии (полосы) было ничтожным по сравнению с рассеянным светом тестируемого прибора. Лазеры и монохроматические ИИ с применением двойных сканирующих монохроматоров отвечают этим требованиям, но необходимо учитывать поляризацию излучения таких ИИ. Они должны быть деполяризованы, если вход тестируемого спектрометра чувствителен к поляризации. Например, на входе оптоволоконного тракта стоит система передачи изображения. Каждая измеренная СФУЛ на определённой длине волны может использоваться для получения функции распределения рассеянного света на чувствительном двумерном элементе ПЗС-детектора с нормировкой всего суммарного сигнала к сигналу внутри монохромной полосы. Зная функции распределения рассеянного света для некоторых длин волн спектрального диапазона прибора и для каждого двумерного элемента матрицы ПИ, а также характеристику рассеянного света спектрометра, можно описывать двумерной матрицей функции распределения рассеянного света и выполнять с её помощью коррекцию результатов измерения спектра.

При измерении спектра широкополосного ИИ сигналы от рассеянного света на двумерном элементе матрицы приёмника можно выражать как

$$\boldsymbol{Y}_{\mathbf{SL}} = \boldsymbol{D} \times \boldsymbol{Y}_{\mathbf{in\ band}},$$

где $\boldsymbol{Y}_{\mathbf{SL}}$ – вектор столбца (для n элементов) суммарных сигналов на каждом элементе; $\boldsymbol{D}$ – матрица функции распределения рассеянного света; $\boldsymbol{Y}_{\mathbf{in\ band}}$ – вектор столбца полного сигнала от элементов, вносящих свой вклад только в пределах монохромной полосы спектрометра, т.е. это вектор столбца сигнала, скорректированного на сигнал от рассеянного света.

При этом вектор столбца измеренных необработанных сигналов $\boldsymbol{Y}_{\mathbf{meas}}$ выражается как

$$\boldsymbol{Y}_{\mathbf{meas}} = \boldsymbol{Y}_{\mathbf{in\ band}} + \boldsymbol{D} \times \boldsymbol{Y}_{\mathbf{in\ band}} = \\ = [\boldsymbol{I} + \boldsymbol{D}] \times \boldsymbol{Y}_{\mathbf{in\ band}},$$

где $\boldsymbol{I}$ – $n \times n$ единичная матрица; $[\boldsymbol{I} + \boldsymbol{D}]$ – матрица близких тождеств.

Соответственно,

$$\boldsymbol{Y}_{\mathbf{in\ band}} = [\boldsymbol{I} + \boldsymbol{D}]^{-1} \times \boldsymbol{Y}_{\mathbf{meas}} = \boldsymbol{C} \times \boldsymbol{Y}_{\mathbf{meas}},$$

где $\boldsymbol{C} = [\boldsymbol{I} + \boldsymbol{D}]^{-1}$ – матрица коррекции рассеянного света для $n \times n$ элементов матрицы ПИ [26].

3. Заключение

Приведён краткий обзор особенностей применения спектрорадиометрического подхода на основе мини-спектрометров с ПЗС-матрицами.

Спектрорадиометрический подход к определению фотометрических, колориметрических, фотонных и фотосинтетических величин – в определённой степени, основополагающий в решении прикладных задач прецизионного характера. Прогресс в развитии оптоэлектроники позволил спектральным методам измерений распространиться на рутинные тестирования в лабораториях при промышленном выпуске световых приборов разного назначения и испытательных центрах, где объёмы измерений существенно влияют на время их выполнения.

При включении мини-спектрорадиометров в измерительные стенды в основном учитываются:

– комплектация входной оптики волоконно-оптического тракта;

– наличие светофильтров, блокирующих более высокие порядки дифракции на изъянах дифракционной решётки;

– калибровка прибора по длинам волн и интенсивности (СПЭО, СПСИ, СППИ или СПЭЯ) с учётом коррекции рассеянного света во всём спектральном диапазоне прибора;

– тот факт, что использование мини-спектрометра в составе интегрирующей сферы требует новой калибровки установки в целом по эталонному источнику СППИ;

– линейность измерительного тракта в условиях неизменной интенсивности с переменным временем интегрирования;

– линейность измерительного тракта при постоянном времени интегрирования и переменной интенсивности входящего излучения.

Исследованиям вопросов применения современных быстродействующих спектральных приборов посвящены фундаментальные технические отчёты, подготовленные экспертами мирового уровня в рамках технических комитетов Отделения 2 МКО [20, 26, 27].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тиходеев П.М.* Световые измерения в светотехнике: (Фотометрия). – Изд. 2-е, перераб. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 464 с.

2. *Иванов В.С., Котюк А.Ф., Золотаревский Ю.М., Либерман А.А., Саприцкий В.И., Столяревская Р.И., Улановский М.В., Чупраков В.Ф.* Основы оптической радиометрии / Под ред. проф. А.Ф. Котюка. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 544 с.

3. CIE210: 2014 «Photometry Using $V(\lambda)$-corrected Detectors as Reference and Transfer Standards».

4. CIE018:2019 «The Basis of Physical Photometry», 3rd Ed. – Vienna: CIE.

5. CIE179: 2007 «Methods for Characterising Tristimulus Colorimeters for Measuring the Colour of Light».

6. ISO/CIE19476: 2014 «Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters».

7. CIE TN004: 2016 «The Use of Terms and Units in Photometry – Implementation of the CIE System for Mesopic Photometry».

8. CIE TN «Interim Recommendation for Practical Application of the CIE System for Mesopic Photometry in Outdoor Lighting». Enquiry Draft, 2017.

9. CIE198:2011 «Determination of Measurement Uncertainties in Photometry». – Vienna, Austria: CIE.

10. CIE198: 2011 «Determination of Measurement Uncertainties in Photometry – Supplement 1: Modules and Examples for the Determination of Measurement Uncertainties».

11. CIE198-Supplement 2: 2018 «Determination of Measurement Uncertainties in Photometry Supplements 2: Spectral Measurements and Derivative Quantities».

12. *Иванов В.С., Котюк А.Ф., Саприцкий В.И., Столяревская Р.И., Хлевной Б.Б.* Фотометрия и радиометрия оптического излучения. Книга 4, ч. 3: Эталоны световых и энергетических единиц в области фотометрии и радиометрии некогерентного оптического излучения, глава 17: Методы, средства и результаты международных сличений радиометрических и фотометрических эталонов и шкал. – М.: Полиграф Сервис, 2002. – 215 с.

13. *Goodman T., Servantes W., Wooliams E., Sperfeld P., Simionesku M., Blattner P., Kallberg S., Khlevnoy B., Decker P.* A Comparison of Spectral Irradiance 250 nm – 2500 nm EURAMET, PR-K1.a., 2009, Final Report (BIPM search: bipm.org).

14. CIE18: 2018 «Colorimetry», 4th Ed.

15. IEC62471: 2006/ CIE S009: 2002 «Photobiological Safety of Lamps and Lamps System».

16. *Bartsev A.A., Belyaev R.I., Stolyarevskaya R.I.* Methodology of LED Luminaire BLH Radiance Measurements // Light & Engineering. – 2013. – No.1. – P. 53–59.

17. CIE S026/E: 2018 «CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC–Influenced Responses to Light».

18. *Van Bommel W.* Topics Important for the up-to-date Interior Lighting Professional // Light & Engineering. – 2020. – Vol. 28, No. 1. – P. 4–22.

19. *Khlevnoy B., Grigoreva I., Anhalt K., Wähmer M., Ivashin E., Otryaskin D., Solodilov M., Sapritsky V.* Development of Large Area High Temperature Fixed-Point Blackbodies for Photometry and Radiometry // Metrologia. – 2018. – Vol. 55, No. 2. – P. 43–51.

20. CIE (2014) CIE214:2014 Effect of Intrumental Bandpass Function and Measurement Interval on Spectral Quantities. Vienna: CIE.

21. *Gardner J.L.* Spectral deconvolution applications in colorimetry // Color Res. Appl. – 2014. – Vol. 39, No. 5. – P. 430–435.

22. USB4000 Fiber Optic Spectrometer Installation and Operation Manual. URL: http://www.oceaninsight.com/support/documents-manuals/manuals-operating-instras/ (дата обращения: 05.04.2020).

23. Instrument Systems and Konika Minolta Group Products Catalog. URL: http://www.instrumentsystems.com/array spectrometers/ (дата обращения: 05.04.2020).

24. *Gerloff T., Lindemann M., Shirokov S., Taddeo M., Pendsa S., Sperling A.* Development of a New High-Power LED Transfer Standard // Light & Engineering. – 2013, No. 2. – P. 41–46.

25. *Ivashin E.A., Khlevnoy B.B., Shirokov S.S., Tishenko E.V.* Development of New Photometric Standards Based on High Power LEDs // Light & Engineering. – 2018. – Vol. 26, No.1. – P. 58–62.

26. CIE233:2019 «Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers».

27. CIE239:2020 «Goniospectroradiometry of Optical Radiation Sources».

28. *Cordero R.R., Seckmeyer G., Eichstädt S., Schmähling F., Wübbeler G., Anhalt K,, Bünger I., Krüger U., Elster C.* Comparison of the Richardson-Lucy method and a classical approach for spectroradiometer bandpass correction // Metrologia. – 2013. – Vol. 50. – P. 107–118. DOI: 10.1088/0026–1394/50/2/107.

Столяревская Раиса Иосифовна, *доктор техн. наук. Окончила в 1968 г. физический факультет Казанского государственного университета. В 1976–2002 гг. работала во ВНИИОФИ в лаборатории фотометрии. Зам. главного редактора и научный редактор английской версии журнала «Светотехника / Light & Engineering». Представитель Российского национального комитета МКО в Отделении 2 МКО (с 1999 г.)*

Коррекция освещённости многовременных *RGB*-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата

М.Ю. КАТАЕВ[1], М.М. ДАДОНОВА[2], Д.С. ЕФРЕМЕНКО

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники (ТУСУР), Томск
E-mail: kataev.m@sibmail.com[1], mashadad@mail.ru[2]

Аннотация

Статья посвящена изучению и оптимизации многовременных *RGB*-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Установленная на борту БПЛА цифровая камера позволяет получать данные с высоким временным и пространственным разрешением наземных объектов. В рассмотренном в статье случае объектом изучения были сельскохозяйственные поля, для которых на основе многочисленных изображений, покрывающих сельскохозяйственное поле, строились мозаики изображений (ортофотопланы). Время получения каждого ортофотоплана составляло минимум несколько часов, что приводило к изменению освещённости каждого изображения в отдельности. Ортофотопланы, полученные в разные отрезки времени года (в несколько месяцев), также отличны друг от друга по освещённости. Для сравнительного анализа разных участков поля (ортофотоплана), полученных в одном временном отрезке, или сравнения участков за разные промежутки времени требуется их выравнивание по освещённости. В настоящее время, большинство подходов выравнивания преимущественно опирается на цветовые (*RGB*-) методы, что не во всех случаях даёт эффективные решения, особенно при необходимости получения количественного результата. В статье предложен метод, учитывающий изменение освещённости во время получения каждого изображения. Рассматривается общая постановка задачи световой коррекции *RGB*-изображений в смысле оценки цветового вегетационного индекса *Greenness*. Приводятся результаты обработки реальных измерений.

Ключевые слова: *RGB*-изображение, радиометрическая коррекция, освещённость, отражение, пропускание, БПЛА, ортофотоплан.

Введение

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве платформ дистанционного зондирования в последние годы увеличивается линейно. Использование этих платформ связано с их масштабируемостью, гибкостью использования, разработанностью технологий управления полётом, визуализацией и возможностями получать изображения больших территорий, а также с их способностью летать в опасных условиях. Применение БПЛА возможно во многих областях, связанных с сельским, лесным, водным, автодорожным хозяйствами и др. Получаемые изображения с высоким пространственным (для *RGB*-изображений) и спектральным разрешением (для многоспектральных и гиперспектральных приборов) с помощью БПЛА, открывают совершенно новые возможности дистанционного зондирования в различных отраслях народного хозяйства [1].

В мировой практике для мониторинга состояния растений на СХ полях чаще всего используются многоспектральные спутниковые изображения[1] за разные промежутки времени. Тематическая обработка (например, вычисление вегетационных индексов [2]) этих изображений позволяет проводить мониторинг состояния растений на СХ полях. Анализ получаемых результатов о состоянии растений и почвы позволяет принимать точные решения по внесению заданных объёмов удобрений или гербицидов, участкам полива или мелиорационных работ, выполнению иных СХ мероприятий. Спутниковые изображения обладают высокой степенью охвата одним снимком больших площадей поверхности. Изображения получаются на разных длинах волн УФ, видимого и ИК диапазонов оптического спектра. Основные характеристики спутниковых изображений связаны с достаточно высоким пространственным разрешением (10–300 м) и высокой чувствительностью. Набор узких особо расположенных спектральных каналов позволяет проводить расчёт как нормализованного относительного индекса растительности *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), так и других индексов (*LAI*, *NDSI, SAVI* и др.). Изучение поведения *NDVI* во времени и пространстве позволяет оценивать состояние растительности на СХ полях. Важно и временное разрешение, которое характеризует частоту проведения съёмки над одной и той же географической точкой, которая меняется от нескольких часов, до нескольких дней в течение всего года. Однако у этого способа мониторинга есть значительный минус, связанный с отсутствием получения данных при наличии сплошной или разорванной облачности. Соответственно, важный плюс измерений с помощью БПЛА – их возможность летать ниже облаков, что увеличивает их эффективность при проведении мониторинга определённой территории за счёт устойчивости к атмосферным воздействиям (ветер до 10 м/с и слабые осадки) [3].

Для разных практических приложений дистанционного зондирования, например, в лесном, водном, автодорожном или СХ мониторинге важная задача – радиометрическая калибровка, поскольку тщательность анализа особенностей *RGB*-изображений позволяет извлекать исследуемую цветовую информацию пространственно более точно. Кроме коррекции шумовых характеристик измерительного датчика, радиометрическая калибровка должна позволять сводить к минимуму все неточности, связанные с измене-

[1] С помощью спутниковых приборов *LANDSAT* [https://landsat.gsfc.nasa.gov], *SENTINEL* [https://sentinel.esa.int], *MODIS* [https://modis.gsfc.nasa.gov], *VEGETATION* [www.spot-vegetation.com]) или др.

нием освещённости [4, 5]. При изучении пространственно-временных характеристик типов поверхности, расположенных на СХ поле (например, пшеницы), возникает необходимость получения множества изображений, которые перекрывают друг друга (степень перекрытия может достигать 50–70 %). Получение изображений (во время полёта БПЛА) проводится в разное время, при этом меняется угловое положение Солнца, возникают тени, связанные с облачным покрытием или расположенными объектами вдоль кромки поля (как правило это лесные насаждения).

Для устранения этих цветовых артефактов на изображении используют разнообразные методики. Одна из них связана с использованием эффекта двунаправленной функции распределения отражательной способности (*Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF*) [6]. Другая методика основана на анализе изменения отражения от поверхности земли (например, основываясь на ламбертовском законе отражения) [7]. Менее известный подход к коррекции изображений БПЛА состоит в использовании модели переноса излучения [8]. Есть и технический способ компенсирования проблемы, вызываемой меняющимися условиями освещения для каждого изображения, который связан с установкой датчика освещённости на земле или на борту БПЛА [9]. Можно также использовать и табличные функции интенсивности излучения Солнца при разных углах его склонения для разных оптических масс [10].

Цель настоящей работы – разработка подхода к коррекции БПЛА-изображений, получаемых для одной и той же территории в разное время.

Методика получения *RGB*-изображений с помощью БПЛА

Цифровая камера, расположенная на БПЛА, измеряет уровень отражённого солнечного излучения от поверхности. На рис. 1 показаны основные источники формирования БПЛА-изображения, связанные с прямым (E_1), переотражённым (E_2), рассеянным и отражённым (E_3) солнечным излучением. При этом солнечное излучение, падающее под углом φ, попадает на площадку (элемент рельефа), которая имеет высоту h, наклон под углом α и угол β относительно направления Север-Юг.

Цель оптических датчиков, работающих в спектральном диапазоне 0,3–3 мкм (к таким относится и цифровая камера) – регистрация солнечного излучения, отражённого от поверхности. Однако фиксируемые датчиком значения (*Digital Numbers, DN*) не соответствуют отражательной способности земной поверхности. Это связано с такими параметрами датчика, как алгоритмы обработки цвета, настройки камеры, виньетирование, чувствительность (зависимость от высоты полёта) и др. Это также связано с изменением таких факторов, как азимут и высота солнца, атмосферные условия (туман или наполнение атмосферы аэрозолями (например, дым пожаров)) и отражательная способность типов изучаемой поверхности.

По этой причине следует преобразовать *DN* в коэффициент отражения поверхности. Этот процесс известен как радиометрическая калибровка и выполняется на стадии предварительной обработки измеренных изображений. Измеряемая величина, фиксируемая цифровой камерой в каждом пикселе изображения, зависит от освещённости поверхности солнечным излучением, прошедшим толщу атмосферы:

$$E(\lambda,\varphi_{\text{sun}},\varphi_{\text{uav}},\theta_{\text{sun}},\theta_{\text{uav}}) = E_{\text{o}}(\lambda)\cdot\cos(\varphi_{\text{sun}})\cdot d^2\times \\ \times\rho(\lambda,\varphi_{\text{sun}},\varphi_{\text{uav}},\theta_{\text{sun}},\theta_{\text{uav}})\cdot Surf(h,\alpha,\beta)\times \\ \times T_{\text{sun}}(\lambda)\cdot T_{\text{uav}}(\lambda), \quad (1)$$

$$DN(\text{i}) = c_1 + c_2\cdot S(\text{i}),$$

$$S(\text{i}) = A\cdot\omega\cdot\tau\cdot\int(E(\lambda)\cdot A_{\text{i}}(\lambda)\text{d}\lambda)/\int A_{\text{i}}(\lambda)\text{d}\lambda,$$

где $S(\text{i})$ – измеренная величина отражённого солнечного излучения от поверхности в спектральных каналах (i = *R, G, B*); $E(\lambda) = E_1(\lambda)+E_2(\lambda)+E_3(\lambda)$ – освещённость территории на длине волны λ в видимом спектральном диапазоне за счёт эффектов отражения от поверхности и рассеяния в воздухе; $\rho(\lambda)$ – *BRDF* на длине волны λ; $A_{\text{i}}(\lambda)$ – аппаратная спектральная функция для каждого канала (i = *R, G, B*); A, ω, τ – площадь детектора, угол поля зрения, время экспозиции; φ_{sun}, φ_{uav}, θ_{sun}, θ_{uav} – зенитный угол освещения и наблюдения БПЛА, азимутальный угол положения Солнца и БПЛА; d^2 – функция расстояния между Солнцем и Землёй в течение года ($d^2 = 1+0{,}0033\cdot\cos(360\cdot day/365)$, здесь *day* – порядковый номер дня года); c_1 и c_2 – постоянные линейного преобразования сигнала; $Surf(h, \alpha, \beta)$ – функция, описывающая рельеф с высотой над уровнем моря h и углами α и β, которые представляют наклон площадки к земной поверхности и поворот её относительно направления Север-Юг; $T_{\text{sun}}(\lambda)$ и $T_{\text{uav}}(\lambda)$ – функции пропускания на оптической трассе Солнце-земная поверхность и поверхность-БПЛА. Выражение (1) приведено в предположении, что $E_2 = 0$ и $E_3 = 0$, хорошо выполняющемся при малой высоте полёта БПЛА (10–100 м).

Для каждой цифровой камеры функция $A_{\text{i}}(\lambda)$ уникальна и зависит от технических и оптических характеристик [11].

Калибровка изображений

В данной работе авторы стремились внедрить в процесс обработки изображений, получаемых с помощью БПЛА, данные о зависимости отражательной способности поверхности от её рельефа и положения Солнца. Предложенная методика не требует дополнительных измерений с помощью панелей отражения с известным коэффициентом отражения. Для решения задачи коррекции требуется лишь чётко знать географическое положение (широту и долготу) и время получения изображений, чтобы рассчитать угловое положение Солнца. Угол, под которым Солнце наблюдается из точки на земной поверхности, зависит от ежедневного вращения Земли, годового вращения и географической широты рассматриваемой поверхности.

Угол склонения δ есть угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора. Он изменяется от –23,45 °, в день зимнего солнцестояния, до + 23,45 °, в день летнего солнцестояния, в соответствии с формулой [12]

$$\delta = 23{,}45\cdot(\pi/180)\cdot\sin[2\pi\cdot(284+day)/365].$$

Ориентация области отражения относительно Солнца лучше всего описывается углом θ, который связан с широтой, днём года и временем как

$$\cos\theta = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\Omega, \qquad (2)$$

где $\Omega = (24/\pi) \cdot \arccos(-\mathrm{tg}\varphi \cdot \mathrm{tg}\delta)$.

Заметим, что в течение дня при наличии дымки, облачности или леса вокруг поля для каждого изображения СХ поля будет наблюдаться разное соотношение значений E_1, E_2 и E_3. Наиболее значима в полдень доля E_1, а доли E_2 и E_3 растут в утренние и вечерние часы при отсутствии тумана над поверхностью, что, как правило, к 10 ч местного времени выполняется с хорошей точностью. Учёт этого обстоятельства важен для коррекции изображений, получаемых с БПЛА, с целью точного определения состояния растительности.

Поверхности СХ полей отражают солнечный свет анизотропно (уровень отражённого излучения меняется в зависимости от угла наблюдения и геометрии освещения). Кроме того, на отражение существенно влияют такие факторы, как тип растительности (плотность расположения, лиственная плотность, лиственное содержание воды и азота, структура почвы (влажность и шероховатость)). Эта информация фиксируется в *RGB*-изображениях БПЛА и может использоваться в практике СХ работ. Извлечение из *RGB*-изображений информации об отражательной способности – сложный процесс, на который влияют условия освещения, рассеивающие процессы в атмосфере (дымка и облачность), прилегающие к полю объекты (лес или здания), а также топография поля. Кроме того, на поле могут образовываться участки затенения, в которых уровни E_1, E_2 и E_3 иные, чем в местах прямого освещения. Поэтому получение важной количественной информации по *RGB*-изображению предполагает проведение комплексных исследований по воздействию и значению этих факторов при различных условиях. Данная статья лишь частично снимает возникающие вопросы.

Радиометрическая калибровка особенно необходима при сравнении наборов данных, собранных в течение нескольких периодов времени, «между» датчиками или при разных условиях освещения в одной и той же области. Последнее особенно важно при работе с БПЛА, т.к. камера снимает несколько изображений, которые будут накладываться друг на друга для генерации ортофотоплана. Для формирования правильного ортофотоплана, необходимого для количественных оценок параметров растительности, требуется, чтобы все изображения отвечали схожим условиям измерений. Однако такое бывает редко, т.к. в каждом БПЛА-изображении проявляются следствие солнечного движения (изменение освещённости) и влияние сплошной и разорванной облачности на освещение исследуемой области (тёмные и светлые области). Результат этого – плохое сшивание перекрывающихся областей изображений, что приводит к получению неоднородного по освещённости ортофотоплана. Это, в свою очередь, приводит к снижению точности оценки отражательной способности и, следовательно, точности расчётов индексов растительности и последующих результатов идентификации типов растительности [13]. Эта проблема имеет тенденцию к росту с увеличением площади обследования.

Методы калибровки изображений делятся на абсолютные и относительные. Абсолютные методы связывают значения *DN* изображения с функцией отражения земной поверхности, используя соответствующие приборы во время измерений, установленные на поле. Относительные методы применяются, когда невозможно использовать дополнительные приборы, в основном работающие с известными функциями (например, моделями *BRDF*) и нормализацией изображений. Важно отметить, что во многих статьях не затрагивается процесс коррекции изображений и к тому же для изображений БПЛА систематический, выполнимый и удобный метод радиометрической калибровки пока не создан. В какой-то мере данная работа способствует уменьшению этой неопределённости.

Одним из эффектов, снижающих качество изображения, получаемого для количественного анализа, является эффект виньетирования, который связан с радиальным спадом яркости от основной точки изображения. Во многом величина этого эффекта зависит от высоты измерений БПЛА и угла поля зрения, пиксельного разрешения и чувствительности цифровой камеры. Другой эффект, требующий коррекции, связан с темновым током. Этот вопрос решается вычитанием из всех изображений кадра, полученного при закрытом объективе. Ещё влияет на изображение топографический эффект. Топография (рельеф поверхности) добавляет различия в условия освещения, так как освещённость локальной поверхности прямо пропорциональна косинусу угла падения на неё солнечного излучения (см. выражения (1) и (2)).

Определение характеристик растительности по *RGB*-изображению

Растительность важна для выживания человека и играет важную роль в глобальном углеродном цикле. Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет получать информацию о растительности в виде вегетационных индексов, используя специально расположенные в спектральной области каналы (красный и ближний ИК). Однако открытые для свободного доступа спутниковые изображения дистанционного зондирования имеют низкое пространственное разрешение (10–300 м) и проблемы со временем задержки, вызванные наличием сплошной или

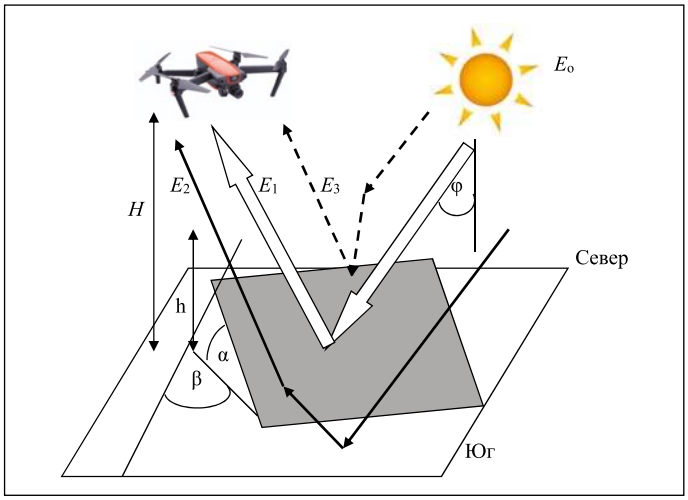


Рис. 1. Источники формирования БПЛА-изображения

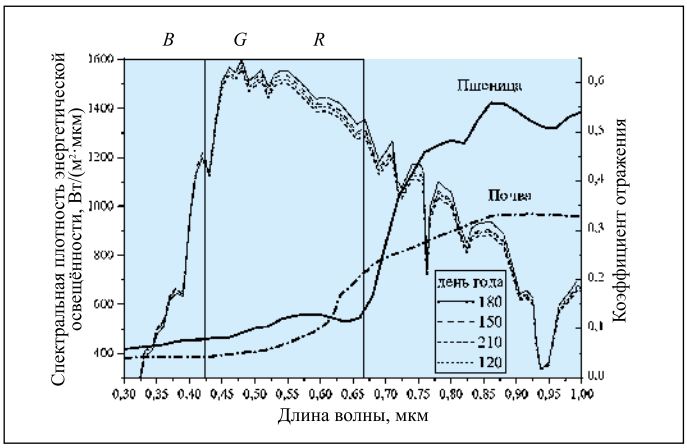


Рис. 2. Спектр солнечного излучения, достигающего земной поверхности и спектральные коэффициенты отражения разных типов поверхности

разорванной облачности. Это не позволяет получать точную информацию о растительности с небольших площадей СХ полей. Кроме того, из-за влияния сложных топографических особенностей поля возникают особенности интерпретации получаемых данных. Применение БПЛА в сельском хозяйстве связано с полётами на малой высоте (10–100 м). При обработке полученных в ходе полёта данных (изображений) многие исследователи не учитывают влияние атмосферных факторов на процесс получения изображения, тем самым внося погрешности в восстанавливаемые количественные показатели. При этом важно отметить, что сами изображения в виде визуальной (качественной) информации не несут значимых погрешностей.

Индексы растительности (*Vegetation indices, VI*) объединяют поверхностную отражательную способность в двух или более спектральных полосах для изучения разных характеристик растительности и возможности их взаимного сравнения. База данных индекса (проект https://www.indexdatabase.de/info/feedback/) содержит более 150 *VI*, но только некоторые из них применимы для *RGB*-изображений. Посредством *VI*, рассчитываемых на основе *RGB*-изображений, появляется возможность измерять уровни роста растений и их стресса от (обилия или отсутствия) воды и питательных веществ, урожайности и др. Как сказано выше, все эти показатели, их качество и достоверность существенно зависят от радиометрической коррекции. Вот несколько популярных *VI*:

$$Greenness1 \quad (ExGI) = (2 \cdot G - R - B), \tag{3.1}$$

$$Greenness2 \quad (NDGRI) = (G - R)/(G + R), \tag{3.2}$$

$$Greenness3 \quad (GI) = G/R, \tag{3.3}$$

$$Greenness4 \quad (MGRVI) = (G^2 - R^2)/(G^2 + R^2). \tag{3.4}$$

Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности СХ культур являются основой для точного земледелия в рамках цифрового сельского хозяйства. Состояние растительности может определяться «на глаз», на основе опыта наблюдений за растениями, или с помощью спектральных приборов, к которым относится и обычный фотоаппарат. Спектральные характеристики растений зависят от многих факторов, включая строение листьев (форма, площадь), содержание влаги и углекислого газа в воздухе и почве и др. Кроме того, эти характеристики (для стебля и листьев) зависят от типа растения, времени после посадки, атмосферных условий, рельефа, почвы и др. Соответственно, указанные выше факторы в сумме влияют на состояние растений и могут определяться по спектральным характеристикам отражения от растения солнечного излучения. Тщательное изучение состояния растений предполагает рассмотрение детальных спектров отражения для выявления малейших нюансов состояния растения, что, однако, не всегда возможно ввиду дороговизны подходящих приборов, сложности калибровки и обработки изображений. Один из других вариантов оценки состояния растений – использование аналога вегетационных индексов – коэффициента *Greenness* (зелёность). Для расчёта *Greenness* используется комбинация уровней отражения на двух длинах волн – 0,65 и 0,75 мкм – в области «ближнего ИК склона» (*red edge*) кривой спектра отражения растительности (рис. 2).

На рис. 2 показаны изменения, вызываемые солнечным излучением, попадающим на цифровую камеру после отражения от земной поверхности, представленной пшеницей и почвой. Для моделирования считаем, что параметры атмосферы постоянны и меняется только угол падения солнечного излучения на одну и ту же площадку[2].

[2] Здесь это делается специально для показа необходимости учёта изменения солнечного излучения, так как пренебрежение им влияет на точность определения аналога вегетационного индекса *(Greeness*).

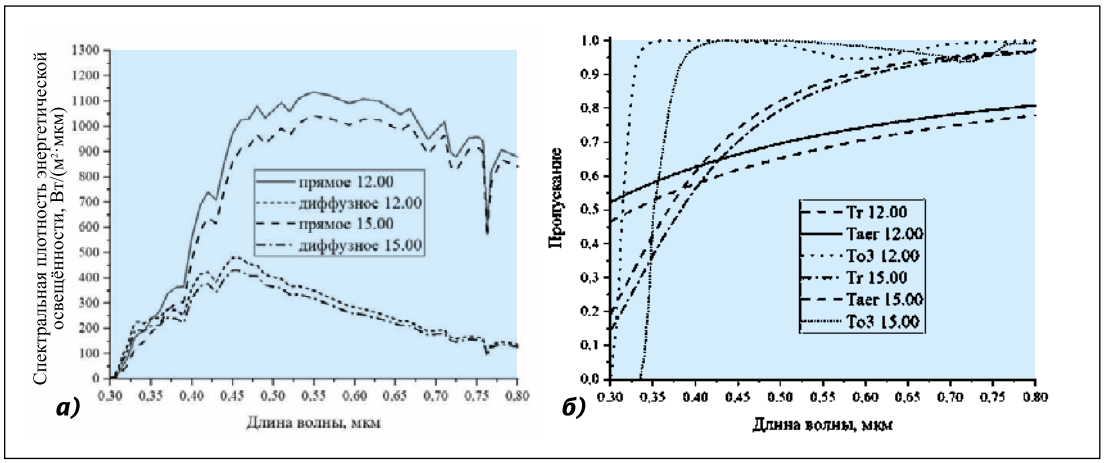


Рис. 3. Спектры солнечного излучения, достигающего земной поверхности для 120 дня и местного времени 12 и 15 ч, (*а*), и пропускания в эти моменты основных компонент атмосферы – Рэлея (T_r), аэрозольного (T_{aer}) и озона (To_3) (*б*). (Поясное время – согласно [https://scienceforum.ru/2014/article/2014002119]). Расчёты выполнены с помощью специальной программы [15]

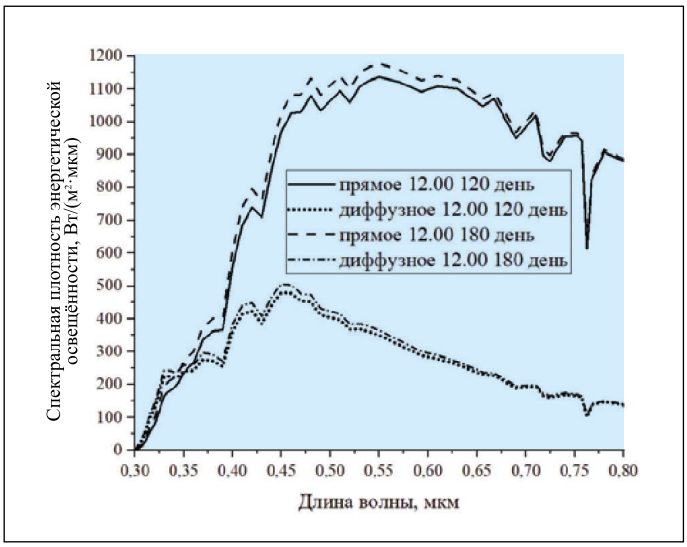


Рис. 4. Спектры солнечного излучения, достигающего земной поверхности для 120 и 180 дней и 12 ч местного времени

Из рис. 2 хорошо видно, что синий канал меняется слабо, а наиболее изменчивы – зелёный и красный каналы цифрового изображения.

Учитывая, что пропускание атмосферы на трассе между земной поверхностью и БПЛА незначительно, можно переписать уравнение (1) для излучения, попадающего на цифровую камеру при отражении от плоской поверхности (*Surf* = 1), в *RGB*-каналах в виде

$$E_{\mathrm{R}}(\varphi_{\mathrm{sun}}) = E_{\mathrm{oR}} \cdot \cos\varphi_{\mathrm{sun}} \cdot d^2 \cdot \rho_{\mathrm{R}} \cdot T_{\mathrm{R}}(\varphi_{\mathrm{sun}}), \qquad (4.1)$$

$$E_{\mathrm{G}}(\varphi_{\mathrm{sun}}) = E_{\mathrm{oG}} \cdot \cos\varphi_{\mathrm{sun}} \cdot d^2 \cdot \rho_{\mathrm{G}} \cdot T_{\mathrm{G}}(\varphi_{\mathrm{sun}}), \qquad (4.2)$$

$$E_{\mathrm{G}}(\varphi_{\mathrm{sun}}) = E_{\mathrm{oG}} \cdot \cos\varphi_{\mathrm{sun}} \cdot d^2 \cdot \rho_{\mathrm{G}} \cdot T_{\mathrm{G}}(\varphi_{\mathrm{sun}}), \qquad (4.3)$$

т.е. для каждого канала – свой уровень солнечного излучения, своё отражение от поверхности и своё пропускание атмосферы.

Касательно спутниковых измерений известно, что так как отражение в указанных спектральных каналах для каждого типа поверхности различно вегетационный индекс [14] для определённой территории позволяет выделять достаточно много типов поверхности с хорошей точностью. Однако спутниковые изображения имеют ограничение по регулярности появления безоблачных снимков. Поэтому использование *RGB*-изображений, получаемых с помощью БПЛА, даже в облачной ситуации позволяет получать информацию о состоянии растений на исследуемой территории. При этом необходимо выполнять соответствующую коррекцию изображений таким образом, чтобы извлекать информацию об отражении растений с минимальными погрешностями.

Подставив уравнения для *RGB*-каналов (4.1–4.2) в (3.1) и (3.2), получим:

$$Greenness1 = \\ = \frac{\cos\varphi_{\mathrm{sun}} \cdot d^2 (2 \cdot \rho_{\mathrm{G}} - g_1 \cdot \rho_{\mathrm{R}} \cdot t_1 - g_2 \cdot \rho_{\mathrm{B}} \cdot t_2)}{E_{\mathrm{oG}} \cdot T_{\mathrm{G}}(\varphi_{\mathrm{sun}})}, \qquad (5)$$

$$Greenness2 = \frac{\rho_{\mathrm{G}} - \rho_{\mathrm{R}} \cdot g_1 \cdot t_1}{\rho_{\mathrm{G}} + \rho_{\mathrm{R}} \cdot g_1 \cdot t_1}. \qquad (6)$$

Из выражения (6) видно, что *Greenness*2 в большей мере зависит от состояния атмосферы в *R*- и *G*-каналах изображения по сравнению с *Greenness*1, где задействованы все три канала. Показатели внеатмосферного солнечного спектра в *R*- и *B*-каналах могут рассчитываться заранее ($g_1 = E_{\mathrm{oR}}/E_{\mathrm{oG}}$, $g_2 = E_{\mathrm{oB}}/E_{\mathrm{oG}}$) и учитываться при расчётах. При этом изменения атмосферного состояния на *R*- и *B*-каналах сказываются, но отношения $t_1 = T_{\mathrm{R}}(\varphi_{\mathrm{sun}})/\mathrm{T}_{\mathrm{G}}(\varphi_{\mathrm{sun}})$ или $t_2 = T_{\mathrm{B}}(\varphi_{\mathrm{sun}})/T_{\mathrm{G}}(\varphi_{\mathrm{sun}})$ меняются слабее самих функций пропускания атмосферы.

Заметим, что пропускание всей толщи земной атмосферы в видимой области спектра (0,35–0,65 мкм) определяется закономерностями рэлеевского и аэрозольного ослаблений солнечного излучения и значимым является поглощение озоном. Остальные газы (SO_2, NO_2) мало влияют на пропускание всей толщи атмосферы.

С учётом приведённых на рис. 3 и 4 данных нами выполнены расчёты по формулам (4.1–4.3) и на их основе получены значения *Greenness*1 и *Greenness*2. Зная, что истинные значения *Greenness* связаны с $\rho(\lambda)$ растений, можно для соответствующих каналов *RGB*-изображения построить точные значения этих величин. Оказалось, что (без учёта шумовых помех при измерениях) уровень влияния безоблачной атмосферы на *Greenness*2 для местного времени 12 ч и 120-го дня (30.04.2019 [https://fincalculator.ru/kalkulyator-dnej]) составляет 22,5 % (для 180-го дня 2,5 %) и для времени 15 ч того же дня – 9,5 %. Понятно, что включение в расчёты более сложной модели переноса солнечного излучения в атмосфере позволит получать более верные значения отклонений от точного значения, рассчитанного по $\rho(\lambda)$ как для безоблачной, так и для облачной ситуаций.

Следует заметить, что при коррекции БПЛА-изображений на практике возникает сложность, связанная с определением параметров в уравнениях (5) и (6). Одна из самых простых – коррекция на такие параметры, как $\cos\varphi_{\mathrm{sun}}$, d^2,

Рис. 5. БПЛА-изображение поля пшеницы в разные дни полевого сезона

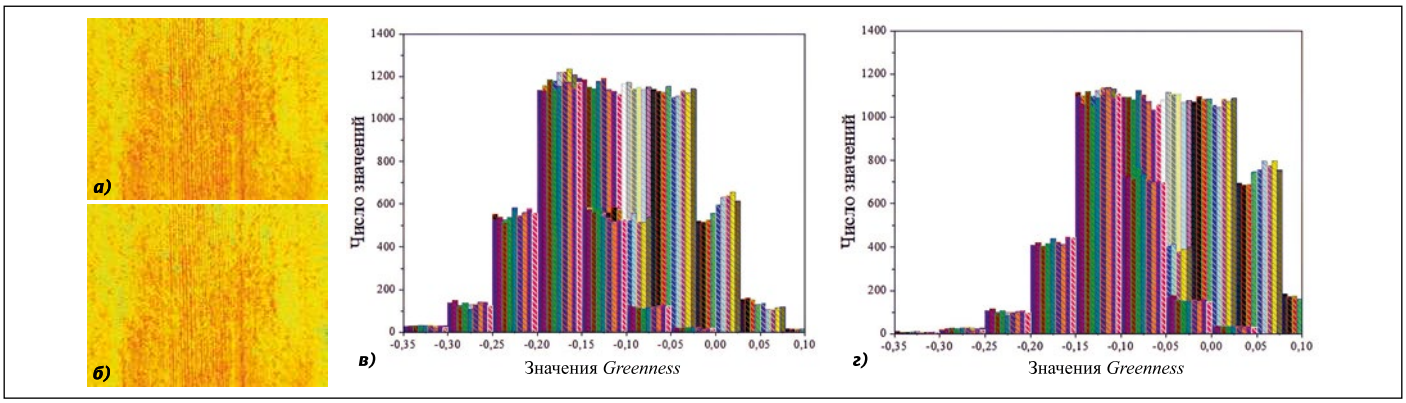


Рис. 6. Изображение *Greenness*1 (*а*, *б*) и гистограммы значений индекса (*в*, *г*) поля пшеницы за 06.07.2019 без коррекции (*а*, *в*) и с коррекцией (*б*, *г*)

g_1, g_2, когда они могут рассчитываться заранее для любого дня года и времени дня. Учёт атмосферы происходит через параметры t_1 и t_2, которые могут широко меняться согласно атмосферной ситуации. Одна из компонент пропускания, которая может учитываться достаточно точно и которая является определяющей по величине в солнечной области, – функция пропускания Рэлея. Учитывая, что коэффициент пропускания определяется как $T = \exp(-\tau/\cos\varphi_{sun})$, где τ – оптическая толща аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения газов, рассчитываемая как $\tau = \tau_{aer} + \tau_{rel} + \tau_{gas}$, где τ_{aer}, $\tau_{rel,}$ и τ_{gas} – оптические толщи аэрозоля, Рэлея и поглощения газами соответственно.

Поскольку рэлеевское рассеяние в атмосфере стабильно [16], его можно выделять из общей функции пропускания и на него выполнять коррекцию. Учёт в изображениях поглощения газами и аэрозольного рассеяния требует непосредственных измерений на поле, во время съёмки или использования модельных значений. Учёт по модели тоже важен в том смысле, что появляющийся остаток от реального пропускания будет существенно меньше текущих вариаций пропускания атмосферы.

Рассмотрим БПЛА-изображения (рис. 5), полученные за период с 06.07.2019 по 17.08.2019 над пшеничным полем при высоте полёта 10 м, показывающие разные периоды развития растений на СХ поле. Время измерений выбиралось одинаковым, с 11 до 13 ч местного времени при безоблачных или частично облачных условиях. Рассчитывая индекс *Greenness*, можно убедиться, что средняя яркость изображения связана с состоянием атмосферы и временем измерения, и все изменения (рис. 3, *а* и 4) будут влиять на значение индекса, и, значит, на точность оценки состояния растений, что, несомненно, следует корректировать.

На рис. 6 показаны изображения *Greenness*1 до и после коррекции для поля пшеницы за 06.07.2019. На первый взгляд различия между рис. 6, *а* и *б* невелики, но они есть, и для более полного понимания различий рассчитаны гистограммы значений индекса *Greenness*1 (рис. 6, *в* и *г*). Анализируя рис. 6, *в* и *г*, можно отметить, что изменился центр кривой распределения (было –0,05, стало –0,1) и амплитуда (было 1100, стало 1200), а структура кривой практически не изменилась. Учитывая это, можно сказать, что предлагаемая методика уменьшает систематическую ошибку, вызванную неучётом влияния положения Солнца и, частично, атмосферных эффектов.

Заключение

Разработан алгоритм атмосферной коррекции для устранения вариаций освещённости для получаемых с помощью БПЛА *RGB*-изображений. Процесс коррекции проводился на основе учёта изменения модельных характеристик переноса излучения с набором параметров, соответствующих конкретному географическому району. Проведено тематическое исследование для анализа полезности алгоритма в практике СХ работ. Результаты расчётов показали, что БПЛА-изображения содержат информацию о функции (спектре) пропускания атмосферы на оптической трассе между входом солнечного излучения в атмосферу и земной поверхностью. Разработанный алгоритм дал надёжный метод получения требуемых точных данных для расчёта вегетационных индексов *Greenness*.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, проект *FEWM-2020–0036*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Журавлёв В.Н., Журавлёв П.В.* Применение беспилотных летательных аппаратов в отраслях экономики: состояние и перспективы // Научный вестник МГТУ ГА. – 2016. – № 226. – С. 156–164.

2. *Candiago S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M. Gattelli M.* (2015) Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images // Remote Sens. – 2015. – Vol. 7. – P. 4026–4047.

3. *Mogili U.R., Deepak B.* Review on application of drone systems in precision agriculture // Procedia Comput. Sci. – 2018. – Vol. 133. – P. 502–509.

4. *Brede B., Suomalainen J., Bartholomeus H., Harold M.* Influence of solar zenith angle on the enhanced vegetation index of a Guyanese rainforest // Remote Sens. Lett. – 2015. – Vol. 6. – P. 972–981.

5. *Jakob S., Zimmermann R., Gloaguen R.* The Need for Accurate Geometric and Radiometric Corrections of Drone-Borne Hyperspectral Data for Mineral Exploration: MEPHySTo – A Toolbox for Pre-Processing Drone-Borne Hyperspectral Data // Remote Sens. – 2017. – Vol. 9, No. 1. – P. 88.

6. *Yuan Y., Sun C., Zhang X.* Measuring and Modeling the Spectral Bidirectional Reflection Distribution Function of Space Target's Surface Material // Acta Photonica Sin. – 2010. *Yuan Y., Sun C., Zhang X.* Measuring and Modeling the Spectral Bidirectional Reflection Distribution Function of Space Target's Surface Material // Acta Photonica Sin. – 2010. – Vol. 59. – P. 2097–2103.

7. *Shepherd J.D., Dymond J.R.* Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography // Int. J. Remote Sens. – 2003. – Vol. 24. – P. 3503–3514.

8. *Hruska R., Mitchell J., Anderson M., Glenn N.F.* Radiometric and Geometric Analysis of Hyperspectral Imagery Acquired from an Unmanned Aerial Vehicle // Remote Sens. – 2012. – Vol. 4, No. 9. – P. 2736–2752.

9. *Hakala T., Honkavaara E., Saari H., Makynen J., Kaivosoja J., Pesonen L., Polonen I.* Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions / In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS): Christian Heipke, Germany, 2013. – P. 189–194.

10. *Habte A., Sengupta M., Lopez A.* Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998–2015. NREL/TP-5D00–67722. – 2017. – 38 p.

11. *Lin S., Gu J., Yamazaki S., Shum H.-Y.* Radiometric calibration from a single image. In Proc. IEEE Conf. on Comp. Vision and Pattern Recog., 2004. – P. 938–945.

12. *Demain C., Journee M., Bertrand C.* Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces // Renew. Energy. – 2013. – Vol. 50. – P. 710–721.

13. *Катаев М.Ю., Дадонова М.М.* Методика распознавания растительности на основе цветового и текстурного анализа *RGB* изображений. // Светотехника. – 2019. – № 2. – P. 34–39.

14. *Черепанов А.С.* Вегетационные индексы // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98–102

15. *Gueymard C.* Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine. – Florida Solar Energy Center, FSEC Report PF-270–95, 1995. – 84 p.

16. *Bodhaine B.A., Wood N.B., Dutton E.G., Slusser J.R.* On Rayleigh optical depth calculations // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 1999. – Vol. 16, No. 11. – P. 1854–1861.

Катаев Михаил Юрьевич, *доктор техн. наук. Окончил в 1984 г. Томский государственный университет по специальности «Инженер-оптик-исследователь». Профессор кафедры автоматизированных систем управления(АСУ) ТУСУР и профессор Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета (ТПУ). Научный руководитель Центра космического мониторинга Земли ТУСУР*

Дадонова Мария Михайловна, *магистрант кафедры автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУР*

Ефременко Дмитрий Сергеевич, *доктор техн. наук. Окончил в 2009 г. МЭИ. Научный сотрудник Института дистанционного зондирования (IMF) Германского аэрокосмического центра (DLR) в Оберпфаффенхофене, Германия, и доцент Мюнхенского технического университета. Область научных интересов: перенос излучения, дистанционное зондирование, анализ больших данных*

Новая диодная УФ лампа *DELOLUX* 504 ускоряет отверждение клеёв

Компания *DELO* представила новую диодную лампу для УФ-отверждения специальных клеёв, которые теперь можно найти почти в каждом автомобиле и мобильном телефоне, а также в самолётах (в число клиентов *DELO* входят *Bosch*, *Daimler, Huawei, Osram, Siemens* и *Sony*). Точечный источник света *DELOLUX 504* содержит УФ-диоды последнего поколения, яркость которых втрое выше, чем у предыдущей модели *DELOLUX 502*. Он разработан для высокоскоростного производства в электронной и автомобильной промышленности, где требуется облучение небольших площадей и простая интеграция оборудования в существующие системы.

Высокая облучённость, 4 Вт/см², на длине волны 365 нм даёт двойные преимущества: ускоряет УФ-отверждение клея, сокращая время цикла, и позволяет размещать лампу подальше, что обеспечивает большую гибкость в её интеграции в производственные линии.

Из-за ограниченности места для установки в таких системах *DELO* придал лампе очень компактную конструкцию. При этом оптимизированное управление температурой гарантирует, что тепло, выделяемое диодами, быстро рассеивается за счёт прямого подсоединения к радиатору, что повышает срок службы диодов; и такое (пассивное) охлаждение позволяет использовать лампы в чистых помещениях. Зона выхода света имеет эллиптическую форму, что позволяет избирательно облучать только определённые области.

Ещё одно преимущество – разъёмный присоединительный кабель лампы. В отличие от многих других ламповых конструкций, головку лампы можно легко заменять, например, в конце её срока службы, без необходимости разбирать всю производственную линию.

led-professional.com
21.10.2020

Проекторы со светодиодами в качестве фар

Принцип работы новых фар с СД «*Digital Matrix LED*» (*DML*) для электромобилей автоконцерна *Audi* напоминает кинопроекторы – каждая фара состоит из 1,3 млн микрозеркал, которые проецируют мощный пучок света на дорогу. Полный набор возможностей проекторов появится в Европе, а в США, из-за нормативных ограничений, электромобили будут только «здороваться» и «прощаться» с водителем, а также позволят избегать «ослепляющего» эффекта для встречного транспорта.

Впервые *DML* будет реализована в обновлённых электромобилях *Audi* «*e-tron Sportback*» и «*e-tron SUV*».

Приветствие владельца – лишь малая часть того, на что способны *DML*-фары, заявляют представители *Audi*. Главная особенность устройства – это «световой ковёр» длиной в 50 м, который освещает ближайшую часть дороги и не мешает другим автомобилям. Более того, динамичные СД могут менять положение до 5 тыс. раз в секунду, что пригодится при смене полос движения – фары будут расширять освещаемую область, когда водитель решит перестроиться. Предполагается, что последняя функция значительно снизит количество аварий, связанных со слепыми зонами автомобилей.

Audi сотрудничает с государственными регуляторами США, чтобы открыть доступ к полному набору функций «*Digital Matrix LED*» для покупателей из США.

Audi – не первый автопроизводитель, который решил переизобрести передние фары. В 2018 г. *Mercedes-Maybach*, подразделение концерна *Daimler AG*, ответственное за производство премиальных автомобилей, представило аналогичную систему для автомобилей *S*-класса. Однако *Mercedes* не удалось довести технологию до массового потребителя, а *Audi* планирует вывести «*Digital Matrix LED*» на массовый рынок уже в следующем году.

nanonewsnet.ru
18.10.2020

Система интеллектуального освещения и передачи данных на основе *RGBW*-светодиодов

**Д.С. ШИРЯЕВ[1], О.А. КОЗЫРЕВА[1], И.С. ПОЛУХИН[1], С.А. ЩЕГЛОВ[1], С.А. ДЕГТЯРЁВА[1], М.А. ОДНОБЛЮДОВ[2], В.Е. БУГРОВ[1]*

[1] Университет ИТМО, Санкт-Петербург
[2] СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург
E-mail: 192167@niuitmo.ru*

Аннотация

Разработана и изготовлена система интеллектуального освещения, производящая передачу данных по видимому излучению. Исследованы спектральные характеристики нисходящего канала связи, в котором для передачи данных использован красный кристалл *RGBW*-светодиода. Разработана схема управления цветностью излучения с использованием протокола *DALI*, которая позволяет задавать разные сценарии освещения при сохранении скорости передачи данных. Область изменения цветности излучения охватывает практически всю гамму цветов в цветовом пространстве. Для создания системы разработана схема ВЧ согласования импедансов компонентов системы и исследованы частотные характеристики предложенной схемы. Определены оптимальные параметры сигнала для передачи данных по видимому излучению: несущая частота, тип и полоса модуляции. В качестве метода исследования качества канала передачи выбрано наблюдение сигнальных созвездий, являющихся представлением всевозможных значений комплексной амплитуды манипулированного сигнала в виде комплексного числа на плоскости квадратур (косинусной и синусной составляющих несущего сигнала) и фиксации амплитуды вектора ошибки *EVM*. В канале передачи по видимому свету для сигналов с амплитудной модуляцией значение *EVM* было существенно ниже, чем для фазоманипулированных сигналов. При реализации разных сценариев изменения освещения излучение остальных, не задействованных в передаче, кристаллов светодиода не приводило к увеличению *EVM* более чем на один процент.

Ключевые слова: оптические беспроводные системы связи, беспроводная связь по видимому свету, *Li-Fi*, *RGBW*-светодиод, адаптивное освещение, человекоориентированное освещение (*HCL*), протокол *DALI*.

Введение

В настоящее время большое развитие получают системы «умный дом», в которых множество датчиков автоматизированно создаёт комфортные условия для человека. Одновременно эти системы нацелены на использование одного ресурса для реализации нескольких сервисов. В связи с этим известна технология *Li-Fi* (*Light Fidelity*) [1, 2], в которой предложено использовать освещение СД источниками излучения для передачи данных. В этой технологии СД, как люминофорные, так и *RGBW*, модулируются ВЧ информационным сигналом; при этом изменение светового потока не ощущается человеческим глазом, но хорошо детектируется чувствительными быстродействующими фотоприёмниками. Одновременно возникает возможность создания специального, комфортного для человека освещения, например, в соответствии с концепцией человекоориентированного освещения (*Human Centric Lightning*, *HCL*), в рамках которой можно создавать сценарии управления уровнем и цветностью излучения.

Традиционно, в *Li-Fi* системах на основе *RGBW*-СД, используют мультиплексирование по длине волны для увеличения общей скорости при параллельной передаче данных [3–6]. При этом ставят задачи по получению скоростей передачи выше 1 Гбит/с и (или) расстояний передачи данных в десятки метров [7, 8], но не уделяют внимания вопросам качества освещения. Также существуют системы с возможностью управления цветностью излучения по протоколу *DALI*, но они не предполагают передачи данных по видимому каналу.

В настоящей работе нами предложена и разработана система освещения с использованием *RGBW*-СД с функцией дуплексной передачи данных. Основной целью работы являлась организация стабильного дуплексного канала связи со скоростями передачи, сопоставимыми с тем же в *Wi-Fi*, при реализации сценария изменения цветности излучения с управлением по протоколу *DALI*. В соответствии с этим решались задачи по разработке оригинальной схемы СД передатчика и исследованию видов сигналов, оптимальных для передачи по созданному каналу с точки зрения минимума ошибок.

Описание системы

Для достижения поставленной цели предложены и реализованы СД приёмопередатчик и клиентское приёмопередающее устройство на коммерчески доступной компонентной базе (рис. 1). Передающая часть СД приёмопередатчика – это матрица *RGBW*-СД, в которой красный кристалл подключается к разработанным ВЧ цепям согласования и подачи смещения, а остальные кристаллы подключаются к контроллеру *DALI*. Приёмная часть состоит из матрицы ИК фотодиодов с линзовой системой. Модулированный свет от матрицы *RGBW*-СД через свободное пространство поступает на матрицу фотоприёмников клиентского приёмопередающего устройства, где сигнал суммируется и усиливается для последующей обработки.

Нисходящая линия связи построена на модуляции излучения красного кристалла СД, а восходящая – излучения ИК диода с пиковой длиной волны 850 нм. Восходящая линия связи в данной работе не рассматривалась, а в качестве неё была использована линия из нашей предыдущей работы [9].

Выбор компонентной базы для передающей (СД) и приёмной (фотодиодной) частей определяется быстродействием оптоэлектронных компонентов. Так, для передачи информации с канальной скоростью, сопоставимой со скоростями в *Wi-Fi*, необходимо иметь полосу пропускания СД и фотоприёмников не менее 40 МГц. В ка-

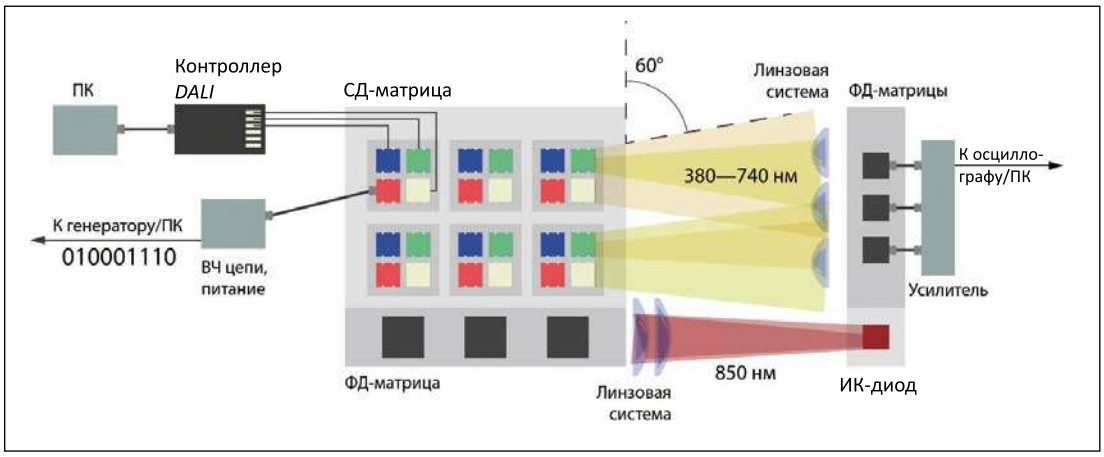


Рис. 1. Упрощённая структурная схема светодиодного приёмопередатчика и клиентского приёмопередающего устройства

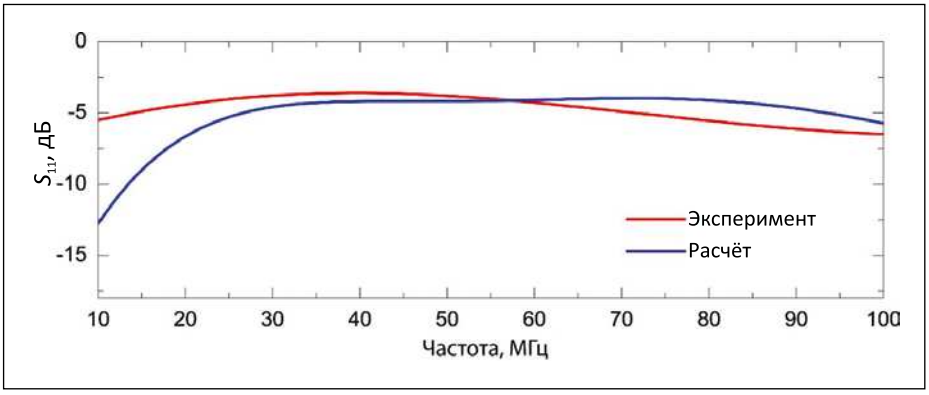


Рис. 2. Расчётная и измеренная кривые коэффициента отражения ВЧ сигнала от красного кристалла светодиода S_{11}

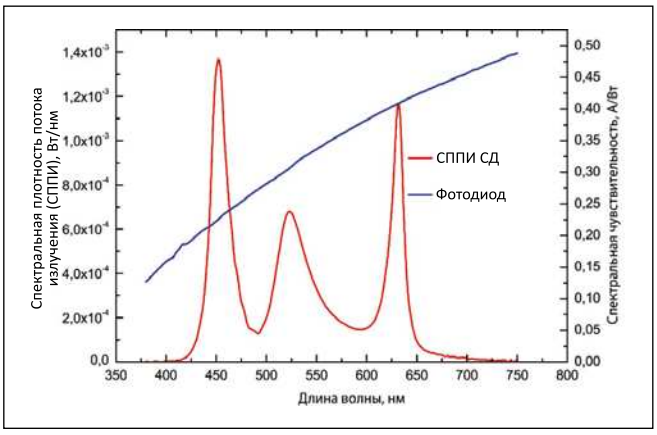


Рис. 3. Спектральная чувствительность фотоприёмника и спектр излучения *RGBW*-светодиода

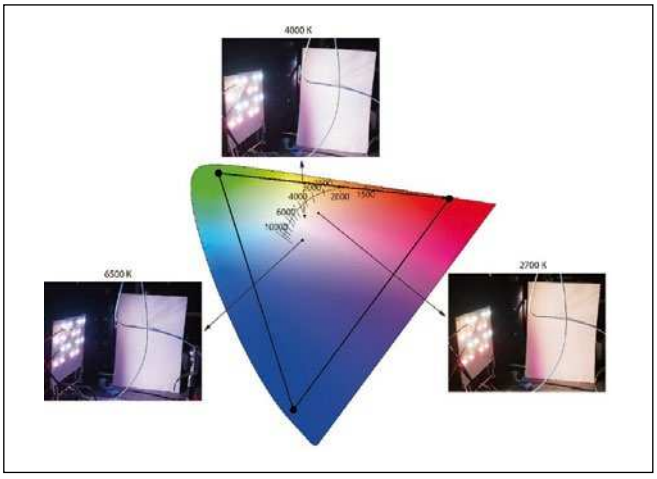


Рис. 4. Фото излучающей светодиодной матрицы на разных стадиях сценария освещения. Точками на цветовом графике МКО 1976 г. отмечены соответствующие $T_{кц}$, измеренные спектрометром *UPRtek MK350S*

честве источника видимого излучения были использованы *RGBW*-СД *Cree XLamp MCE*, а в качестве приёмника – кремниевые фотодиоды *Thorlabs FDS100*; такой выбор обусловлен малыми значениями паразитных емкостей компонентов: 70 и 25 пФ соответственно. Предельная частота модуляции f может оцениваться по формуле

$$f \approx \frac{1}{2\pi RC},$$

где R – сопротивление нагрузки, в данном случае ВЧ тракта; C – значение паразитной ёмкости компонента. Расчётные значения этой частоты – 45 МГц для СД и 127 МГц для фотодиода.

Модуляция сигнала СД производится вблизи рабочей точки, т.е. не происходит полного выключения-включения СД, а изменяется уровень светового потока до 30 % от номинального значения.

ВЧ сигнал на все красные кристаллы СД в матрице подаётся синфазно, а импеданс красного кристалла каждого СД согласован с импедансом ВЧ-тракта (для обеспечения эффективной передачи ВЧ мощности от модулятора). Расчётная кривая коэффициента отражения единичного кристалла и измеренная показаны на рис. 2. Схемы согласования импедансов, постоянного смещения и усиления построены на сосредоточенных пассивных компонентах и реализованы в гибридном интегральном исполнении. СД приёмопередатчик и клиентское приёмопередающее устройство имеют коаксиальные радиочастотные вход и выход для подачи и снятия ВЧ сигнала.

Выбор красного кристалла для передачи данных обусловлен спектральными характеристиками компонентов: чувствительность фотоприёмни-

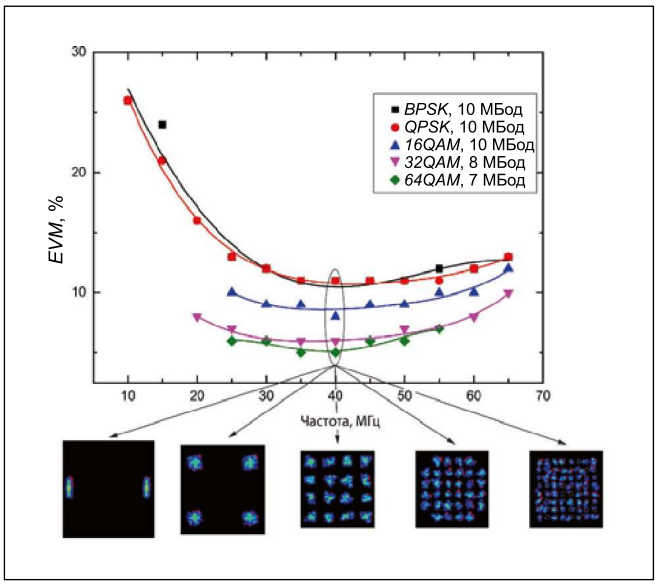


Рис. 5. Зависимости вектора ошибки сигнала *EVM* от несущей частоты сигнала от красного кристалла светодиода

ка в красной части спектра в полтора раза выше, чем в синей. По расчётам, энергетический выигрыш от более высокой фоточувствительности на приёмной стороне больше, чем от более высокого уровня излучения синего кристалла на передающей стороне. На рис. 3 показаны спектр излучения белого *RGBW*-СД с коррелированной цветовой температурой $T_{кц}$ около 10000 К и кривая спектральной чувствительности фотодиода *FDS100*.

В итоговой конфигурации разработанный приёмопередатчик имеет матрицу из 16 *RGBW*-СД, а в клиентском устройстве сигнал регистрируется матрицей из 4 фотоприёмников.

Сценарии освещения

Концепция *HCL* подразумевает подстройку параметров освещения под биологические потребности человека. Предлагаемая система передачи данных позволяет изменять цветность излучения практически во всём цветовом пространстве, что позволяет задавать различные сценарии для освещения в помещениях.

Исследования показывают, что для хорошего самочувствия и продуктивной работы, изменение искусственного освещения в течение дня должно быть максимально близко к изменению естественного [10]. Так, $T_{кц}$ источников излучения должна плавно повышаться от 2700 К рано утром до 6500 К в полдень и снова плавно понижаться до 2700 К к концу рабочего дня. На рис. 4 показаны фотографии передающего модуля с $T_{кц}$ 6500, 4000 и 2700 К и область возможного изменения цветности источников излучения на цветовом графике МКО 1976 г. (обозначена чёрным треугольником, в вершинах которого указаны цветовые координаты каждого кристалла СД). Это один из сценариев, реализуемых в разработанной системе при сохранении стабильного канала передачи данных.

Разработанный СД приёмо-передатчик позволяет создавать освещённость на рабочем месте, расположенном на расстоянии 1,5–2 м от СД матрицы, до 450 лк.

Экспериментальное исследование канала связи

Для оценки передаточных характеристик созданного канала связи рассматривались сигнальные созвездия разных видов модуляции сигналов, по которым можно определять амплитуду вектора ошибки и типы шумов, воздействующих на канал связи. Для получения сигнальных созвездий и определения зависимости амплитуды вектора ошибки *EVM* от несущей частоты сигнала с генератора сигналов произвольной формы *Keysight M8195A* на СД приёмопередатчик подавалась псевдослучайная последовательность $PRBS2^7–1$, а сигнал с клиентского приёмопередатчика наблюдался на осциллографе *Keysight UXR0204A*.

На незадействованные в передаче данных кристаллы подавалось напряжение смещения с контроллера *DALI*, подключённого к ПК, на котором задавались сценарии освещения (рис. 1).

На рис. 5 приведены графики зависимости амплитуды вектора ошибки от несущей частоты сигнала при разных типах модуляции: двоичная фазовая манипуляция *BPSK*, квадратурная фазовая манипуляция *QPSK*, 16-позиционная квадратурная модуляция *16QAM*, 32-позиционная квадратурная модуляция *32QAM* и 64-позиционная квадратурная модуляция *64QAM*. Все измерения проведены при фиксированной амплитуде модулирующего сигнала.

При несущей частоте сигнала вблизи 40 МГц наблюдается минимум *EVM* по всем исследованным типам модуляции. Были исследованы сигналы с полосой модуляции 10 МГц и, соответственно, символьной скоростью 10 МБод. Как видно из рис. 5, при использовании фазовых манипуляций амплитуда *EVM* выше, чем при использовании квадратурной амплитудной модуляции. Так как при изменении фазы сигнала фотоприёмник регистрирует изменение уровня излучения, сравнимое с уровнем шумов, возникают фазовые помехи. Это видно и из сигнального созвездия *BPSK* сигнала, так как искажение точек в ячейках создаёт визуальный эффект сферической симметрии относительно центра созвездия [11], что свидетельствует о наличии фазового сдвига сигнала или же фазового дрожания.

Далее были исследованы характеристики сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией разной позиционности. Из сигнальных созвездий *QAM* сигналов видно, что возникает разброс точек диаграммы вокруг соответствующих им позиций, что показывает воздействие на канал связи аддитивного белого гауссова шума [11]. В связи с этим сужение полосы сигнала может уменьшать число ошибок, но для сохранения битовой скорости необходимо увеличивать число бит на символ: с 4 до 6 (переход от *16QAM* к *64QAM*). Так, значение *EVM* снизилось до 5 % без потери битовой скорости при модулировании сигнала модуляцией *64QAM* с несущей частотой 40 МГц и символьной скоростью 7 МБод.

В таблице показаны значения амплитуды вектора ошибки в режиме включения только красного кристалла и в режиме реализации сценария *HCL* – излучают все кристаллы. Качество передачи данных не меняется при работе всех кристаллов СД, что позволяет использовать предложен-

Таблица

Вектор ошибки сигнала для разных модуляций (частота несущей сигнала – 40 МГц)

Вид модуляции	*EVM*, % Только передача на красном кристалле	*EVM*, % Передача с одновременной реализацией сценариев *HCL*
BPSK	11	12
QPSK	11	11
16QAM	8	9
32QAM	6	6
64QAM	5	6

ную схему для передачи данных и одновременно управлять цветностью излучения в помещении.

Исследование рассмотренных выше типов сигналов во многом обусловлено планами по дальнейшей интеграции системы. Ранее [9] мы создали схемы преобразования сигнала, позволяющие переносить сигнал непосредственно с *Wi-Fi* модема на СД матрицу. Для реализованного канала на *RGBW*-СД при подключении к ПК через *Wi-Fi* модем и разработанные схемы преобразования сигнала мы получали (регистрировали) скорость и расстояние передачи в 24 Мбит/с и 2 м соответственно.

Заключение

Разработаны и изготовлены модули, позволяющие передавать данные по видимому излучению и одновременно реализовывать произвольные сценарии освещения, охватывающие почти всю цветовую гамму цветового пространства, изменяя цветность излучения по протоколу *DALI*. Световой канал показал свою схожесть с моделью радиочастотного канала с аддитивным белым гауссовым шумом, но только для амплитудных типов модуляций. Для фазовых манипуляций принцип работы полупроводниковых фотоприёмников создаёт дополнительные фазовые искажения на приёмной стороне. При передаче по видимому излучению напрямую радиочастотных сигналов целесообразно уменьшать полосу сигнала – при сохранении битовой скорости для уменьшения уровня шумов – путём увеличения количества бит на символ.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Федеральной программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», шифр 2017–14–582–0001–084, соглашение № 14.581.21.0029, уникальный идентификатор RFMEFI58117X0029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Haas H., Yin L., Wang Y., Chen C.* What is Li-Fi? // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Vol. 34. – P. 1533–1544.
2. *Rajbhandari S., McKendry J.J.D., Herrnsdorf J. et al.* A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications // Semiconductor Science and Technology. – 2017. – Vol. 32, No. 2. – P. 1–40.
3. *Wang Y., Wang Y., Chi N., Yu J., Shang H.* Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED // Opt. Express. – 2013. – Vol. 21. – C. 1203–1208.
4. *Cossu G., A.M. Khalid A.M., Choudhury P., Corsini R., Ciaramella E.* 3.4-Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20. – P. B501–B506.
5. *Wu F.M., Lin C.T., Wei C.C., Chen C.W., Chen Z.Y., Huang H.T.* 3.22-Gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation / OFC Conference. – 2013. – P. 1–3.
6. *Wu F.M., Lin C.T., Wei C.C., Chen C.W., Chen Z.Y., Huang H.T., Chi S.* Performance Comparison of OFDM Signal and CAP Signal Over High Capacity RGB-LED-Based WDM Visible Light Communication // IEEE Photonics Journal. – 2013. – Vol. 5, Is. 4.
7. *Chow C.W., Shiu R.J., Liu Y.C., Liu Y., Yeh C.H.* Non-flickering 100 m RGB visible light communication transmission based on a CMOS image sensor // Opt. Express – 2018. – Vol. 26. – P. 7079–7084.
8. *Atta M.A., Bermak A.* 160 m visible light communication link using hybrid undersampled phase-frequency shift on-off keying and CMOS image sensor // Opt. Express. – 2019. – Vol. 27. – P. 2478–2487.
9. *Kozyreva O.A., Polukhin I.S., Shiryaev D.S., Shcheglov S.A., Borodkin A.I., Gareev E.Z., Kondakov D.V., Matveev Y.A., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E.* Wireless local data transmission network through LED lighting compatible with IEEE802.11 protocol communication systems // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1236, No. 1. – P. 012085.
10. *Walerczyk S.* Human Centric Lighting // Architectural SSL. – 2012. – No. 6. – P. 20–26.
11. *Львов А.А., Киселёв В.В.* Численное моделирование и анализ воздействия искажений на ofdm/qam-сигнал // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 104–110.

Ширяев Даниил Сергеевич, *аспирант. Окончил в 2020 г. магистратуру факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО. Инженер Лаборатории атмосферных оптических квантовых каналов связи Университета ИТМО*

Козырева Ольга Андреевна, *аспирант. Окончила в 2016 г. магистратуру СПбПУ Петра Великого. Научный сотрудник Лаборатории атмосферных оптических квантовых каналов связи Университета ИТМО*

Полухин Иван Сергеевич, *аспирант. Окончил в 2009 г. магистратуру СПбПУ Петра Великого. Директор Лаборатории атмосферных оптических квантовых каналов связи Университета ИТМО*

Щеглов Сергей Александрович, *инженер. Окончил в 2006 г. кафедру прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. Зав. светотехнической лабораторией факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО*

Дегтярёва Светлана Андреевна, *аспирант. Окончила в 2018 г. Университет ИТМО по программе магистратуры «Световой дизайн». Научный сотрудник Лаборатории атмосферных оптических квантовых каналов связи Университета ИТМО*

Одноблюдов Максим Анатольевич, *кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1996 г. кафедру оптоэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета имени В.И. Ульянова (Ленина). Директор Объединённого научно-технологического института и зав. лабораторией «Лазерные и плазменные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ) Петра Великого*

Бугров Владислав Евгеньевич, *доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил в 1996 г. кафедру оптоэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета имени В.И. Ульянова (Ленина). Директор мегафакультета фотоники и профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО*

Новые многослойные солнечные панели в 1,5 раза эффективнее традиционных

Инженер Ли Минджу (Ларри) из Университета Иллинойса объявил о прорыве в разработке многослойных солнечных элементов. Команда исследователей под его руководством создала новый тандемный элемент, который может увеличить выработку электроэнергии солнечными панелями на 50 %.

«Кремниевые солнечные панели широко распространены, так как они дёшевы и могут преобразовывать чуть более 20 % солнечного излучения в полезную электроэнергию. Однако, как и кремниевые компьютерные микросхемы, кремниевые солнечные элементы достигают предела своих возможностей, поэтому поиск новых способов повышения их эффективности может быть привлекателен для поставщиков и потребителей энергии», – объясняет Ли.

С целью расширить возможности традиционных солнечных панелей, команда разработала новый полупроводниковый материал на основе фосфида арсенида галлия, который дополняет характеристики кремния. Оба материала поглощают видимый свет, но фосфид арсенида галлия делает это, выделяя меньше тепла. В то же время кремний выигрывает у фосфида в преобразовании энергии из ИК части солнечного спектра. Более того, в отличие от обычных солнечных панелей, гибридные элементы значительно лучше защищены от дефектов, возникающих со временем.

Фань Шичжао, один из участников исследования, разработал новый процесс формирования границ раздела в ячейке из фосфида арсенида галлия, что привело к значительным улучшениям в стабильности новых элементов. В результате команда получила защищённые солнечные панели, которые вырабатывают в 1,5 раза больше электроэнергии, чем широко используемые кремниевые.

Повышение выработки сразу на 50 % – это гигантский прорыв, который может привести к дальнейшему снижению стоимости выработки энергии солнечными панелями.

При этом важно отметить, что несмотря на эффективность и стабильность, фосфид арсенида галлия и другие подобные ему полупроводниковые материалы заметно дороже в производстве однослойных панелей из кремния. Но учёные не стали отказываться от перспективного материала, а сэкономили на кремнии, использовав его самые дешёвые варианты. В результате стоимость промышленного производства новой панели не должна сильно вырасти.

hightech.plus
11.10.2020

Письмо читателя

Опечатка в № 5 «Светотехники» за 2020 год

«Уважаемые коллеги!

Прочитал статью «Методика измерения пусковых токов в осветительных приборах со светодиодами». На с. 13 п. 2 журнала указано: «На рис. 6 демонстрируется существенная разница амплитуд пусковых токов для включения на максимуме напряжения (а) и в зоне перехода через 0 (б)». На мой взгляд, произошла ошибка, а именно, рисунки с индексами (а) и (б) перепутаны. В результате рисунки, предназначенные для пояснения текста, по факту находятся в полном противоречии с ним

С уважением, пожеланиями здоровья и успехов, читатель журнала В.В. Бармин».

Ответ редакции

Действительно, в статье «Методика измерения пусковых токов в осветительных приборах со светодиодами» допущена опечатка. В п. 2 на с. 13 вместо «На рис. 6 демонстрируется существенная разница амплитуд пусковых токов для включения на максимуме напряжения (а) и в зоне перехода через 0 (б)» следует читать:

«На рис. 6 демонстрируется существенная разница амплитуд пусковых токов для включения в зоне перехода напряжения через 0 (а) на максимуме напряжения (б)».

Редакция приносит свои извинения за допущенную ошибку и благодарит читателя за его внимательность и внимание к статьям, публикуемым в нашем журнале!

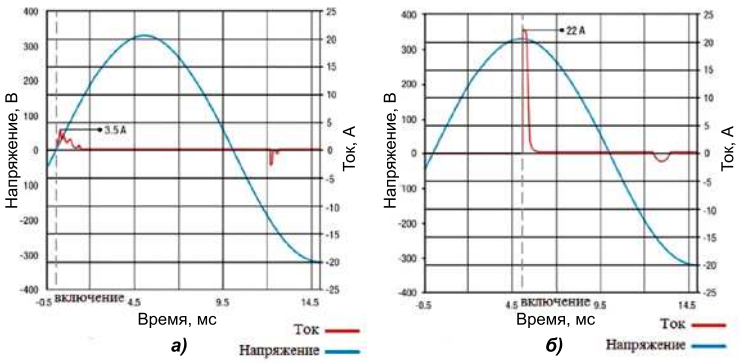


Рис. 6. Различие амплитудных значений пусковых токов в зависимости от момента включения

Светопланограф, моделирующий инсоляцию зданий и застройки арктической зоны России

А.И. ГИЯСОВ
НИУ МГСУ, Москва
E-mail: adham52@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме оценки инсоляции современных архитектурно-строительных и градостроительных объектов, а именно – разработке инсоляционного прибора «светопланограф планшетного типа». Прибор предназначен для широкого применения в условиях Арктической зоны при решении задач по оценке инсоляционного и светового режимов зданий и городских территорий и позволяет производить светоклиматическую паспортизацию и для других географических широт.

Оценивать и анализировать инсоляцию ряда участков городских застроек с помощью существующих в проектной практике методов и средств достаточно сложно. Для решения этих задач предпочтительнее всего использовать инсоляционный прибор «светопланограф планшетного типа», в основу которого положен метод моделирования графически условия инсоляции при ясном небосводе на горизонтальную плоскость. Прибор позволяет комплексно оценивать качественные и количественные характеристики инсоляции, освещения и УФ радиации.

Целью работы являлись разработка теоретических и методических положений по разработке светопланографа и выдача рекомендаций по его применению в архитектурно-строительном и градостроительном проектировании.

Ключевые слова: инсоляция, светопланограф, солнечная радиация, освещённость, здания, застройка.

Введение

В статье описаны устройство и принцип работы светопланографа, моделирующего инсоляцию зданий и городской территории и позволяющего залагать основу для составления светоклиматической паспортизации городов, на примере Арктической зоны.

Современные достижения в области физических и гигиенических исследований определяют необходимость дозирования солнечного облучения (инсоляции) человека и окружающей его среды.

Инсоляция – важнейший природный фактор в архитектурно-строительном и градостроительном проектировании, ему уделяют большое внимание архитекторы-проектировщики, строители, гигиенисты.

Территория РФ характеризуется большим разнообразием природно-климатических условий. Её районирование по природно-климатическим условиям и влияние последних на жизнедеятельность людей при решении задач проектирования зданий и сооружений требует индивидуализированного подхода. Вместе с тем строительные нормы и справочники по климату не всегда в полной мере учитывают эту специфику [1, 2]. Изучение климатических и светоклиматических особенностей северных регионов РФ – насущный приоритетный вопрос в условиях разработки новых программных направлений развития территории Арктической зоны РФ (АЗРФ).

В Арктике тесно переплетаются интересы многих государств, и не только арктических, к которым относятся РФ, США, Канада, Дания и Норвегия, и целый ряд стран ЕС. При этом РФ имеет уникальное геополитическое положение в Арктическом регионе.

Территория АЗРФ – 4386,6 тыс. км^2 или 25,7 % общей площади страны. В АЗРФ входят полностью или частично ряд северных территорий страны от Мурманской области до Чукотского АО [3, 4], которые отличаются схожими природно-климатическими условиями и высокой степенью урбанизации городов, населённых пунктов и ряда промышленных центров [5].

Арктический тип климата характеризуется холодным летом и суровой зимой, что во многом обусловлено особенностями инсоляции – важного климатообразующего фактора. При этом Арктический регион нуждается в новых архитектурных идеях и приёмах, в которых будут учитываться параметры его климатической и светоклиматической сред.

В северных регионах население подвержено хроническому дефициту дневного света, что может оказывать негативное влияние на функциональное состояние центральной нервной системы и артериальное давление [6].

Нерациональные использование и оценка ресурсов солнечной энергии отрицательно сказывается на психофизиологическом состоянии человека, ухудшая активную жизнедеятельность и увеличивая число людей с депрессией.

В бывшем СССР рядом НИИ и вузов архитектурного-строительного профиля при тесном взаимодействии с гигиенистами, светотехниками, теплофизиками, метеорологами, психологами, микробиологами и экономистами проводились соответствующие фундаментальные исследования.

Отечественными и зарубежными учёными сделан весомый вклад в решение проблемы инсоляции в архитектуре зданий и сооружений: выполнен ряд научно-исследовательских работ по нормированию, расчётному прогнозированию и проектированию инсоляции, проектированию солнцезащитных устройств, а также по гелио- и светоклиматическому районированию территорий [7–15].

Нормы инсоляции и естественного освещения территорий городов и зданий регламентируются в ряде зарубежных стран, таких как Великобритания, Франция, США, Швеция, Япония, Канада, ФРГ и Польша.

В последние годы тенденции нормирования режима инсоляции нашли отражение в перспективных нормативно-технических документах *DIN*5034 и *BS*8206, которые считаются прообразом будущих общеевропейских стандартов [16, 17].

В РФ и странах СНГ в настоящее время действует ряд нормативных документов, регламентирующих нормирование инсоляции и естественного освещения помещений и городских территорий в зависимости от границы зон по географическим широтам [18–22].

Световая среда имеет высокое биологическое значение и зависит от инсоляции, нормирование которой име-

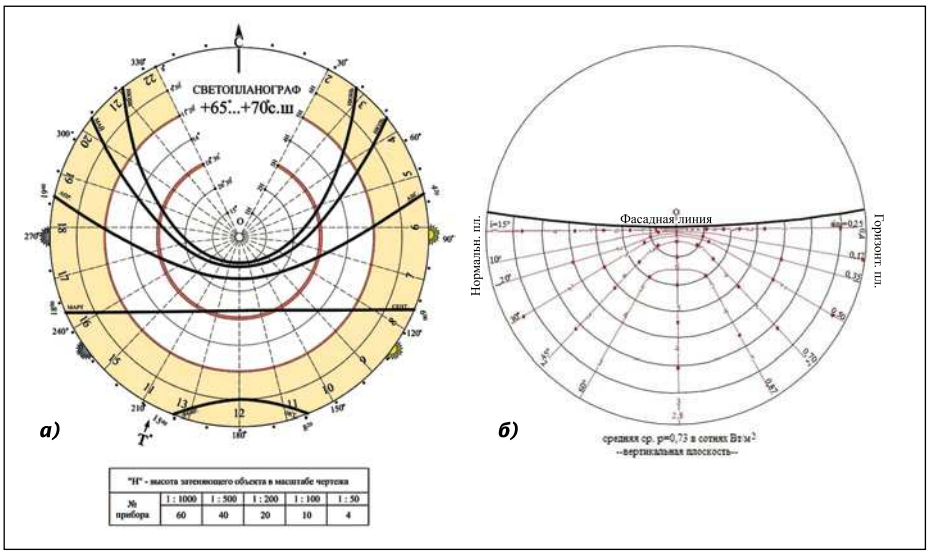


Рис. 1. Инсоляционный прибор «светопланограф»:
а – основная часть; *б* – накладная часть

ет существенное значение в регулировании физиолого-психологического состоянии человека, на которое впервые указал один из основоположников научной гигиены и общественной медицины в России Ф.Ф. Эрисман [23].

Современные теория и практика научных исследований и проектирования в области строительной физики доказывают необходимость зонирования территорий и городов по солнечному и световому климату для проектирования и строительства зданий.

В настоящее время в Арктической зоне для изучения радиационного режима функционируют актинометрические сети в составе метеорологических станций, результаты измерений которых обобщаются в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и представляются в виде справочников для общего пользования [24, 25]. Вместе с тем базы данных *NASA SSE* [26] в части ресурсов солнечной энергии АЗРФ (и вариаций солнечной радиации), собранные в Институте астрономии и геофизики им. Г. Леметра (Бельгия), нашли своё применение при оценке инсоляционного и светоклиматического режимов региона [27].

Комфортность, выразительность и экономичность – основные задачи повышения качества современной архитектуры, определяемые параметрами солнечной радиации в АЗРФ. Для их решения возможно применение разработанного инсоляционного прибора «светопланограф планшетного типа», моделирующего инсоляцию на горизонтальную плоскость. Светопланограф предназначен для комплексной оценки качественной характеристики инсоляции в виде биологического воздействия (в часах) и количественной её характеристики в виде теплового воздействия, а также – светового климата городских территорий и зданий.

Методика и устройства

В настоящее время в практике архитектурно-строительного и градостроительного проектирования для оценки режима инсоляции применяется ряд номографических методов оценки условий инсоляции зданий и территорий, а именно: инсографики, солнечные карты и климаграммы, которые представляют собой проекции естественного хода солнца на горизонтальную плоскость, моделирующие инсоляцию на схеме плана застройки. В указанных выше инсоляционных приборах показатели инсоляции определяются при помощи диаграмм и графиков. Существует и программный расчёт инсоляции на ЭВМ, практикуемый в градостроительной практике. Применение компьютерной технологии в решении задач по инсоляции и освещению архитектурно-строительных структур весьма важно.

Анализ существующих методов оценки режима инсоляции и способов расчёта в целом показывает, что круг решаемых вопросов в каждом из них зависит от поставленных архитектурно-строительных и градостроительных задач. В настоящее время нет универсального прибора или компьютерных программ, позволяющих одновременно решать комплекс задач по оценке инсоляционного и светового режимов городской территории, зданий и сооружений, чем обусловлено число и разнообразие инсоляционных инструментов и методик их применения. Каждый инсоляционный прибор имеет ограниченную область применения в задачах сложного объёмно-планировочного и пространственно-композиционного решения морфотипа застройки городов и зданий.

Анализировать с помощью ЭВМ инсоляционный режим некоторых участков городских застроек в проектной практике достаточно сложно, и при этом требуются предварительные графические построения и подсчёты в решении задач в целом.

В решении задач оценки инсоляционного и светового режимов наиболее предпочтителен инсоляционный прибор «светопланограф планшетного типа», в основу которого положен метод моделирования условий инсоляции в виде проекции траектории движения солнца на 22 число каждого месяца на горизонтальную плоскость при ясном небосводе.

Применение этого простого и практичного цифрового прибора в решении задач по инсоляции солнечным светом и подсчёту энергии излучения солнца и освещённости от него имеет ряд преимуществ, будучи ручным способом прогнозирования и комплексной оценки инсоляционного режима.

Светопланограф, в отличие от других инсографиков, моделирует инсоляционный режим территории городской застройки и зданий, облучаемых прямым солнечным светом (в часах), с выявлением площади светотени, облучённости (Вт/м^2) и освещённости (клк).

Светопланограф планшетного типа сконструирован на основе астрономических и географических данных, а также эталонов номограмм отдела Солнца Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга.

Координаты солнца, азимут и угловая высота в градусах для каждого часа светлого времени суток по 10 месяцам года для границы географической широты Арктической зоны в пределах 65–70 ^{o} с.ш. отражены в указанном инсоляционном приборе. Используя данную методику моделирования инсоляционного режима с применением астрономических

данных, при необходимости можно сконструировать светопланограф и для других географических широт северного полушария.

Светопланограф состоит из двух плоских прозрачных неподвижной основной (рис. 1, *а*) и подвижной накладной (рис. 1, *б*) частей, подвижно скреплённых между собой в центральной точке «О», которая совмещается с инсолируемым объектом – фасадом здания или изучаемой точкой объекта, или зоной территории городской застройки.

В верхней части круга основной части светопланографа нанесена стрелка, являющаяся указателем направления на север. Под ней отмечены марка прибора и предел действия по географической широте, (65–70)° с.ш., который соответствует географическим широтам Арктической зоны.

Основная часть прибора – круговая сетка из несомкнутых окружностей, пересекаемых радиальными линиями. Слева от неё приведена высота стояния солнца в пределах от 45° до 9°30′, соответствующая высоте затеняющего здания от «1Н» до «6Н».

На круговой сетке нанесены проекции движения солнца на 22 число каждого месяца, называемые кривыми хода солнца. На внешнем круге в конце радиальных пунктирных линий отмечены часовые циферблаты.

Характеристики инсоляции на отрезках времени при восходе и заходе солнца при его возвышении до 11° к горизонту в связи с малостью УФ и теплового излучения в расчётах не учитываются, вследствие чего несомкнутый круговой сектор выделен цветом.

Круговая сетка основной части светопланографа содержит указания о наличии солнечной УФ эритемной радиации на $\lambda = 325$ нм, определяемой по кривой хода солнца в границах круга «5Н» (для загородной атмосферы) и круга «3Н» (для городской атмосферы) при среднем коэффициенте прозрачности (пропускания) 0,73.

Стрелка внизу слева со значком «Т°» показывает направления и время начала установления максимальных температур нагрева приземного слоя воздуха, которые в сочетании с солнечной радиацией вызывают перегрев среды в летние месяцы.

В нижней части планшета приведена таблица с указанием номера прибора, высот затеняющего объекта «Н» в метрах и масштабы чертежей, для которых предназначены данные номограммы с конкретным номером прибора из комплекта светопланографа, состоящего из восьми плоских прозрачных планшеток.

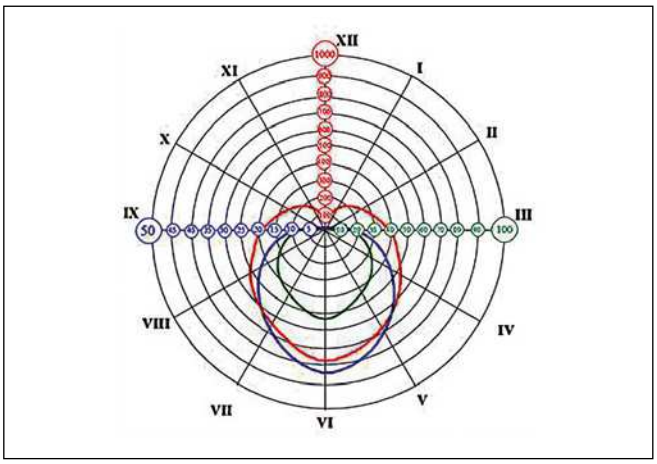


Рис. 2. Годовой ход среднемесячных уровней солнечной радиации:
—— – суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная) на горизонтальную поверхность при безоблачном небе, Вт/м²;
—— – её УФ составляющая в полдень, Вт/м²;
—— – высота солнца над горизонтом (в градусах)

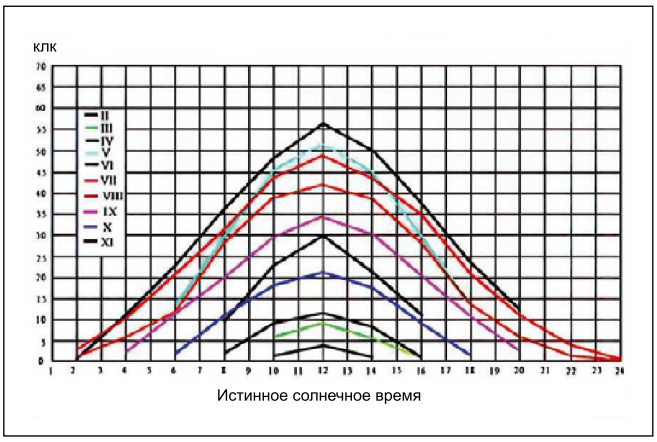


Рис. 3. Суточный ход суммарной естественной освещённости на горизонтальной поверхности (среднемесячные значения)

На накладной (подвижной) части прибора нанесена центральная точка «О», прикрепляемая к центральной точке «О» основной (неподвижной) его части и при производстве расчёта вращающаяся по оси, проходящей через точки «О».

Центральная точка «О», совмещается с инсолируемым объектом, и при этом проходящая через неё прямая фасадная линия с надписями «Нормаль. пл.» (слева от центральной точки в конце фасадной линии) и «Горизонт. пл.» (справа от центральной точки в конце фасадной линии), а также перпендикуляр к ней «вертикальная плоскость» (снизу от центральной точки) позволяют производить подсчёт прихода суммарной радиации на соответствующие нормальные, горизонтальные и вертикальные плоскости, выраженной в сотнях Вт/м² в период инсоляции или в конкретные часы, определяемые основной частью светопланографа.

Сверху (с одной стороны) фасадной линии накладной части вырезана криволинейная граница инсоляции помещения через окна, имеющая сторонний угол в 15°. Снизу фасадной линии нанесены криволинейные границы инсоляции помещений через окна, имеющие сторонние углы в 10, 20, 30, 45 и 60 °, предназначенные для установления инсоляционного угла окна и определения прихода соответствующей солнечной радиации на плоскость окна при разной толщине наружных стен.

При решении инсоляционных задач предварительно устанавливают ориентацию здания или участка застройки по сторонам света и высоту затеняющего соседствующего объекта, в соответствии с которой подбирают номер прибора по масштабу чертежа и высоте затеняющего объекта.

При определении продолжительности инсоляции фасада здания и помещения центральная точка «О» прибора накладывается на линию фасада инсолируемого здания, ориентируя основную часть прибора к северу. При этом продолжительность инсоляции фасада определяется основной частью по ходу солнца на необходимые месяцы,

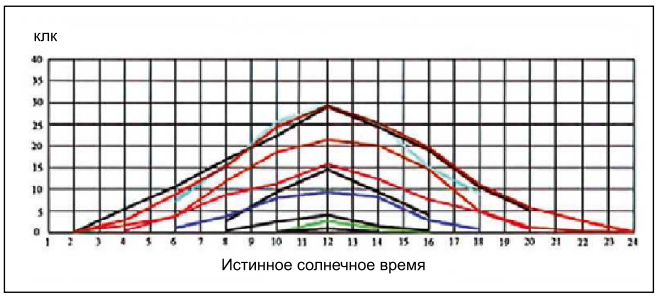


Рис. 4. Суточный ход прямой естественной освещённости на горизонтальной поверхности по месяцам года (среднемесячные значения) *Обозначения линий по рис. 3*

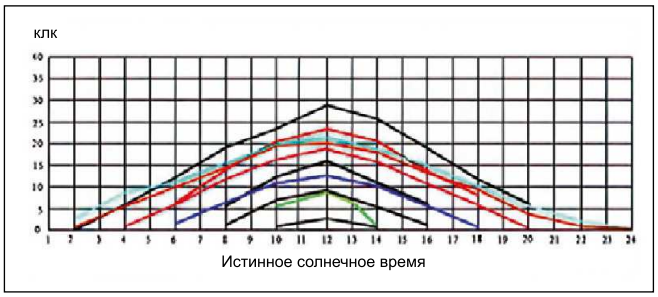


Рис. 5. Суточный ход рассеянной естественной освещённости на горизонтальной поверхности по месяцам года (среднемесячные значения) *Обозначения линий по рис. 3*

а продолжительности инсоляции помещений определяют в пределах инсоляционного угла окна, прикладывая накладную часть к основной.

Зависимости среднемесячных уровней солнечной радиации и её УФ составляющей от высоты стояния Солнца, основанные на метеорологических данных АЗРФ, приведены на рис. 2. На внешнем круге в конце радиальных линий отмечены месяцы года. Указанные уровни радиации в зависимости от высоты стояния Солнца изображены в виде разноцветных кривых и соответствующих им цветовых цифровых координат.

Эти зависимости используются в нормировании режима инсоляции с выявлением «УФ эффекта», светоклиматической паспортизации, решении энергетических вопросов обеспечения теплом зданий с использованием энергии солнца, формообразовании зданий, объёмно-планировочных и конструктивных решениях зданий и сооружений, а также в методиках теплофизических и светотехнических расчётов.

При проектировании планировки помещений зданий и морфозастройки в обязательном порядке учитывается естественная освещённость, создающая санитарно-гигиенический комфорт в жизни человека, который, в свою очередь, зависит от уровня яркости небосвода, количества отражённого света, величины световых проёмов и их ориентации, глубины помещения. Главенствующим при этом является яркость небосвода, т.е. уровень наружной освещённости.

Для решения проблемы формирования уровней естественной освещённости в дневное время, которая непосредственно затрагивает важнейшие аспекты проектирования зданий и сооружений, городов и населённых пунктов, разработки стандартов в архитектуре и строительстве, создания оптимальных по комфортности и экономичности строений различного типа, составлены графики суточного хода суммарной, прямой и рассеянной освещённостей от солнца на горизонтальной поверхности при безоблачном небе и средней (0,73) прозрачности атмосферы (рис. 3–5).

Суммарная освещённость зависит от тех же факторов, что и составляющие её прямая и рассеянная освещённости. Поскольку малая прозрачность атмосферы прямую освещённость уменьшает, а рассеянную увеличивает, то на суммарной освещённости это практически не отражается. Суммарная освещённость зависит от высоты стояния солнца. Её максимум в летние месяцы достаточно велик: до 55 клк и более при высоте стояния солнца 40–45 °.

Приведённые на рис. 2–5 графики являются приложением к светопланографу и используются совместно с ним при определении продолжительности инсоляции с выявлением уровня солнечной радиации, «УФ эффекта» и уровней суммарной, прямой и рассеянной естественных освещённостей в период инсоляции, а также являются составной частью светоклиматического паспорта географического района.

Результаты

Представленный светопланограф рекомендуется для широкого применения в практике градостроительного проектирования городов и населённых пунктов территории Арктической зоны для прогнозирования инсо-светоклиматического режима в пределах географических широт от 65 до 70 ° с.ш. Прилагаемые к светопланографу графические построения по рис. 3–5 восполняют пробел в проектировании качественного биологического и количественного светового и теплового воздействий солнечной энергии, вносимой в помещения и на территорию городской застройки.

Светопланографом определяется инсоляция и её воздействие на горизонтальные и вертикальные плоскости, затеняемые солнцезащитными устройствами, навесами, балконами, лоджиями и соседствующими зданиями.

Критерии оценки показателей инсоляционного режима, определяемые светопланографом, следующие: продолжительность инсоляции, время и площадь; продолжительность теплового воздействия инсоляции, время, площадь и количество; продолжительность УФ воздействия инсоляции, время и площадь; различия условий инсоляции и естественного освещения; светотеневое решение территории.

Область практического применения светопланографа в проектировании зданий и сооружений включает: определение продолжительности инсоляции помещений и территории застройки; выбор расположения и ориентации зданий на участке; определение оптимального санитарного разрыва между зданиями; выбор конструкции окон и фонарей, покрытий атриумов; выявление сектора допустимой ориентации окон квартиры; определение времени использования естественного освещения в помещениях; выбор рода освещения – естественное, искусственное или совмещённое; выбор облицовки и отделки фасадов, цветовое решение интерьера и экстерьера; определение сектора благоприятной ориентации и угла наклона гелиоколлекторов, предусматриваемых на стенах и крышах зданий; оптимизация ориентации помещений по сторонам света для пассивного использования энергии солнца; построение инсоляционной карты придомовой террито-

рии зданий с выявлением зоны инсоляции путём построения изолиний.

Обсуждение

Преимущество ручного способа прогнозирования и оценки инсоляционного режима с использованием светопланографа заключается в одновременном оценивании качественно (в часах) и количественно (в Вт/м^2) уровней солнечной радиации, УФ воздействия и освещённости (в клк) в инсолируемом объекте с выявлением светотени одновременно и непосредственно на планировочной схеме разноэтажной городской застройки.

Используя данною методику моделирования инсоляционного режима с применением астрономических данных, можно конструировать светопланографы для других географических широт (с целью комплексного решения задач по инсоляции и освещению).

Научная ценность данной работы заключается в разработке нового инструмента и методики его применения, отличающихся комплексностью критерия оценки показателей инсоляционного и светового режимов в решении проектно-изыскательских задач.

Практическая полезность светопланографа состоит в его широкой применимости в решении связанных с учётом излучения солнца задач проектирования зданий и сооружений и планирования городских территорий без дополнительных трудозатрат, что значительно упрощает работу проектировщиков.

Достоинство светопланографа заключается и в том, что он позволяет производить критериальную оценку достаточности освещения помещений зданий по зрительной работоспособности и психологическим факторам. Этот важный вопрос связан с формированием архитектурного образа зданий в северных регионах, его комфортностью. Поэтому использование светопланографа в проектирования экологичного и экономичного жилища и определении плотности городской застройки современными многоэтажными и высотными зданиями имеет практическое значение.

При помощи светопланографа планшетного типа и графиков суммарных, прямых и рассеянных составляющих солнечного тепла и света можно проводить комплексные исследования и решать характерные практические приоритетные задачи по инсоляции, естественному освещению, цветовому решению интерьера и экстерьера, пластике фасадов и зрительной работоспособности в свето-цветовой среде зданий.

Заключение

В итоге следует отметить, что светопланограф, моделирующий инсоляционную среду в области видимого хода солнца, является простым и практичным прибором, позволяющим проектировщику прогнозировать и оценивать качества объёмно-планировочного и пространственного решения зданий разной высоты и их комплексов с учётом инсо-светоклиматического режима района строительства. Данный прибор также позволяет производить целенаправленный поиск путей повышения архитектурной выразительности пространства и форм интерьера и экстерьера вписыванием их в конкретные светоклиматические условия.

Представленные конструкция и методика применения светопланографа апробированы в проектировании зданий и сооружений и планировании городских территорий в учебной практике студентов, магистрантов и аспирантов архитектурно-строительных вузов, и прибор рекомендуется для осуществления реальных градостроительных проектно-изыскательских и практических разработок.

Конструкция светопланографа и прилагаемые графики суточного хода уровня солнечной радиации (Вт/м^2) и солнечного света (клк) составляют часть графического комплекта светоклиматического паспорта территории Арктической зоны, который рекомендуется для решения проектно-изыскательских задач в планировании городских территорий, разработке генеральных планов, детальной планировке застроек и кварталов, проектировании зданий и сооружений урбанизированных территорий.

Светопланограф имеет широкий спектр географического применения, может быть использован для оценки и расчёта инсоляционного режима зданий, городской застройки и территорий как севера России, так и севера США, Канады и северной Европы.

Благодарность

Работа проведена в соответствии с планом научно-исследовательской работы кафедры «Проектирование зданий и сооружений» НИУ МГСУ по проблеме «Функция, конструкция, среда в архитектуре зданий и городов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 131.13330.2018 «Строительная климатология».

2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, части 1–6. –Л.: Гидрометеоиздат. – 1988. – 316 с.

3. Отчёт о научно-исследовательской работе по теме «Разработка подпрограммы государственной программы Российской федерации «Экономическое и социальное развитие Арктической зоны Российской Федерации на2011–2020 годы» в Республике Саха(Якутия)».

4. *Ефремов А.А.* О существующих подходах к районированию северных территории России / Материалы всероссийской конференции «Стратегия развития северных районов России». –Архангельск: Архангельский филиал Института экономики УрО РАН, 2003. с. 48–57.

5. *Пилясов А.Н.* Контуры стратегии развития Арктической зоны России // Арктика: Экология и экономика. 2011, № 1, с. 38–47.

6. *АгаджанянН.А., Смирнов В.М.* Нормальная физиология. –М.: Изд-во Рудн, 2003, 116с.

7. *Бахарев Д. В.* О нормировании и расчёте инсоляции / Д.В. Бахарев. – Л.: Н. Орлова // Светотехника. 2006 № 1. с. 18–27.

8. *Дунаев Б.А.* Инсоляция жилища. –М.: 1980. 65с.

9. *Оболенский Н.В.* Архитектура и солнце. М.: Стройиздат, 1988. 207с.

10. *Масленников Д.С.* Графические исследование норм инсоляции, принятых в СССР и других Европейских государствах. Исследование по микроклимату и шумовому режиму населённых мест. Сборник 3. – М.: Стройиздат, 1965, с. 5–19.

11. *Творовский М.* Солнце в архитектуре (пер.с польского). –М.: Стройиздат, 1977. –288с.

12. *Olgyay V, Olgyay A.* Solar control and shading devices. Princeton university Press. Prinseten, New Jersey, 1957. –325p.

13. *Гиясов А.И.* Значение инсоляционного планшета для оценки инсоляционного режима городских территорий и зданий // Светотехника. – 2018. – № 5. – С. 68–71.

14. *Хейфец А.Л.* Расчёт продолжительности инсоляции средствами 3D-моделирования пакета AutoCAD: сб. науч. тр. –Вып. 7. – Екатеринбург, 2004. 367 с.

15. СИТИС: Солярис 5.20. Расчёт инсоляции, КЕО и шума. Руководство пользователя.

16. DIN5034–1:2005–02–16. Daylight in interiors -Part 1: General requirements.

17. BS8206–2:2008. Lighting for buildings.Code of practice for daylighting.

18. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076–01. Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащите помещений жилых и общественных зданий и территорий: введ. в действ.

19. СанПиН 2.1.2.2645–10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях.

20. СП 372.1325800.2018 Здания жилые многоквартирные.

21. СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения.

22. СП 370.1325800.2017 Устройства солнцезащитные зданий. -М.: Стандартинформ, 2018.

23. *Эрисман Ф.Ф.* Курс гигиены. Т. 2. – М.: Типография А.А. Карцева, 1887. – 402 с.

24. Научно-прикладной справочник по климату России (арктический регион): Солнечная радиация. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1997. – 238 с.

25. Краткий климатический справочник по странам мира. Под ред. Борисенкова Е.П. –Л.: Гидрометеоиздат, 1984. –240с.

26.Surface meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site (release 6.0) // https://eo-sweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@ larc.nasa.gov.

27. *Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г.* и др. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. –М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 83 с.

Гиясов Адхам Иминжанович, *доктор техн. наук, профессор. Окончил в 1975 г. Таджикский политехнический институт. Профессор кафедры «Проектирование зданий и сооружений» НИУ МГСУ. Область научных интересов – энергоэффективные здания, архитектурно-строительная физика, инсоляция, аэродинамика, градоэкология*

Cree, Inc. продаст светодиодный бизнес компании *SMART Global Holdings, Inc.*

Дарем, Северная Каролина – *Cree, Inc.* сегодня (20.10.2020) объявила, что Компания заключила окончательное соглашение о продаже своего подразделения светодиодных продуктов (*Cree LED*) компании *SMART Global Holdings, Inc.* (*SGH*) за сумму до $300 млн включая фиксированные авансовые и отсроченные платежи и условное вознаграждение.

В соответствии с условиями соглашения, которое было одобрено советом директоров компании, *Cree* ожидает получить первоначальный денежный платёж в размере $50 млн при закрытии и $125 млн которые должны быть выплачены после погашения векселя продавца, выпущенного *SGH* для *Cree*, со сроком погашения в августе. 2023. *Cree* также может рассчитывать на выплату в размере до $125 млн зависящую от выручки и валовой прибыли *Cree LED* в течение первых полных четырёх кварталов после завершения сделки, с выплатой этой суммы также выплачиваемых в форме векселя с трёхлетним сроком погашения.

«Мы рады объявить о продаже нашего бизнеса светодиодных продуктов компании *SGH*, что представляет собой ещё одну ключевую веху в нашем трансформационном пути к созданию глобального полупроводникового центра, работающего в чистом виде», – сказал гендиректор *Cree* Г. Лоу. – «Эта сделка даёт нам уникальную возможность с чёткой стратегической направленностью на то, чтобы возглавить переход отрасли от кремния к карбиду кремния и ещё больше укрепить наше финансовое положение, что поддержит дальнейшие инвестиции для извлечения выгоды из многолетних возможностей роста в электромобилях, *5G* и промышленных приложениях. *SGH* имеет сильную платформу и солидный послужной список успешного приобретения и интеграции технологических предприятий».

Cree LED имеет один из широчайших в мире портфелей высокоэффективных СД кристаллов и готовых изделий и представляет собой один из самых сильных брендов в СД отрасли, а *SGH* – мировой лидер в области специализированных решений для памяти, хранения и высокопроизводительных вычислений, которые уже более 30 лет обслуживают электронную промышленность. Используя разнообразную клиентскую базу *SGH* и глобальные операции, *Cree LED* будет иметь хорошие возможности и дальше поставлять лучшие в отрасли продукты.

«Мы очень рады приветствовать *Cree LED* в семье *SGH*», – сказал М. Адамс, президент и генеральный директор *SGH*. – «Как лидер в области освещения светодиодами, с уважаемым брендом и обширным портфелем патентов, *Cree* имеет послужной список предоставления лучших в своём классе решений, и я очень рад тем возможностям, которые открываются перед *Cree LED* с её частью в портфеле продуктов *SMART*».

Сделка требует необходимых разрешений регулирующих органов и соблюдения обычных условий закрытия, и её планируется завершить в первом квартале 2021 г. После закрытия сделки *SGH* получит лицензию и включит торговую марку *Cree LED* в свой портфель.

ledinside.com
20.10.2020

ВНИСИ представил первую редакцию стандарта ГОСТ «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний»

ВНИСИ им. С.И. Вавилова разработана и представлена на публичное рассмотрение первая редакция проекта межгосударственного стандарта ГОСТ «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний».

Одним из основных нормативных документов, содержащим требования к светотехническим характеристикам осветительных приборов для внутреннего и наружного освещения сегодня является национальный стандарт ГОСТ Р 54350–2015 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний», который является ссылочным для большинства отраслевых и ведомственных стандартов.

Однако динамичное развитие осветительного приборостроения, главным образом, с СД источниками света, и связанные с ними метрологические задачи требуют актуализации ГОСТ Р 54350–2015, как с точки зрения набора технических требований и их значений, так и методов и инструментов для их контроля.

В этой связи ВНИСИ была разработана первая редакция проекта Межгосударственного стандарта, устанавливающего с учётом текущего развития технологий и эффективности применения светодиодов светотехнические характеристики и методы их испытаний.

Кроме того, ВНИСИ представил первую редакцию национального стандарта ГОСТ Р «Освещение искусственное. Метод определения коэффициента эксплуатации», которая также находится в настоящее время на стадии публичного рассмотрения.

Срок публичного рассмотрения указанных редакций проектов стандартов – до 1 марта 2021 года, ознакомиться с ними можно на сайте ВНИСИ.

Новая энергоэффективная система управления освещением с учётом изменения естественной освещённости в помещении: проектирование и внедрение[1]

М. АЯЗ[1, 1], У. ЮСЕЛ[2], К. ЭРХАН[3], Э. ОЗДЕМИР[4]

[1]Университет Коджаэли, факультет электротехники и энергетики, Коджаэли, Турция
[2]Университет Коджаэли, факультет механики, Коджаэли, Турция
[3]Международный центр исследований и разработок Альвади, Стамбул, Турция
[4]Университет Коджаэли, факультет проектирования энергетических систем, Коджаэли, Турция
E-mail: [1]murat.ayaz@kocaeli.edu.tr

Аннотация

В этом исследовании предлагается проектирование и внедрение новой рентабельной системы управления освещением с учётом естественной освещённости для обеспечения энергосбережения в общественном здании, в котором уже установлена обычная система управления освещением. Для анализа энергопотребления были измерены коэффициенты использования естественной освещённости во всех внутренних помещениях, в которых планировалось применение предлагаемой в исследовании системы управления освещением. Плотность потока солнечного излучения непрерывно передаётся в систему управления через пиранометр, размещённый снаружи, и потребность в искусственном освещении рассчитывается с использованием секционных коэффициентов использования естественного освещения. Таким образом, обеспечивается максимальный вклад солнечного света в освещённость внутри помещения при сокращении избыточного энергопотребления искусственного освещения. Результаты экспериментальных измерений показывают, что предлагаемая система управления освещением с учётом естественной освещённости обеспечивает среднюю энергоэффективность здания на уровне 60 %. В статье также подробно обсуждаются необходимые инвестиции, в которые входят как эксплуатационные затраты, так и сроки окупаемости для модернизации существующей осветительной установки и системы управления освещением в рекомендуемые. Анализ расчёта сроков окупаемости показал, что рекомендуемая система освещения имеет срок окупаемости на 5 лет меньше, чем обычная.

[1] Перевод с англ. Т.В. Мешковой

Ключевые слова: энергоэффективные здания, управление естественным освещением, система управления освещением, энергоэффективность, энергосбережение, рентабельные системы, проектирование систем автоматизации.

1. Введение

Повышение качества жизни требует охраны окружающей среды и эффективного использования природных ресурсов. Достижение энергоэффективности путём применения новых технологий в освещении имеет важное значение не только для снижения энергопотребления, но и для обеспечения экологической и экономической устойчивости [1, 2]. Энергия, затрачиваемая на освещение зданий, составляет значительную часть энергопотребления. Электрическое освещение покрывает 19 % от общего объёма производства электроэнергии в мире [3]. Коммерческие и офисные здания относятся к группе зданий с высоким энергопотреблением. При этом 14 % от общего потребления электроэнергии в коммерческих зданиях расходуется на освещение, а 11 % энергии используется для освещения и мелкой бытовой техники в домах [4, 5]. В абсолютных величинах энергопотребление на цели освещения ежегодно составляет от 100 до 1000 кВт·ч/м^2 в зависимости от расположения офисных зданий, используемого оборудования, рабочего времени, использования вентиляции и типа освещения. Примерно 40 % от общего объёма электроэнергии, потребляемой в офисных зданиях, используется для освещения [6–8].

Новые материалы и системы необходимы для достижения комфортного и эффективного с точки зрения потребления энергии освещения [9, 10]. При использовании энергосберегающих ламп 40 % экономии энергии достигается за счёт использования комбинации искусственного освещения с датчиками присутствия и отсутствия, а также при учёте естественной освещённости [11–13]. Быстрое развитие технологий обнаружения и микроконтроллеров позволило разработать и использовать эффективные энергосберегающие системы управления освещением, построенные на новых интеллектуальных платформах. Управление искусственным освещением стандартизирует уровень комфортного освещения для пользователя при одновременном снижении энергопотребления [14–19]. В качестве инструмента управления можно использовать открытую или замкнутую систему управления освещением [20]. В исследовании, проведённом Чиу и др., была создана замкнутая система управления освещением с осветительной установкой со светодиодами, которая работала автономно на основе данных, полученных от датчиков освещённости. Световой поток светильника регулировался за счёт амплитудной модуляции в зависимости от полученных данных об освещённости с датчика. Система сэкономила 55 % энергии при непрерывном использовании в условиях испытаний. Кроме того, рассмотренная система управления экономически более выгодна на 31,52 % по сравнению с системой с ручным управлением вкл./выкл. [14]. В другом исследовании коллектив под руководством Сахана разработал систему управления с учётом естественной освещённости с использованием датчика светозависимого сопротивления и пассивным инфракрасным датчиком. В разработанной системе, когда ни в одном помещении нет пользователя или если уровень освещённости при естественном освещении достаточен, искусственное освещение отключается и потребление электроэнергии, таким образом, снижается. Управление искусственным освещением осуществлялось путём определения различных уровней опорного напряжения для диапазона времени работы естественного освещения в зависимости от сезонных изменений. Недорогой контроллер с интегрированными обоими датчиками был установлен в небольшом помещении для управления освеще-

Рис. 1. Объект исследования

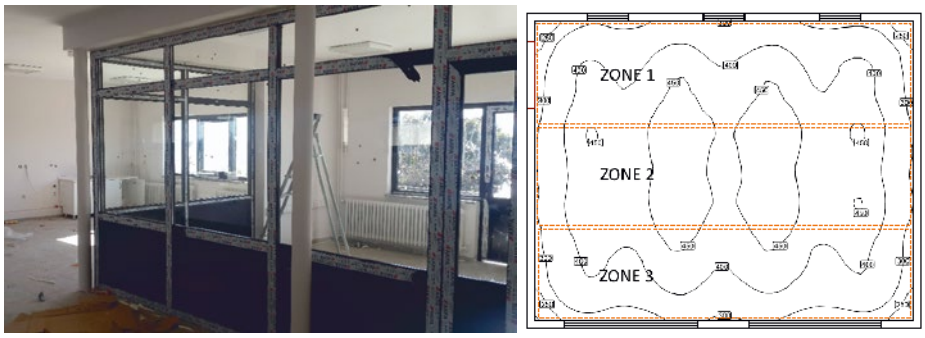


Рис. 2. Общий вид лаборатории материалов (*а*) и изолинии освещённости на рабочей плоскости (*б*)

нием, где система показала высокую эффективность работы [16]. Как и во всех вышеупомянутых работах, Дун провёл исследование, направленное на оптимизацию системы интеллектуального управления освещением и снижение энергопотребления в университетском классе. В исследовании использовался алгоритм управления эталонной адаптивной системой нечёткой модели. Было обнаружено, что этот алгоритм обладает лучшими характеристиками управления, более высокой точностью установившегося режима, более низкой частотой перегрузок и более высокой скоростью отклика, чем типичные нечёткие контроллеры, используемые в настоящее время [18]. В другом исследовании, посвящённом управлению освещением в таких же классах, для повышения энергоэффективности была предложена система управления освещением, основанная на технологии машинного зрения. Было обнаружено, что различное количество сигналов позволяет комплексно контролировать уровень освещённости, создаваемой светильниками в классе, и при этом экономить электроэнергию, расходуемую на работу осветительной установки [19].

За счёт использования естественного освещения можно сэкономить общее энергопотребление, расходуемое на освещение, а также обеспечить высокий световой поток, низкое тепловыделение по сравнению с высоким уровнем освещённости, защитить окружающую среду, улучшить качество визуального восприятия объектов по сравнению с искусственным освещением, снизить стресс и повысить эффективность работы сотрудников на местах [15, 21–24]. Согласно литературному обзору, можно сделать вывод, что от 20 до 60 % энергопотребления, затрачиваемого на цели освещения, можно сэкономить при использовании систем управления, которые учитывают естественное освещение [25]. Исследование, проведённое Пандхарипанде и др., направлено на обеспечение комфортного освещения при энергосбережении в офисе за счёт оптимизации работы искусственных источников света с учётом изменения естественного освещения. В работе также предлагается использовать датчики, которые будут ориентированы на сбор информации об освещении конкретного места пользователя, вместо тех, которые использовались вместе с осветительной установкой. Если датчики расположены на уровне пользователя, то уровень освещённости измеряется на 10 % ниже и, следовательно, энергопотребление возрастает. Если вклад естественной освещённости в офисных помещениях превышает 25 %, то видно, что система управления должна отключить осветительную установку для снижения избыточного уровня освещённости рабочих поверхностей [26]. В исследовании, проведённом Тангом и др., система управления на основе учёта естественного освещения интегрируется в систему умного дома и управляется с помощью смартфона. Уровень освещённости помещения с тремя светильниками измеряется с помощью приложения в смартфоне, световой поток светильников управляется амплитудной модуляцией с помощью процессора *Ардуино*, а *Raspberry Pi* используется для подключения системы к редактору мобильных приложений. Таким образом, 54,7 % экономии энергопотребления достигается в солнечные дни [27]. В другом исследовании системы управления с учётом естественного освещения Мейкайвил и др. используют датчик освещённости, который выдаёт информацию о локальном уровне освещённости под каждым светильником в открытом пространстве офиса, и датчик присутствия. Для регулировки уровня диммирования светильников используется управляющее устройство. Согласно показаниям датчиков освещённости, система запрограммирована на достижение нормируемого уровня освещённости для рабочих зон и неиспользуемых зон с помощью ПИ-контроля. Применяются два сценария. В первом сценарии каждый контроллер работает независимо, и оказывается, что желаемое нормируемое значение не может быть достигнуто в каждом конкретном случае. Контрольное значение освещения фиксируется через ПИ-контроллеры в сети, при этом достигается высокая экономия потребляемой энергии [28].

В данном исследовании рассматривается экономия энергии, которая может быть достигнута с помощью системы управления, основанной на использовании естественного освещения для здания с обычной системой управления, а также сроки окупаемости стоимости новой установки. Секции (зоны освещения) и коэффициенты использования естественной

освещённости определяются путём измерений естественной освещённости во всех внутренних помещениях здания в течение указанного времени. Рекомендуемая осветительная установка, составляющие системы управления и алгоритм управления были сформированы на основе анализа выделенных зон освещения. Результаты, полученные в ходе экспериментальных измерений и анализа полученных данных, подробно описаны в заключении.

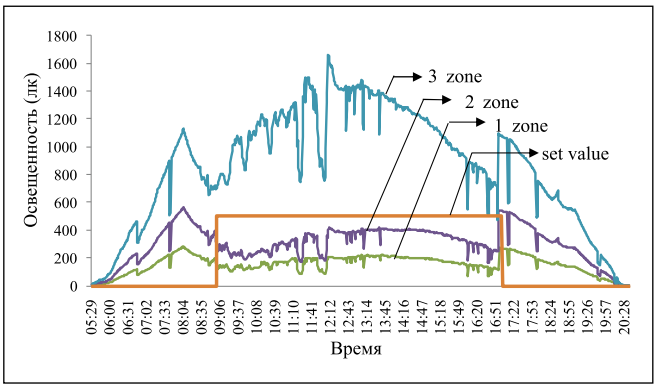


Рис. 3. Вклад естественной освещённости в освещённость рабочей плоскости в лаборатории материалов в рабочее время

2. Экспериментальные методы

2.1. Объект исследования

Здание, в котором будет установлена система управления на основе учёта естественного освещения, состоит из 10 независимых лабораторий и офисов. Его общая крытая площадь составляет 641 м^2. В здании, представленном на рис. 1, лаборатории расположены в подвальном помещении, а офисы – на первом этаже. Осветительная установка для офисов и лабораторий состоит из 75 светильников (4×18 Вт) с люминесцентными лампами, используемыми с управлением вкл./выкл. Мгновенная потребляемая мощность составляет 5,4 к·Вт, а расход энергии на освещение за 8-часовую смену – 43,2 кВт·ч.

2.2. Измерение естественного освещения

Измерения проводятся в течение трёх месяцев для определения коэффициентов использования естественной освещённости в рабочее время во всех внутренних помещениях здания. Далее на основе полученных измерений были выделены зоны освещения в каждом из обследуемых помещений. Для 10 внутренних помещений были определены 26 зон освещения. Ниже подробно описаны измерения для лаборатории материалов.

В лаборатории материалов, представленной на рис. 2, осветительная установка состоит из 16 растровых светильников с люминесцентными лампами (4×18 Вт). Кроме того, лаборатория имеет площадь окна 7,56 м^2, благодаря чему естественное освещение может дать значительный вклад в освещённость рабочих поверхностей. Площадь разделена на 3 зоны, учитывая расположение светильников и распределение естественной освещённости. Первая зона самая дальняя от окон, в ней установлены 4 светильника общей мощностью 288 Вт. Третья зона находится ближе всего к окну, а общая мощность осветительной установки в этой зоне составляет 288 Вт. Во второй зоне установлено 8 светильников, потребляемая мощность которых составляет 576 Вт.

Влияние естественной освещённости на общую освещённость в трёх рассматриваемых зонах лаборатории материалов в период с 09:00 до 17:00 часов работы представлено на рис. 3. Нормируемый уровень освещённости на рабочей плоскости в лаборатории составляет 500 лк, поэтому это значение в исследовании берётся за контрольное. В связи с этим коэффициент использования естественной освещённости и потребность в искусственном освещении уточняются путём сравнения значения естественной освещённости в зонах без искусственного освещения с контрольным значением. Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что естественное освещение создаёт освещённость на уровне 36 % от контрольного значения в первой зоне, на уровне 64 % во второй зоне и на уровне 100 % в третьей зоне. Общее энергопотребление на цели освещения в первой зоне в рабочее время составляет 2304 Вт·ч. При этом 830 Вт·ч из этой величины может быть покрыто естественным освещением, а 1474 Вт·ч энергопотребления должно обеспечиваться с помощью подачи электроэнергии через сеть. Во второй зоне 3000 Вт·ч из общего энергопотребления 4608 Вт·ч обеспечиваются естественным освещением, а 1608 Вт·ч – через сеть. В третьей зоне искусственное освещение не требуется вовсе из-за высокого уровня естественной освещённости в указанное время.

3. Система управления освещением с учётом изменения естественной освещённости

3.1. Автоматическая система управления на основе учёта изменения естественного освещения

В системах управления освещением, основанных на использовании естественного освещения, правильное измерение или расчёт его влияния на общую освещённость в помещении имеет большое значение для управления искусственным освещением. В этом контексте наиболее часто используется метод замкнутых управляемых структур. В таких системах датчики размещаются в каждом специально отведённом помещении для мгновенной передачи уровня освещённости в систему управления. Хотя использование нескольких датчиков позволяет осуществлять более простое и корректное управление, возникает серьёзный недостаток в виде стоимости такой установки. Кроме того, необходимость проведения регулярной проверки и калибровки каждого датчика приводит к увеличению эксплуатационных расходов. Так срок окупаемости подобного мероприятия может быть сокращён за счёт снижения монтажных и эксплуатационных затрат при установке разомкнутой регулируемой системы управления освещением. Кроме того, преобразование обычных систем управления освещением в систему управления, автоматически настроенную в зависимости от изменения естественного освещения, может быть достигнуто с меньшим количеством компонентов с помощью управления с разомкнутым контуром.

В этом исследовании предлагаемая система управления на основе изменения естественного освещения состоит

Таблица 1

Напряжение, применяемое для достижения контрольного значения освещённости на рабочей поверхности в лаборатории «Индустрия 4.0»

Ест. осв-ть снаружи здания (клк)	Ест. осв-ть в зонах осв. (лк)			Необходимая осв-ть от иск. осв. (лк)		
	1 зона	2 зона	3 зона	1 зона	2 зона	3 зона
0–0,2	0	0	0	500	500	500
0,2–0,9	8	15	50	492	485	450
0,9–1,9	31	55	141	469	445	359
1,9–2,9	39	75	220	461	425	280
2,9–3,9	66	124	310	434	376	190
3,9–4,8	80	151	353	420	349	147
4,8–5,7	125	236	499	375	264	1
5,7–6,9	140	271	602	360	229	0
6,9–8,8	165	295	850	335	205	0
8,8–9,7	171	308	974	329	192	0
9,7–10,9	183	328	1136	317	172	0
10,9–11,9	197	357	1220	303	143	0
11,9–19,0	298	519	1410	202	0	0
19,0–55,4	310	535	1500	190	0	0
55,4–69,7	325	597	1623	175	0	0
69,7–78,7	338	622	1652	162	0	0
78,7–83,7	383	710	1826	117	0	0
83,7–100,0	444	820	1948	56	0	0
100,0–120,0	490	944	2183	10	0	0

из разомкнутой структуры управления, а блок-схема управления приведена на рис. 4. В рекомендуемой системе управления значение солнечного излучения передаётся в систему управления мгновенно с помощью пирометра, расположенного снаружи. Коэффициент использования естественной освещённости (процентное соотношение вклада естественного освещения в общую освещённость рабочей плоскости) в каждой обозначенной внутренней зоне определяется с помощью экспериментальных измерений. Потребность в искусственном освещении рассчитывается для каждой зоны путём оценки мгновенного значения естественной освещённости.

Контроллер рассчитывает количество искусственного освещения для зон, в которых недостаточно естественной освещённости для достижения контрольного значения. Требуемое номинальное напряжение в светильниках определяется из расчёта достижения контрольного значения освещённости при естественном и искусственном освещении. Рекомендуемая система управления освещением установлена в лаборатории «Индустрия 4.0». Существующая осветительная установка состоит из 6 светильников с люминесцентными лампами типа T8 (4×18 Вт), которая демонтируется, и вместо неё устанавливаются также 6 светильников со светодиодами фирмы *Ledova* 35 Вт. Светильники имеют групповое попарное включение в зависимости от удаления от окон, являющихся источником естественного освещения. Таким образом, формируются три параллельных окнам линии светильников с групповым включением на месте существующих. Значение аналогового напряжения (0–5) В, полученное от пиранометра, передаётся в систему через интеллектуальных шкаф управления по *PLC S*7–1200, который представлен на рис. 5. Для измерения солнечного излучения используется один пиранометр. *PLC* управление светильниками осуществляется в диапазоне (0–10) В в соответствии с созданным алгоритмом путём расчёта количества необходимого искусственного освещения, исходя из вклада естественного освещения. С помощью анализатора измеряются суммарные значения тока, напряжения и мощности сети в каждой линии. Измеренные значения передаются от анализатора к *PLC*-контроллеру через *Ethernet*. Все измеренные значения также представлены на панели шкафа и могут быть сохранены на карте памяти. Кроме того, к системе можно получить доступ и внеси изменения через интернет.

Измерения должны проводиться как можно более линейно для получения коэффициентов использования естественной освещённости в каждой зоне освещения лаборатории «Индустрии 4.0». Зональные коэффициенты могут быть рассчитаны исходя из времени, а также рассчитаны с учётом

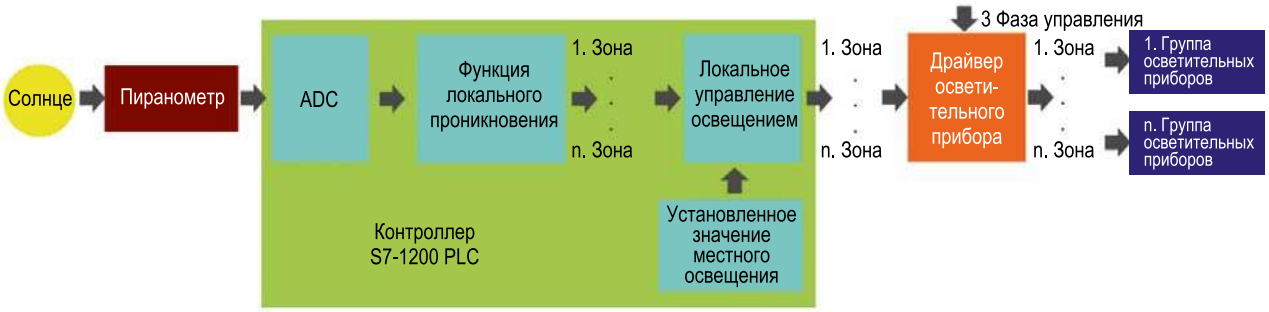


Рис. 4. Блок-схема автоматической системы управления освещением

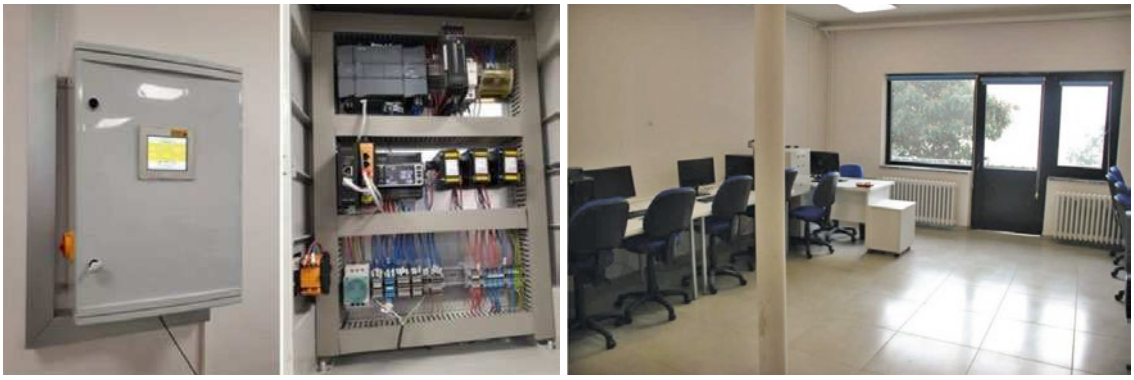


Рис. 5. Панель управления шкафа S7–1200 и общий вид лаборатории «Индустрия 4.0»

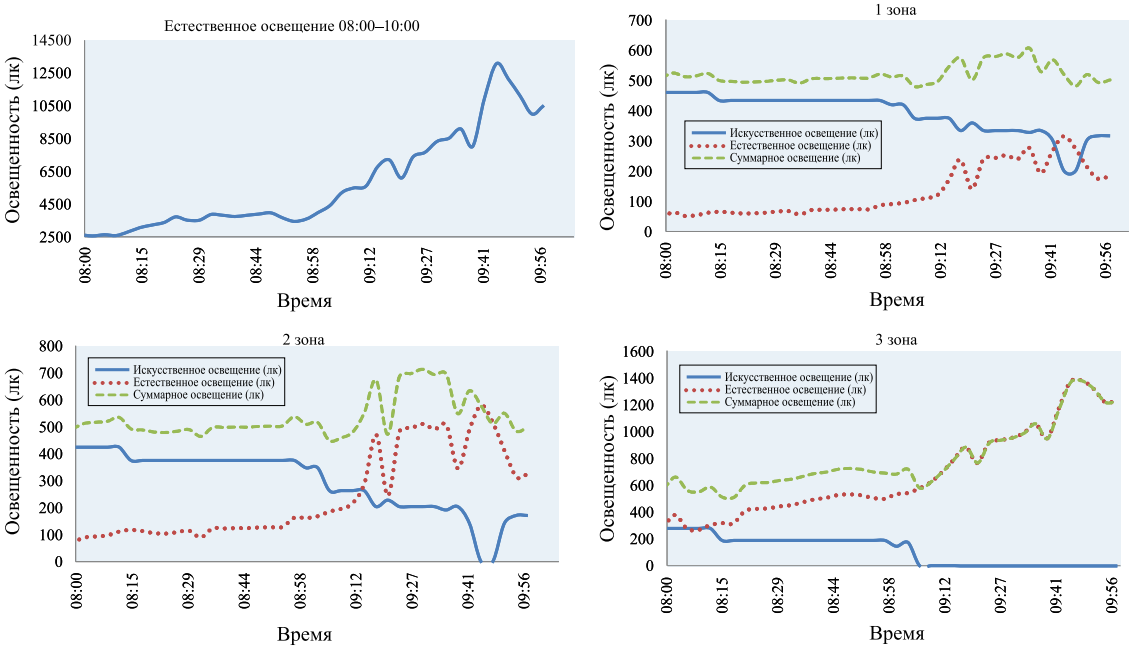


Рис. 6. Освещённость с 08:00 до 10:00

вклада естественной освещённости. В данном исследовании коэффициенты определяются с учётом влияния естественного освещения на освещённость в зонах освещения. Измеренные значения классифицируются в соответствии с первой зоной, где естественное освещение оказывает наименьшее влияние, и определяются номинальные напряжения светильников в соответствии с потребностями в искусственном освещении зон. Количество уровней напряжения получилось большим для того, чтобы как можно более плавно изменять уровень освещённости для предотвращения резких перепадов и снижения зрительной утомляемости. Плавное диммирование используется как для повышения, так и для снижения уровня освещённости, создаваемого искусственными источниками света. В табл. 1 приведены выделенные группы уровней освещённости, количество зон в зависимости от вклада естественной освещённости, количество искусственного освещения, необходимого для этих зон и номинальное аналоговое напряжение, которое контроллер должен подать на светильники для достижения контрольного значения.

3.2. Экспериментальные характеристики автоматизированной системы управления естественным освещением

Рекомендуемая система управления освещением работает в соответствии с коэффициентами использования естественного освещения, указанными

Таблица 2

Сравнение разработанной системы, основанной на использовании естественного освещения с системой управления вкл./выкл.

№	Системы	1 зона Энергопотребление (Вт·ч)	2 зона Энергопотребление (Вт·ч)	3 зона Энергопотребление (Вт·ч)	Всего Энергопотребление (Вт·ч)
1	Система вкл./выкл. с люминесцентными лампами	1152	1152	1152	3456
2	Система вкл./выкл. со светильниками со светодиодами	560	560	560	1680
3	Система управления на основе учёта ест. осв. со светильниками со светодиодами	375	218	95	688
4	Сравнение существующей системы вкл./выкл. со светильниками с люминесцентными лампами и со светодиодами	48 %	48 %	48 %	48 %
5	Сравнение системы вкл./выкл. со светильниками со светодиодами и системы на основе естественного освещения	33 %	61 %	83 %	59 %

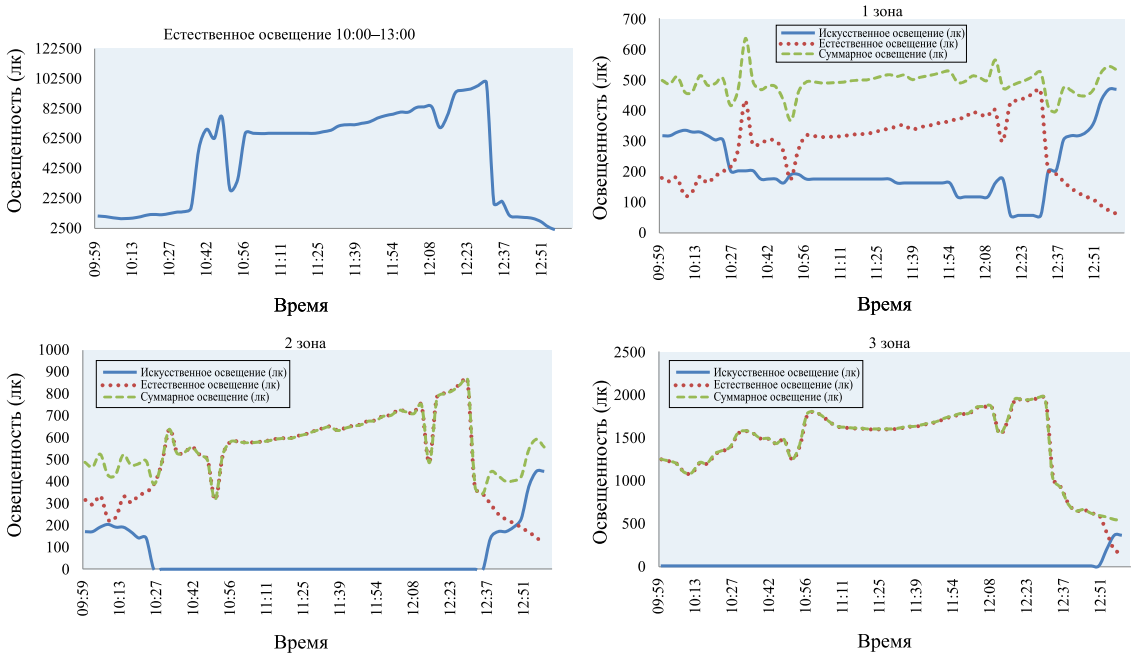


Рис. 7. Освещённость с 10:00 до 13:00

в предыдущем разделе. Измерения освещённости проводятся с помощью люксметров в каждой зоне, чтобы система могла достичь контрольного уровня освещённости на рабочих плоскостях. Измерения освещённости от естественного и искусственного освещения снаружи здания и в каждой из рассматриваемых зон освещения представлены на рис. 6 и рис. 7. Измерения проводились в дневные часы (08:00–10:00) и (10:00–13:00). Сегментация производится в зависимости от изменения естественного освещения. В утреннее время с 08:00 до 10:00 естественная освещённость увеличивается, но резкий скачок приходится на время с 10:00 до 13:00.

Уровень освещённости в зоне 1 берётся между (8:00–10:00). Недостаточный уровень естественной освещённости увеличивает потребность в искусственных источниках света. В систему добавляется задержка из-за негативного влияния внезапных изменений освещённости на зрение, таким образом, общий уровень контрольной освещённости увеличивается до 590 лк. Естественное освещение оказывает более сильное влияние на зону 2, и потребность в искусственном освещении уменьшается. Третья зона – это область, которая наиболее эффективно использует естественное освещение, так как она расположена рядом с окном, здесь потребность в искусственном освещении минимальна. Необходимое искусственное освещение уменьшается с увеличением естественного освещения. Видно, что энергопотребление уменьшается в зависимости от времени по зонам. Так, например, к 09:05 потребляемая мощность в зоне 3 составляла 0 Вт.

При установке светильников со светодиодами вместо существующих 6 светильников с люминесцентными лампами (4×18 Вт) в лаборато-

Таблица 3

Вклад естественного освещения в освещённость рабочих поверхностей во всех помещениях обследуемого здания

Наименование помещения	Мощность (Вт)	Энерго-е (Вт·ч)	Мощность ОП с СД (Вт)	Энерго-е ОП с СД (Вт·ч)	Среднее значение вклада ест. осв. (%)	Вклад ест. осв. (Вт·ч)	ЦИЭО* с учётом ест. осв. (Вт·ч)/м^2
Лаборатория материалов	1000	9000	560	4000	70 %	2500	26,1
Лаборатория литья	864	6912	420	3360	63 %	2128	28,4
Лаборатория электрических двигателей	864	6912	420	3360	63 %	2128	31,4
Лаборатория «Индустрия 4.0»	432	3456	210	1680	60 %	1008	3,1
Лаборатория робототехники	432	3456	210	1680	64 %	1087	23,4
Комната профессорско-преподавательского состава	432	3456	210	1680	56 %	936	26,7
Главное управление по делам студентов	168	4032	245	1960	61 %	1196	26,5
Офис документооборота	432	3456	210	1680	40 %	663	17,6
Офис управления	288	2304	140	1120	80 %	896	44,8
Отдел поддержки	288	2304	140	1120	22,5 %	252	12,6
Всего	5688	45504	2765	22120	59 %	13228	

*Примечание научного редактора: метод цифровой индикации энергии освещения (*Lighting Energy Numerical Indicator*, *LENI*) обеспечивает альтернативный способ расчёта энергетической эффективности освещения здания. В то время как каждый светильник обычно оценивается по его энергетической эффективности (например, светильник без управления должен иметь минимальный КПД 60 лм светильника на Вт цепи), метод ЦИЭО вычисляет фактическую энергию, используемую в кВт·ч на квадратный метр в год. Затем этот показатель сравнивается с максимальным эталонным значением в зависимости от освещённости, необходимой в помещении.

Таблица 4

Анализ затрат

Компоненты		Система вкл./выкл. (ЛЛ)	Система вкл./выкл. (СД)	Обычная система на основе ест. осв.	Рекомендуемая система на основе ест. осв.
1	Светильники	2756 $	3635 $	9042 $	9042 $
2	Датчики освещённости	–	–	4500 $	450 $
3	Контроллеры и шкаф управления	–	–	5350 $	4919 $
4	Кабель	615 $	615 $	1285 $	1117 $
5	Монтажные работы	513 $	513 $	1010 $	945 $
Всего			4763 $	21187 $	16473 $

рии «Индустрия 4.0» установленная мощность осветительной установки снижается с 432 Вт до 210 Вт. Табл. 2 показывает, что потребление энергии в течение 8-часового рабочего дня снизилось с 3456 Вт·ч до 1680 Вт·ч. Использование светильников со светодиодами вместо светильников с люминесцентными лампами сэкономило 48 % потребления энергии.

Полученные результаты исследования в лаборатории «Индустрии 4.0» аппроксимируются для определения установленной мощности осветительной установки в остальных рабочих помещениях, в которые входят 10 лабораторий и офисов, и энергопотребления, затрачиваемого на 8-часовую смену, а также влияния естественного освещения на зоны. В табл. 3 приведены эксплуатационные и процентные значения установленной мощности в рабочих помещениях с естественным освещением, энергопотребление с 09:00 часов до 17:00 часов и вклад естественного освещения. Всего используется 79 светильников с люминесцентными лампами Т8 (4×18 Вт), а установленная мощность составляет 5688 Вт. Если светильники непрерывно включены и управляются по алгоритму вкл./выкл. в течение 8-часовой смены, то потребляемая энергия составляет 45504 Вт·ч.

Значения мощности и энергопотребления определяются при замене 79

существующих светильников во всех рабочих помещениях на встроенные панельные светильники со светодиодами (600×600 мм Ledova PL1400125 Olea 35 Вт), которые были применены в лаборатории «Индустрия 4.0» и управляются в зависимости от естественного освещения. Если светильники со светодиодами работают в режиме вкл./выкл., то потребление через 8 часов составит 22120 Вт·ч, в то время как при использовании системы управления, основанной на использовании естественного освещения эта величина может сократиться до 13228 Вт·ч.

4. Анализ Затрат

Система разработана для использования в 10 независимых зонах в центральных лабораториях и студенческих корпусах, и может быть применена для повышения энергоэффективности зданий за счёт управления освещением. В данном исследовании не рассматривалась система управления в коридорах, складских помещениях, архивах и туалетах. Анализ необходимых затрат проводится для тех помещений, в которых была установлена рекомендуемая система управления освещением. Всего в рассматриваемых зонах установлено 79 светильников с люминесцентными лампами (4×18 Вт).

В обычных системах управление светильниками осуществляется с помощью переключателей вкл./выкл. В табл. 4 приведены инвестиционные затраты на необходимое оборудование для лабораторий. Стоимость монтажа составляет 3884 $. Светильники со светодиодами используются с обычной системой управления на основе учёта изменения естественной освещённости, и есть датчик, который измеряет уровень освещённости в каждом помещении. Требования к компонентам рекомендуемой системы управления, следующие:

– использование контроллера обязательно для обработки информации и управления светильниками;

– контроллер должен обеспечивать мониторинг данных и удалённый доступ к системе;

– необходимо использование анализатора, который позволяет измерять экономию энергии на объекте;

– светильники должны иметь свойство диммирования (рекомендуемые светильники со светодиодами подходят под эти требования);

– система должна иметь датчик, способный измерять уровень освещённости 10 обособленных зон освещения, и управляющую структуру, которая будет управлять 26 светильниками в этих зонах.

В случае использования обычной системы управления, основанной на учёте естественного освещения, затраты будут составлять 21187 $. При этом рекомендуемая система управления с одним датчиком, соответствующая вышеуказанным требованиям, суммарно будет стоить 16473 $. Её главное отличие – в использовании одного датчика освещённости для всех зон освещения, благодаря чему происходит сокращение входных данных контроллера.

Согласно тарифу 2019 года, применяемому в школах Турции, стоимость 1 кВт·ч электроэнергии составляет 14,89 ₾ [29]. Если вместо светильника с люминесцентными лампами T8 используется светильник со светодиодами, то к стоимости установки будет добавлено ещё 879 $. В случае использования светильника со светодиодами вместо светильника с люминесцентными лампами избыточная стоимость может быть компенсирована в течение 1 года. Если вместе со светильниками с люминесцентными лампами T8 установлена обычная (датчик в каждой рабочей зоне) система управления на основе учёта изменения естественного освещения, то требуются дополнительные инвестиции в размере 17303 $.

5. Заключение

В качестве альтернативы обычным системам управления на основе учёта изменения естественного освещения в исследовании используется разомкнутая система управления с единственным датчиком. Уровни естественной освещённости фиксируются в разные периоды времени для полного представления характера изменения естественного освещения в помещениях, где будет применяться система управления. Соответственно определяются коэффициенты использования естественного освещения в этих помещениях. Экспериментальная система была установлена в лаборатории «Индустрия 4.0». Существующие светильники были заменены на светильники со светодиодами с функцией диммирования, их рабочий режим настраивался в зависимости от изменения измеренной естественной освещённости. Сравнивались характеристики существующих традиционных светильников, светильников со светодиодами и системы управления с учётом естественного освещения со светильниками со светодиодами. Когда светильники со светодиодами работают в режиме вкл./выкл., оказывается, что они на 48 % эффективнее осветительных установок с традиционными источниками света. Значение естественной освещённости измерялось с помощью одного датчика, расположенного вне помещения, а светильники диммировались в зависимости от изменения естественного освещения. Опытным путём было достигнуто 59 % экономии энергии. Анализ стоимости системы управления был выполнен для здания целиком, а не для одного рассматриваемого помещения лаборатории. Из анализа расходов видно, что пуско-наладочные расходы обычных систем управления освещением ниже, чем систем управления на основе учёта естественного освещения. Однако, наиболее эффективной из рассмотренных систем была определена система управления на основе учёта естественного освещения с разомкнутым контуром с одним датчиком освещённости. Несмотря на свою высокую стоимость, системы учёта естественного освещения поддерживают фиксированный уровень освещённости при низких значениях естественного освещения и обеспечивают комфортное освещения для пользователей. Поскольку целью исследования является энергоэффективность, диммирование светильников не выполнялось в тех случаях, когда естественное освещение создавало уровень освещённости выше контрольного. Установлено, что рекомендуемая система управления освещением позволяет сократить срок окупаемости на 5 лет по сравнению с обычными системами управления на основе учёта естественной освещённости. Кроме того, рекомендуемая система обладает рядом преимуществ, таких как 59 % экономия энергии, мгновенный мониторинг данных о токе системы, напряжении, мощности и освещённости, а также дистанционное управление.

Благодарности

Эта работа была выполнена при поддержке Координационного отдела научно-исследовательских проектов университета Коджаэли в рамках договора № 2018/072.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Paz J.F.D., Bajo J., Rodríguez S., Villarrubia G., Corchado J.M.* Intelligent system for lighting control in smart cities // Information Sciences, 2016. V372, pp. 241–255.

2. *Radulovic D., Skok S., Kirincic V.* Energy efficiency public lighting management in the cities // Energy, 2011. V36, #4, pp. 1908–1915.

3. *Zou H., Zhou Y., Jiang H, Chien Z.C., Xie L., Spanos C.J.* WinLight: A WiFi-based occupancy-driven lighting control system for smart building // Energy and Buildings, 2018. V158, pp. 924–938.

4. *Rosenberg E.* Calculation method for electricity end-use for residential lighting // Energy, 2014. V66, pp. 295–304.

5. *Yahiaoui A.* Experimental study on modelling and control of lighting components in a test-cell building // Solar Energy, 2018. V166, pp. 390–408.

6. *Darula S.* Review of the current state and future development in standardizing natural lighting in ınteriors // Light & Engineering, 2018. V26, #4, pp. 5–26.

7. *Santamouris M., Dascalaki E.* Passive retrofitting of office buildings to improve their energy performance and indoor environment: the office project // Building and Environment, 2002. V37, pp. 575–578.

8. *Chi D. A., Moreno D., Navarro J.* Correlating daylight availability metric with lighting, heating and cooling energy consumptions // Building and Environment, 2018. V132, pp. 170–180.

9. *Doulos L., Tsangrassoulis A., Topalis F.V.* Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor // Energy Conversion and Management, 2014. V86, pp. 1069–1077.

10. *Barbón A., Pardellas A.* Fernández-Rubiera J.A., Barbón N., New daylight fluctuation control in an optical fiber-based daylighting system // Building and Environment, 2019. V153, pp. 35–45.

11. *Ovcharov A.T., Selyanin Y.N., Antsupov Y.V.* A hybrid illumination complex for combined illumination systems: concepts, state of the problem, practical experience // Light & Engineering, 2018. V26, #2, pp. 20–28.

12. *Dubois M.C., Blomsterberg A.* Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review // Energy and Buildings, 2011. V43, pp. 2572–2582.

13. *Shen E., Hu J., Patel M.* Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies // Building and Environment, 2014. V78, pp. 155–170.

14. *Chew I., Kalavally V., Oo N.W., Parkkinen J.* Design of an energy-saving controller for an intelligent LED lighting system // Energy and Buildings, 2016. V120, pp. 1–9.

15. *Yu X., Su Y.* Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation –A literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. V52, pp. 494–503.

16. *Sahana S., Roy B.* Development and performance analysis of a cost-effective integrated light controller // Light & Engineering, 2019. V27, #6, pp. 73–81.

17. *Alexei K. Soloviev, Nina A. Muraviova, Sergei V. Stetsky.* Comfort light environment under natural and combined lighting method of their characteristics definition with subjective expert appraisal using // Light & Engineering, 2018. V26, #3, pp. 124–131.

18. *Dun W.* Optimization of intelligent illumination in university classroom based on FMRAS control algorithm // Light & Engineering, 2018. V26, #2, pp. 52–59.

19. *Cheng R.* Classroom lighting energy-saving control system based on machine vision technology // Light & Engineering, 2018. V26, #4, pp. 143–149.

20. *Jain S., Garg V.* A review of open loop control strategies for shades, blinds and integrated lighting by use of real-time daylight prediction methods // Building and Environment, 2018. V135, pp. 352–364.

21. *Pandharipande A., Caicedo D.* Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches // Energy and Buildings, 2015. V104, pp. 369–377.

22. *Soori P.K., Vishwas M.* Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design // Energy and Buildings, 2013. V66, pp. 329–337.

23. *Nikolaevich A. V.* Light desynchronosis and healt // Light & Engineering, 2019. V27, #3, pp. 14–25.

24. *Ihm P., Nemri A., Krarti M.* Estimation of lighting energy savings from daylighting // Building and Environment, 2009. V44, #3, pp. 509–514.

25. *Gentile N., Dubois M, Laike T.* Daylight harvesting control systems design recommendations based on a literature review // Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE15th International Conference on Rome, Italy, 10–13 June, ISBN: 978–1–4799–7994–3, 2015. pp. 632–637.

26. *Pandharipande A., Willems F.M.J.* Daylight-adaptive lighting control using light sensor calibration prior-information // Energy and Buildings, 2014. V73, pp 105–114.

27. *Tang S., Kalavally V., Ng K.Y., Parkkinen J.* Development of a prototype smart home intelligent lighting control architecture using sensors onboard a mobile computing system // Energy and Buildings, 2017. V138, pp. 368–376.

28. *Meugheuvel N.V.D.M., Pandharipande A., Caicedo D., Hof P.P.J.V.D.* Distributed lighting control with daylight and occupancy adaptation // Energy and Buildings, 2014. V75, pp. 321–329.

29. Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu [Republic of Turkey Energy Market Regulatory Authority]. URL: https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3–0–1/tarifeler (referance date: 29.10.2019)

Мурат Аяз (Murat Ayaz), *Ph.D., доцент кафедры электротехники и энергетики Университета Коджаэли, Турция. Область научных интересов включает в себя электрические машины, электромеханические системы, гибридные электромобили и системы промышленной автоматизации*

Угур Юсель (Ugur Yucel), *M. Sc. Аспирант кафедры проектирования энергетических систем Университета Коджаэли, Турция. Область научных интересов включает в себя управления освещением, светодиоды и системы промышленной автоматизации*

Корай Эрхан (Koray Erhan), *Ph.D. Системный инженер в компании AVL R&D, Турция. Область научных интересов – электрические и гибридные электромобили, фотоэлектрические системы производства электроэнергии, возобновляемые источники энергии, технологии хранения энергии, интеллектуальная сетевая интеграция и системы автоматизации*

Энгин Оздемир (Engin Ozdemir), *Ph.D. Профессор Университета Коджаэли, технологического факультета инженерного факультета энергетических систем в Коджаэли в Турции. Область научных интересов – силовая электроника, возобновляемые источники энергии, накопление энергии и промышленная автоматизация*

Моделирование фотоэлектрической панели с использованием *MATLAB* и *Simulink* и применение метода отслеживания точек максимальной мощности на основе нейронных сетей

М. ТАЛБИ[1], Н. МЕНСИА[2], Х. ЭЗЗАУЙЯ[1]

[1]Лаборатория полупроводников, наноструктур и передовых технологий
[2]Лаборатория фотоэлектрических элементов
[1,2] Центр Исследований и технологий энергетики Борж Седрия, Тунис
E-mails: [1]talbi1969@yahoo.fr, [2]mensia_nawel@hotmail.com, [1]ezzaouia.hatem@inrst.rnrt.tn

Аннотация

В настоящее время возобновляемые источники энергии играют важную роль в замене традиционных источников на ископаемом топливе. Солнечная фотоэлектрическая энергия – один из самых перспективных возобновляемых энергетических ресурсов, который вызывает интерес все больше в последние несколько лет. Основная проблема фотоэлектрической солнечной энергетики заключается в том, что при изменении условий работы панели с ячейками также изменяется напряжение, при котором из неё может быть получена максимальная мощность. В данной работе впервые выполнено моделирование солнечной фотоэлектрической панели с использованием *MATLAB* и *Simulink*. После этого для управления повышающим преобразователем постоянного тока применяется метод отслеживания точки максимальной мощности (*Maximum Power Point tracking*, *MPPT*) основанный на искусственной нейронной сети (*Artificial Neural network*, *ANN*). Этот результат отслеживания *MPPT* контроллером точки максимальной мощности (*TMM*) оценивается и сравнивается по алгоритму «Отклониться и наблюдать» (*Perturb and Observe*, *P&O*). Результаты моделирования показывают, что предложенная методика *MPPT*, основанная на нейросети, даёт более быстрый отклик, чем обычная методика по алгоритму «Отклониться и наблюдать» при быстрых изменениях условий эксплуатации. Это сравнительное исследование проводится с точки зрения временных вариаций рабочего цикла, выходной мощности, выходного тока, КПД и значений целевого тока. Все это выходные параметры повышающего преобразователь (*Boost DC-DC*), кроме целевого тока, который является входным параметром. Результаты измерения по времени всех параметров (для двух случаев: T=25°C и G=1000 Вт⁄м^2, и когда T и G являются переменными), показывают незначительные отклонения от значения точки максимальной мощности. Используемый *MPPT* контроллер на основе искусственной нейронной сети имеет время сходимости лучше, чем обычный метод «Отклониться и наблюдать».

Ключевые слова: контроллер, солнечная фотоэлектрическая панель, солнечное излучение, температура, искусственная нейронная сеть, *ANN*.

1. Введение

В настоящее время проблемы загрязнения окружающей среды и глобального потепления становятся важными вопросами для исследований. Источники возобновляемой энергии рассматриваются как технологический выбор для производства чистой энергии и, следовательно, решения этих проблем. Среди этих источников большое внимание уделяется солнечной фотоэлектрической технологии (ФЭ), поскольку она считается одним из наиболее перспективных возобновляемых источников энергии. В последнее время, благодаря своему развитию и снижению себестоимости, солнечная фотоэлектрическая технология становится эффективным решением экологических проблем [1]. Тем не менее, разработка для повышения эффективности солнечной фотоэлектрической системы по-прежнему является сложной областью исследований. Солнечная фотоэлектрическая система не может быть смоделирована как источник постоянного тока, так как её выходная мощность изменяется в зависимости от температуры, солнечного излучения, а также тока нагрузки [2]. В общем случае метод отслеживания точки максимальной мощности (*Maximum Power Point tracking*, *MPPT*) [2, 3] применяется для анализа работы в солнечной фотоэлектрической системе. Эффективность этого метода зависит как от применяемого алгоритма, так и от схемы *MPPT* контроллера. Алгоритм управления *MPPT* контроллера часто применяется в преобразователе постоянного тока (DC-DC), который обычно используется в общей схеме ФЭ системы. Типичная схема подключения *MPPT* контроллера в солнечной фотоэлектрической системе представлена на рис. 1. Одним из самых популярных алгоритмов *MPPT* является алгоритм «Отклониться и наблюдать» (Perturb and Observe, *P&O*) [4]. Однако недостатками этого алгоритма являются проблемы расхождения и сходимости в некоторых точках во время отслеживания. Чтобы улучшить производительность алгоритма «Отклониться и наблюдать», Понгсакор Такун и др. [2] применили нечёткую логику в своём методе *MPPT*. В данной работе используется искусственная нейронная сеть (*Artificial Neural network*, *ANN*) [5, 6, 7, 8, 9] для метода *MPPT*, а моделирование выполняется в среде *MATLAB* и *Simulink*. В разделе 2 статьи представлено описание работы солнечной фотоэлектрической эквивалентной схемы. Раздел 3 посвящён моделированию новой модели солнечной фотоэлектрической панели с использованием *MATLAB* и *Simulink*. В разделе 4 приведено описание методов отслеживания точек максимальной мощности, включая предложенную в настоящей статье методику *MPPT*, основанную на искусственной нейронной сети. В разделе 5 представлены результаты исследования, в разделе 6 – выводы.

Как показано на рис. 1, в типичной схеме включения *MPPT* контроллера в солнечной фотоэлектрической системе входные параметры ток $I_{ФЭ}$ и напряжение $V_{ФЭ}$ поступают от солнечной фотоэлектрической панели. На выходе системы генерируется ШИМ-сигнал (широко-импульсная модуляция). Этот ШИМ-сигнал управляет повышающим преобразователем постоянного тока (*DC - DC*), который, в свою очередь, соединён с нагруз-

[1] Перевод с англ. Т.В. Мешковой

кой, которая может быть резистивной или насосной.

2. Солнечная фотоэлектрическая эквивалентная схема

Модель солнечного элемента можно классифицировать как *p-n* полупроводниковый переход. Когда ячейка подвергается воздействию света, вырабатывается постоянный ток. Хорошо известно, что этот ток зависит от температуры, солнечного излучения и тока нагрузки. На рис. 1 солнечный фотоэлектрический модуль (ФЭ) представляет собой солнечную фотоэлектрическую панель, которая состоит из нескольких солнечных фотоэлементов, соединённых последовательно и параллельно, а на рис. 2 представлена типовая эквивалентная схема солнечного фотоэлемента (одной ячейки).

Согласно первому закону Кирхгофа для рис. 2, получаем следующие уравнения:

$$I_{sc} = I_1 + I_D\,, \qquad (1)$$

$$I_1 = I_2 + I_{ФЭ}\,, \qquad (2)$$

где I_{sc} – ток, генерируемый солнечным излучением (А), I_D – ток диода (А), $I_{ФЭ}$ – ток ячейки (А).

Согласно закону Ома

$$I_2 = \frac{V_D}{R_p}, \qquad (3)$$

где V_D – напряжение диода (В), R_p – шунтирующее сопротивление ячейки (Ом).

Следовательно, используя уравнения (1), (2) и (3), получаем уравнение (4):

$$I_{sc} = I_{ФЭ} + I_D + \frac{V_D}{R_p}\,. \qquad (4)$$

Ток диода I_D находится из формулы Шокли:

$$I_D = I_0 \cdot (\exp(\frac{V_D}{V_t}) - 1)\,, \qquad (5)$$

где I_o – обратный ток насыщения, а V_t – тепловое напряжение, равное 26 мВ при 300 К.

Закон напряжений Кирхгофа в цепи на рис. 2 позволяет получить:

$$V_{ФЭ} + R_s \cdot I_{ФЭ} - V_D = 0\,, \qquad (6)$$

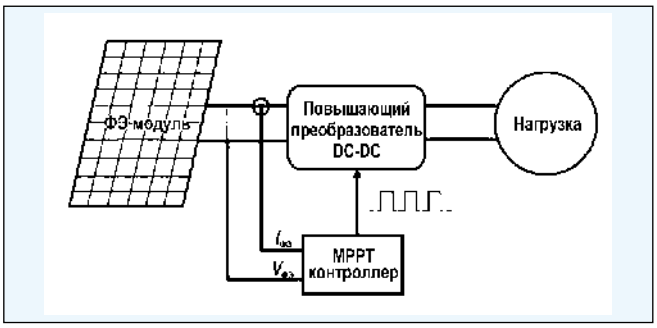


Рис. 1. Типовая схема подключения *MPPT* контроллера в солнечной фотоэлектрической (ФЭ) системе [2]

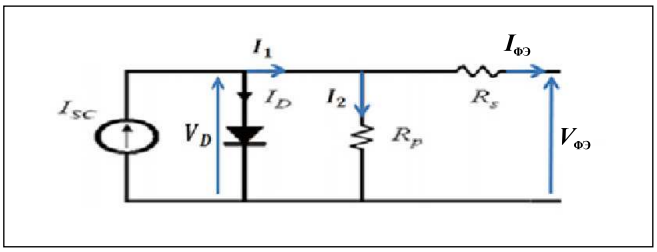


Рис. 2. Типовая схема солнечной фотоэлектрической батареи (ячейки)

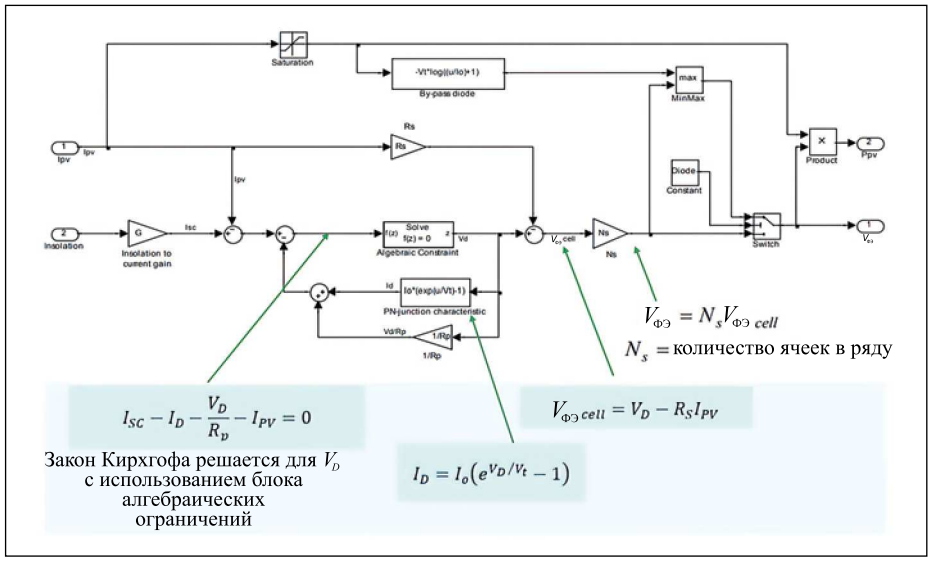


Рис. 3. Модель солнечной фотоэлектрической панели, предложенная в работе [4]

где R_s – сопротивление ряда ячеек (Ом).

Тогда $V_{ÔÝ} = V_D - R_s \cdot I_{ÔÝ}$. (7)

3. Моделирование предлагаемой солнечной фотоэлектрической панели с использованием *MATLAB* и *Simulink*

В данной работе предложенная модель солнечной фотоэлектрической панели базируется на модификации модели, предложенной в работе [4]. В модификации предполагается учёт третьего входного параметра, температуры, помимо двух других – солнечного излучения и тока фотоэлектрической ячейки.

Введение температуры в качестве третьего входного параметра предлагаемой модели солнечной фотоэлектрической панели обусловлено необходимостью учёта реальных климатических условий и, соответственно, лучшей аппроксимацией точки максимальной мощности.

На рис. 3 подробно представлена модель солнечной фотоэлектрической панели, предложенной в работе [4].

Чтобы ввести третий входной параметр предполагаемой модели солнечной фотоэлектрической панели, температуры, используется формула теплового напряжения Шокли:

$$V_t = \frac{k \cdot T}{q}, \qquad (8)$$

где k – постоянная Больцмана $1{,}38\times10^{-23}$ Кл, q – заряд электрона $1{,}60\times10^{-19}$ Дж/К, T – температура (К).

Технические характеристики предлагаемой солнечной фотоэлектриче-

Таблица 1

Технические характеристики предлагаемой фотоэлектрической панели

Ток короткого замыкания (генерируемый солнечным излучением) (I_{sc})	5,45 А
Напряжение разомкнутой цепи (V_{oc})	22,2 В
Ток при максимальной мощности (I_r)	4,95 А
Напряжение при максимальной мощности (V_r)	17,2 В

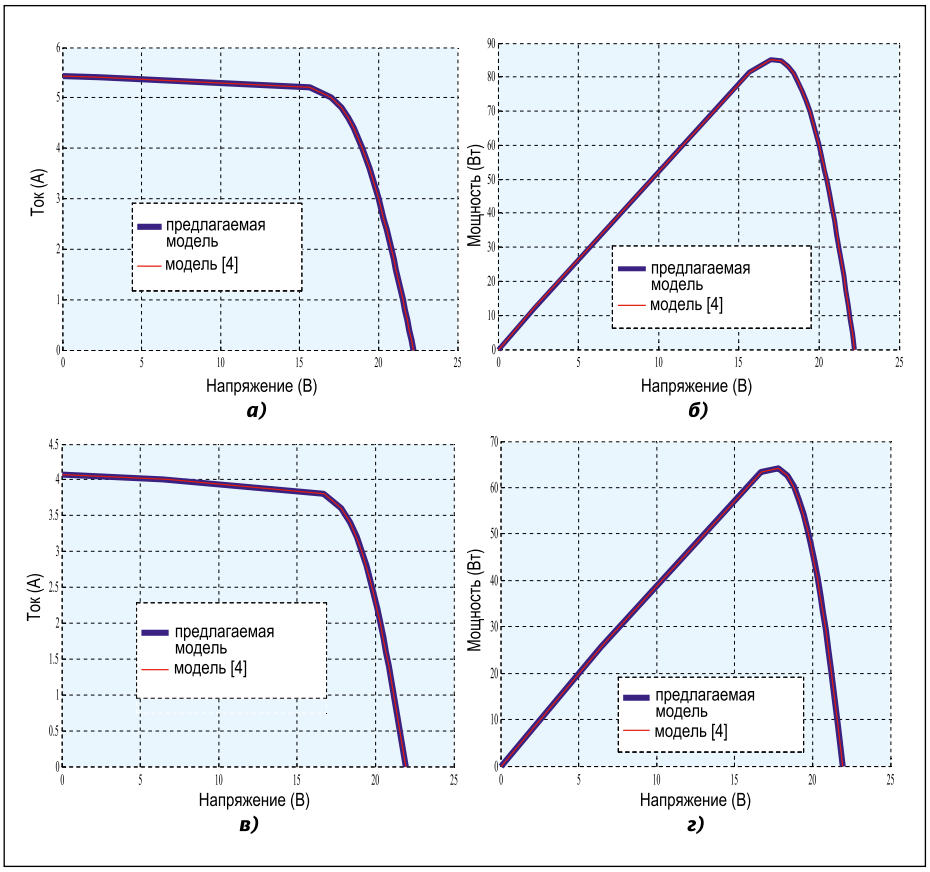


Рис. 4. Вольт-амперные (*а*) и мощностные характеристики (*б*) при условии G=1000 Вт/м^2 и T=25 °C для модели в [4] и предлагаемой модели, вольт-амперные (*в*) и мощностные характеристики (*г*) при условии G=750 Вт/м^2 и T=20 °C для модели в [4] и предлагаемой модели

ской панели и той, что предложена в работе [4], приведены в табл. 1.

Модификация модели солнечной фотоэлектрической панели, представленной в [4], была произведена с помощью введения теплового напряжения согласно (8). Таким образом, температура из постоянной величины, равной 25 °C в модели [4], становиться переменной для того, чтобы предлагаемая в настоящей статье модель была приближена к реальным климатическим условиям.

На рис. 4 представлены вольт-амперные и мощностные характеристики для модели [4] и предлагаемой в настоящем исследовании. Кривые получены для двух случаев, когда солнечная постоянная G=1000 Вт/м^2 при температуре окружающей среды T=25 °C и G=750 Вт/м^2 при T=20 °C.

Из анализа графиков, приведённых на рис. 4 видно, что вольт-амперные и мощностные характеристики для двух рассматриваемых моделей имеют схожий характер распределения. Такие результаты были ожидаемы, так как модели почти не имеют отличий кроме представления температуры в виде переменной величины в предлагаемой модели, в то время как в старой модели [4] температура была постоянна и равна 25°C. В случае, когда T=20 °C и G=750 Вт/м^2, в обеих моделях было изменено значение теплового напряжения (V_t) при новой температуре окружающей среды. Следовательно, для двух моделей были получены также похожие кривые.

4. Метод отслеживания точки максимальной мощности

4.1. Алгоритм «Отклониться и наблюдать»

Как уже упоминалось ранее, один из самых популярных и простых алгоритмов, используемых в методе отслеживания точки максимальной мощности, – это «Отклониться и наблюдать» [10]. Основная концепция этого алгоритма заключается в том, чтобы подтолкнуть систему к работе в том направлении, в котором увеличивается выходная мощность, получаемая от солнечной фотоэлектрической системы. Уравнение (9) описывает изменение мощности, которое определяет стратегию алгоритма «Отклониться и наблюдать»:

$$\Delta P = P_k - P_{k-1}. \qquad (9)$$

Когда изменение мощности положительно, система будет сохранять направление дифференциального тока (уменьшение или увеличение фотоэлектрического тока) в том же направлении. Если изменение будет отрицательным, то система изменит направление дифференциального тока на противоположное. Эта методика хорошо работает в установившемся режиме (температура окружающей среды и интенсивность солнечного излучения меняются медленно). Однако алгоритм «Отклониться и наблюдать» терпит неудачу в отслеживании точки максимальной мощности в случае быстрых изменений атмосферных условий.

4.2. Предлагаемый метод отслеживания точки максимальной мощности, основанный на искусственной нейронной сети

Искусственная нейронная сеть [11, 12, 13] – это искусственная сеть, имитирующая поведение биологических нейронных сетей человека. Она широко используется при моделировании сложных взаимосвязей между входными и выходными параметрами в нелинейных системах. Искусственную нейронную сеть можно определить как параллельную распределённую струк-

туру обработки информации, состоящую из входных данных и, по меньшей мере, одного скрытого слоя и одного выходного слоя. Эти слои имеют обрабатывающие элементы, называемые нейронами, соединённые между собой. Первый шаг в проектировании искусственной нейронной сети [14, 15, 16] состоит в сборе исторических данных о задаче, решаемой с помощью сети. В случае метода отслеживания точки максимальной мощности для обучения сети требуется большое количество массивов данных о солнечном излучении и температурах, а также соответствующие им значения токов точек максимальной мощности. Полученные данные называются точками обучения. Часть полученных обучающих точек для представленной в настоящей статье модели приведена в табл. 1.

Выбор структуры сети

Как уже упоминалось ранее, нейронные сети состоят как минимум из двух слоёв. Первый – это скрытый слой, а второй – слой выходных данных. Входная информация соединяется со скрытыми слоями через взвешенные соединения, где вычисляются выходные данные. Как количество скрытых слоёв, так и количество нейронов в каждом слое контролируют производительность сети [5]. Разработанная в данной работе искусственная нейронная сеть имеет два параметра входных данных – температуру и солнечную облучённость. Эта сеть имеет два слоя, где первый является скрытым слоем, а второй – слоем выходных данных. Скрытый слой имеет десять нейронов, имеющих функцию активации тансигмоида, а выходной слой имеет только один нейрон, имеющий функцию активации пурелина. Выход этого нейрона – это ток в точке максимальной мощности, I_{TMM} или I_{ref}. На рис. 5 представлена используемая в этой работе искусственная нейронная сеть.

Активационные функции тансигмоида и пурелина выражаются соответственно уравнениями (10) и (11):

$$\tan si\,g(n) = \frac{1}{1+\exp(-n)}, \qquad (10)$$

$$Purelin(n) = n. \qquad (11)$$

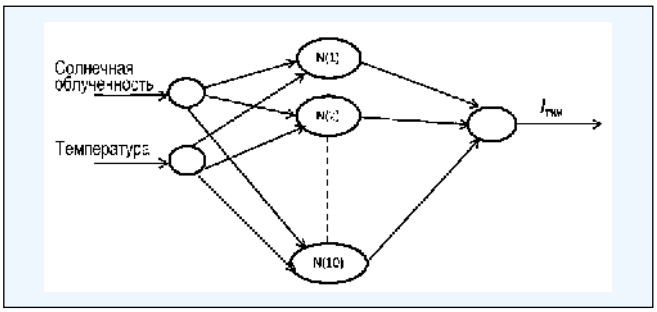


Рис. 5. Искусственная нейронная сеть для метода отслеживания *TMM*

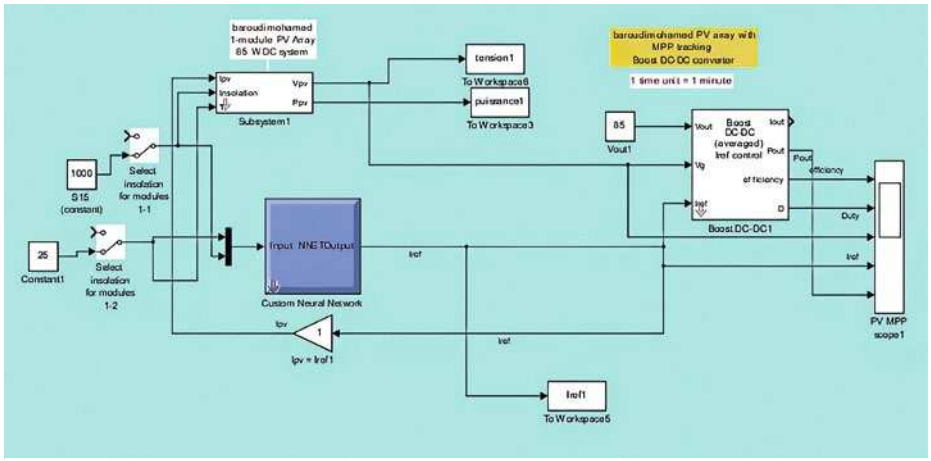


Рис. 6. Модель разработанной солнечной фотоэлектрической системы в среде *MATLAB* и *Simulink*

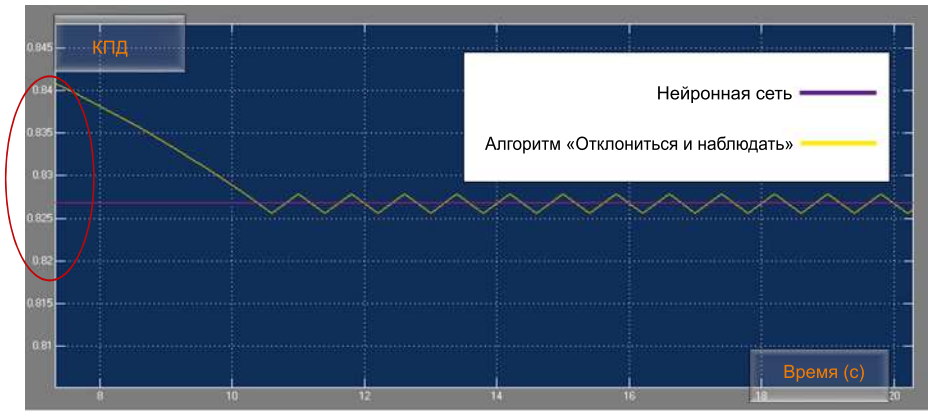


Рис. 7. Зависимость КПД от времени

Обучение нейронной сети

Собранные обучающие точки передаются в проектируемую сеть. Это делается для того, чтобы научить эту сеть обрабатывать тестовые точки, которые обычно отличаются от обучающих. Для начала работы с нейронной сетью, необходимо получить эти обучающие точки. В данной работе они получены с помощью изменения облучённости и температуры матрицы панели и фиксирования значений напряжения, токов и максимальной мощности. Параметры, используемые для обучения разрабатываемой нейронной сети – это количество эпох (*epochs* = 5000), импульс (μ = 0,1), минимум градиента (*min grad* = 1*e*-7). Для обучения использовался алгоритм Левенберга – Марквардта, метод оптимизации, направленный на решение задач о наименьших квадратах.

Тестирование работы нейронной сети

Некоторые из собранных тестовых точек сохраняются как тестовые. Эти тестовые точки используются для тестирования планируемой производительности искусственной нейронной сети после завершения её обучения. На самом деле, они будут новыми для

Таблица 2

Часть базы данных используется для обучения и тестирования нейронной сети

Порядковый номер	Температура, °C	Солнечная облучённость, Вт·м$^{-2}$	$I_{ТММ}$, А	I_{ref}, А	Максимальная мощность, Вт
1	15	200	0,8000	18,1886	14,5509
2	15	350	1,6000	17,9427	28,7083
3	15	500	2,4000	17,6782	42,4276
4	15	650	3,2000	17,3991	55,6770
5	16	450	2,2000	17,1015	37,6233
6	16	700	3,4000	17,6577	60,0362
7	16	900	4,4000	17,4825	76,9229
8	16	1100	5,4000	17,2286	93,0343
9	17	300	1,4000	17,2338	24,1273
10	17	600	2,8000	18,1493	50,8179

Таблица 3

Примеры пар входных и целевых значений из табл. 2

Пары входных данных температуры и облучённости	Целевое значение тока *ТММ*, А
(15,200)	0,8000
(15,350)	1,6000
(15,500)	2,4000
(15,650)	3,2000

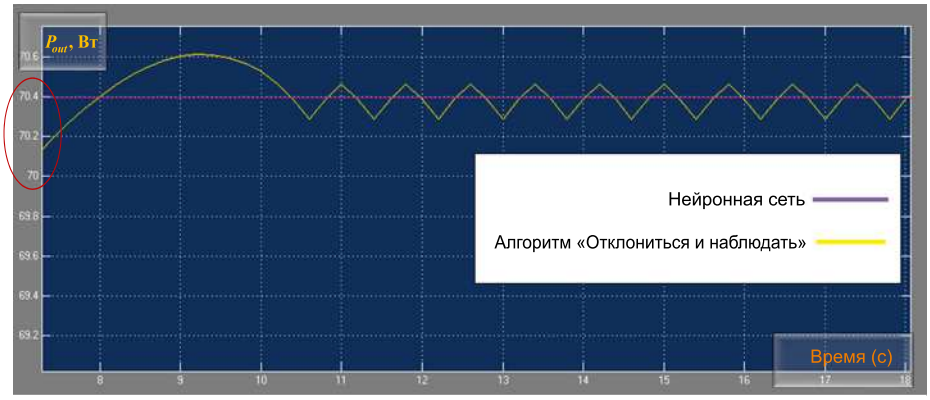


Рис. 8. Зависимость выходной мощности от времени

неё. Следовательно, можно судить, даёт ли она точные результаты или нет.

Предлагаемый *MPPT* контроллер состоит из двух основных частей – искусственная нейронная сеть (*Input NNET Output*) и повышающий преобразователь тока (*Boost DC-DC*), как показано на рис. 6.

В табл. 2 приведена часть базы данных, которая использовалась для обучения и тестирования искусственной нейронной сети, разрабатываемой для целей данной работы (рис. 5).

База данных для обучения сети формировалась, таким образом, чтобы охватить максимально широкие изменения климатических условий для естественного освещения и температуры в течение четырёх сезонов года. Затем для одного значения температуры сопоставляются четыре различных значения солнечной облучённости, диапазон для выбора температуры составляет от 15 до 40 °C, а диапазон выбора солнечной облучённости от 150 до 1250 Вт/м^2. Например, для 15 °C составляются следующие четыре пары: (15,200), (15,350), (15,500) и (15,650), а целевые значения токов точки максимальной мощности получаются: 0,8000 А, 1,6000 А, 2,4000 А и 3,2000 А, соответственно. Таким образом, формируется табл. 3 со значениями входных и целевых параметров.

Для обучения разработанной сети было использовано 80 % базы данных, которая содержит 104 элемента, остальная часть используется для валидации и тестирования.

Как показано на рис. 6, в предлагаемой солнечной фотоэлектрической системе используется повышающий преобразователь постоянного тока [4], входными параметрами которого являются целевое значение тока, напряжение ФЭ панели и напряжение V_{out}, которое выбирается равным 85 В. Выходные параметры этого преобразователя – это КПД, продолжительность работы, выходной ток, выходная мощность.

Значения входного последовательного сопротивления ячеек в ряду (R_L) и тока коммутационных потерь (I_{sw}) составляют соответственно 0,5 Ом и 0,33 А.

КПД вычисляется следующим образом:

$$\text{КПД} = \frac{P_{out}}{P_{input}}, \qquad (12)$$

где P_{input} – входная мощность повышающего преобразователя, которая определяется по формуле ниже:

$$P_{input} = I_g \cdot V_g, \qquad (13)$$

где V_g равен напряжению фотоэлектрической панели, I_g – ток, вычисляемый из значений целевых токов, выбирая только положительные значения.

Высокая эффективность приводит к низким потерям мощности внутри самого преобразователя. Таким образом, параметр КПД – это хороший показатель производительности преобразователя.

5. Результаты и обсуждения

В этом разделе приводится сравнительное исследование предложенного

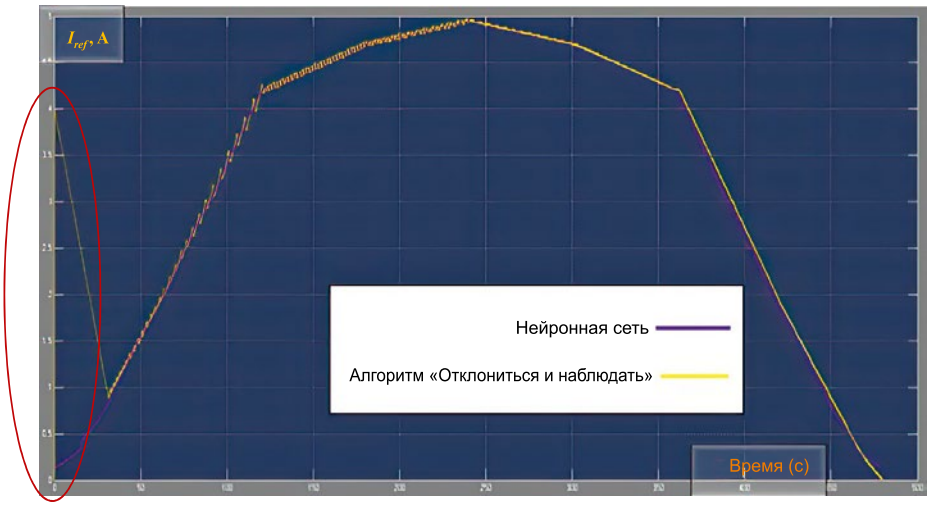


Рис. 9. Зависимость целевых значений тока от времени

MPPT контроллера с использованием искусственной нейронной сети и с использованием традиционного алгоритма «Отклониться и наблюдать». Сравнение проводиться с помощью анализа выходных параметров, таких как целевое значение тока, выходная мощность и КПД. Причём, выходная мощность и КПД – это выходные параметры повышающего преобразователя и общей солнечной фотоэлектрической системы. На рис. 7 и 8 представлены зависимости вышеперечисленных параметров от времени. Эти зависимости получены при стандартных условиях G = 1000 Вт/м^2 и температуре T = 25 °С. Рис. 9 иллюстрирует зависимость целевых значений тока в условиях изменения солнечной облучённости с течением времени.

Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного *MPPT* контроллера с использованием искусственной нейронной сети как с точки зрения эффективности, так и с точки зрения быстрого времени отклика. Отсутствие/незначительные отклонения от значений точки максимальной мощности и простота реализации являются основными преимуществами этого контроллера. Он имеет лучшее время сходимости по сравнению с использованием обычного алгоритма «Отклониться и наблюдать», что и подтверждено графиками на рис. 7–9.

6. Заключение

В данной работе была предложена новая модель солнечной фотоэлектрической панели, смоделированной с помощью *MATLAB* и *Simulink*. Эта модель реализуется на основе модификации существующей в литературе модели солнечной фотоэлектрической панели, для которой температура считается постоянной и равной 25 °С. Однако, в реальных условиях изменение температуры необходимо учитывать. Поэтому модификация модели заключалась во ведении в качестве ещё одного входного параметра, температуры. В новой солнечной фотоэлектрической панели рассматриваются для сравнения два различных *MPPT* контроллера, в первом случае на основе обычного алгоритма «Отклониться и наблюдать», а во втором – на основе искусственной нейронной сети. Сравнительный анализ проводился на основе полученных значений КПД, целевого тока и выходной мощности. Причём КПД и выходная мощность – это выходные параметры повышающего преобразователя (DC - DC), а целевое значение тока – это его входной параметр. Проведённый сравнительный анализ полученных значений КПД, целевого тока и выходной мощности в различных условиях (G=1000 Вт⁄м^2 при T=25°C и G переменная при T=25°C), показали незначительные отклонения для значений точки максимальной мощности. А используемый *MPPT* контроллер на основе нейронной сети показал лучшее время сходимости по сравнению с использованием обычного алгоритма «Отклониться и наблюдать».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Subiyanto, A. Mohamed, and M. A. HANNan.* Maximum power point tracking in grid connected PV system using a novel fuzzy logic controller // Proceedings of the IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD '09), pp. 349–352, IEEE, Serdang, Malaysia, November 2009.

2. *P. Takun, S. Kaitwanidvilai and C. Jettanasen.* Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Control for Photovoltaic Systems // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists Hong Kong, 2011.

3. *A.K. Mahamad, S. Saon and K. Diaw.* FPGA Based Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic System using Perturb and Observe Method during Shading Condition // International Conference on Internet Services Technology and Information Eng, 2014.

4. http://ecee.colorado.edu/~ecen2060/matlab.html

5. *C. Anil Kumar and N. Surekha.* Artificial Neural Network based Maximum Powerpoint Tracking of Solar Panel // International Journal of Computer Technology and Applications, 2017. V10, #02, pp. 253–263.

6. *Loubna Bouselham, Mohammed Hajji, Bekkay Hajji and HichamBouali.* A New *MPPT*-based *ANN* for Photovoltaic System under Partial Shading Conditions // Energy Procedia, Volume 111, March 2017, pp. 924–933.

7. *Naoufel Khaldi, Hassan Mahmoudi, Malika Zazi, Youssef Barradi.* Implementation of a *MPPT* Neural Controller for Photovoltaic Systems on FPGA Circuit // WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, V9, 2014.

8. *Naoufel Khaldi, Hassan Mahmoudi, Malika Zazi, Youssef Barradi.* The *MPPT* control of PV system by using neural networks based on Newton Raphson method // 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 17–19 Oct. 2014, Ouarzazate, Morocco.

9. *R. Ramaprabha, B.L. Mathur, M. Sharanya*. Solar array modeling and simulation of *MPPT* using neural network, 2009 International Conference on Control, Automation // Communication and Energy Conservation, 4–6 June 2009, Perundurai, Tamilnadu, India

10. Loubna Bouselhama, Mohammed Hajjia, Bekkay Hajji, Hicham Boualia, A new *MPPT*-based *ANN* for photovoltaic system under partial shading conditions // Energy Procedia, 2017. V111, pp. 924–933.

11. *Jobeda J Khanam, Simon Y Foo*. Modeling of a photovoltaic array in MATLAB simulink and maximum power point tracking using neural network // Electrical & Electron-

ic Technology Open Access Journal, 2018. V2, #2, pp. 40–46.

12. http://www.aast.edu/en/openfiles/opencmsfiles/pdf_retreive_cms.php?disp_unit=351/Hatem%20Diab-Thesis.pdf

13. *L. Bouselham, M. Hajji, B. Hajji and H. Bouali.* A New *MPPT*-based *ANN* for Photovoltaic System under Partial Shading Conditions, // Energy Procedia 2017. V111, pp. 924–933.

14. *MA. Islam and MA. Kabir.* Neural network based maximum power point tracking of photovoltaic arrays, // TENCON IEEE region 10 conf; 2011. pp. 79–82.

15. *Z. Salam, J. Ahmed and B.S. Merugu.* The application of soft computing methods for *MPPT* of PV system: A technological and status review // Applied Energy 2013, 107, pp. 135–148.

16. *M. Horan, B. Soon, T.K. Rahmani, R. Oo., A.M.T., S. Mekhilef, A. Stojcevski.* State of the art artificial intelligence-based *MPPT* techniques for mitigating partial shading effects on PV systems – A review // Renew. Sustain. Energy Rev. 2016. V64, pp. 435–455.

***Мурад Талби (Mourad Talbi)**, Ph.D. Доцент кафедры электротехники в Центре исследований и технологий энергетики Борж-Седрии, Тунис. Имеет разрешение от государства на управление исследованиями и научное руководство*

***Навель Менсия (Nawel Mensia)**, Ph.D. (2011) Доцент кафедры электротехники в Центре исследований и технологий энергетики Борж-Седрии, Тунис. Область научных интересов включает применение передовых методов управления в фотоэлектрических системах*

***Хатем Эззауйя (Hatem Ezzaouia)**, Ph.D. С 2015 года директор полупроводниковой лаборатория, наноструктуры и передовых технологий, Борж-Седрия, Тунис*

Acuity Brands объединяется с *Violet Defense* и *PURO Lighting*, чтобы расширить портфель продуктов для УФ-обеззараживания

Acuity Brands заключила стратегические соглашения с *Violet Defense* и *PURO Lighting*, которые предоставят *Acuity Brands* доступ к запатентованной УФ-технологии *Violet Defense* для расширения своего портфеля среств для УФ-обеззараживания, а *PURO* и *Acuity Brands* будут работать вместе над разработкой следующего поколения средств для УФ-облучения. В продукции *Violet Defense* и *PURO* используется метод, впервые разработанный *Violet Defense* для высокоинтенсивного облучения широкополосным УФ излучением с использованием импульсной ксеноновой лампы и пропускающей УФ-излучение линзы в обезлюженных местах, для быстрого уничтожения бактерии и инактивации вирусов. Независимые клинические испытания подтвердили, что облучатели с импульсными ксеноновыми лампами могут существенно снижать патогенную нагрузку.

Компактность облучателей обеих компаний для УФ-обеззараживания делает их незаметными при установке на потолке и более простыми в применении, чем многие традиционные УФ-решения.

«Клиенты прямо сейчас крайне заинтересованы в поиске средств УФ-обеззараживания согласно разным требованиям и бюджетам, что даёт прекрасную перспективу предоставлять эффективные решения», – сказал Р. Раннвин, старший вице-президент *Acuity Brands Lighting*. – «Эти соглашения с *Violet Defense* и *PURO* позволяют добавлять нам новые возможности в наш портфель, используя мощную технологию, которая даст нашим клиентам дополнительный уровень защиты от патогенов».

ledinside.com
13.10.2020

Облучение УФ-диодами может предотвращать потерю костной и мышечной массы

Снижение плотности костей (остеопороз) и потери мышечной массы и силы (саркопения) – возрастные нарушения. Хотя существуют некоторые средства от остеопороза, эффективного лечения саркопении нет.

Витамин *D*, который вырабатывается при воздействии солнечного света на кожу, необходим для здоровья костей и мышц, помогая предотвращать остеопороз и саркопению. Однако доступность солнечного света зависит от таких факторов, как географическая широта, время года, погода и мобильность пациентов, что затрудняет получение витамина *D* только из солнечного излучения. И действительно, у многих пожилых людей наблюдается дефицит витамина *D*.

Исследователи из Высшей школы медицины Университета Нагои нашли, что облучение УФ-диодами может быть постоянным и стабильным источником витамина *D*.

В своём исследовании команда сначала провела эксперименты, чтобы определить минимальные уровень и дозу УФ-диодного облучения, обеспечивающие достаточное количество витамина *D* с лишь с небольшими побочными эффектами. Минимальная облучённость составила 0,16 мВт/см^2, а минимальная доза – 1000 Дж/м^2.

Результаты показали, что уровни витамина *D* в сыворотке, плотность костей, мышечная масса и сила у мышей с ускоренным старением, облучённых УФ-диодами, увеличились по сравнению с таковыми у мышей, которые не были облучены. Исследователи также подтвердили, что излучение УФ-диодов не повреждает кожу мышей. Таким образом, они пришли к выводу, что облучение узкополосными УФ-диодами с минимальными интенсивностью и дозой может безопасно и адекватно снабжать витамином *D* стареющих мышей.

Команда сейчас разрабатывает небольшое носимое устройство для облучения УФ-диодами и считает, что его можно использовать в медицинских учреждениях и дома. С помощью такого устройства все пожилые люди смогут получать достаточное количество витамина *D*, такое же или большее, чем от солнечного света, простым и безопасным способом по низкой цене.

ledinside.com
16.10.2020

Оптимизация поляризационного нефелометра

В.Г. ОШЛАКОВ, А.П. ЩЕРБАКОВ

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск
E-mail: oshlakov@iao.ru

Аннотация

Приведён анализ влияния параметров поляризационного нефелометра на точность измерения матрицы рассеяния неизотропной среды. Рассмотрены ошибки аппроксимации реальных рассеивающего объёма и пучка излучения элементарным рассеивающим объёмом и элементарным пучком излучения. Предложена формула расчёта базы нефелометра. Показано, что требования к источнику излучения[1] поляризационного нефелометра – монохроматичность и высокие интенсивность и направленность излучения в широком спектральном диапазоне – могут удовлетворяться набором светодиодов высокой яркости с излучающим (светящим) телом малого размера. Описан 5-волновой монохроматический источник излучения (с потоком излучения 0,15–0,6 Вт), необходимый для поляризационного нефелометра. Показана конструкция малогабаритных поляризационных блоков управления фазовыми элементами.

Представлена электронная схема блока управления излучателем[1], построенного на основе управляющего двигателем 8-разрядного микроконтроллера семейства *AVR-Atmega*, с обратной связью, реализованной посредством инкрементального датчика угловых перемещений и программного ПИД-регулятора[2]. Точность и плавность движения излучателя обеспечиваются стандартной математикой числового программного управления сервоприводами и применением прецизионных редукторов. Система предусматривает как автономную настройку реперных положений излучателя, так и настройку при помощи команд от персонального компьютера. При разработке программ для компьютера и для микроконтроллера использовалось свободное программное обеспечение, позволяющее переносить программы на операционные системы *Windows-7(10), Linux* и *embedded Linux*. Связь между системой управления положением излучателя и персональным компьютером реализована с помощью стандартного помехоустойчивого интерфейса *USB-RS485*.

Ключевые слова: поляризация, нефелометр, неизотропный рассеиватель, матрица рассеяния, элементарный объём, элементарный световой пучок, ошибка аппроксимации, светодиод, инкодер, микропроцессор, прецизионное управление положением, двигатель, силовой мост, широтно-импульсная модуляция, ПИД-регулятор.

[1] **Внимание:** по светотехнической терминологии, «источник излучения» (ИИ) в статье означает «облучатель» или «облучательный прибор», а «излучатель» – «источник излучения». – Прим. ред.

[2] Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор.

Введение

Матрица рассеяния D_{mn}, $m, n = \overline{1, 4}$, связывает векторы Стокса падающего ($\mathbf{S}_s$) и рассеянного ($\mathbf{S}$) излучений малым объёмом dv под углом φ относительно падающего излучения (рис. 1). Матрица рассеяния оптического излучения используется в задачах распространения оптических волн, лазерного зондирования, поляризационной фильтрации и др. На важность и сложность создания прибора, автоматически измеряющего матрицу D_{mn}, $m, n = \overline{1, 4}$, указано в [1]. Модуляционный метод измерения вектора Стокса [2, 3] не применим в лазерном зондировании. Теоретические исследования [4, 5] показали, что в случае изотропной среды можно априори указывать равные и нулевые элементы матрицы D. В измерениях её [2, 3] используются эти исследования, поэтому методика [2, 3] применима лишь к изотропным средам.

Методика измерения матрицы D любой среды, предложенная в [6, 7], применима также в лазерном зондировании. Точность измерений при этом зависит от монохроматичности излучения и точности установки быстрой оси (БО) фазового элемента (ФЭ) в пространстве.

Многоволновые монохроматические источники излучения (ИИ) высокой интенсивности, необходимые при поляризационных измерениях, можно создавать на светодиодах (СД) высокой яркости. Точностные характеристики поляризационного измерителя (поляризационного нефелометра) матрицы D зависят от его линейных размеров и параметров (линейных и угловых) пучка излучения (ПИ) ИИ. Рассеивающий объём поляризационного нефелометра и ПИ должны быть элементарными, однако определения их известны качественные, и потому в статье рассмотрена аппроксимация реальных рассеивающего объёма и ПИ.

Оптимизация размеров поляризационного нефелометра

Запишем вектор Стокса $\mathbf{S}$ в виде

$$\mathbf{S} = \left(I\ Q\ U\ V\right)^{\mathrm{T}}, \tag{1}$$

где T – знак транспонирования. Тогда вектор Стокса, $d\mathbf{S}(i) = \left(dI(i)\ dQ(i)\ dU(i)\ dV(i)\right)^{\mathrm{T}}$, излучения, рассеянного малым объёмом dv (рис. 1), находящимся в некоторой точке i рассеивающей среды, в точке наблюдения, удалённой от него на расстоянии $r(i)$, может быть выражен как [1]

$$d\mathbf{S}(i) = \frac{1}{r^2(i)} D\left(\varphi(i), \mathbf{l}_s(i), \mathbf{l}(i)\right) \mathbf{S}_s(i)\, dv, \tag{2}$$

где $\mathbf{S}_s(i) = \left(I_s(i)\ Q_s(i)\ U_s(i)\ V_s(i)\right)^{\mathrm{T}}$ – вектор Стокса облучающего малый объём dv ПИ с определяемой направляющим вектором $\mathbf{l}_s(i)$ осью распространяющегося в пределах малого телесного угла $\Delta\Omega_s(i)$; $d\mathbf{S}(i)$ – вектор Стокса ПИ рассеянного излучения с определяемой направляющим век-

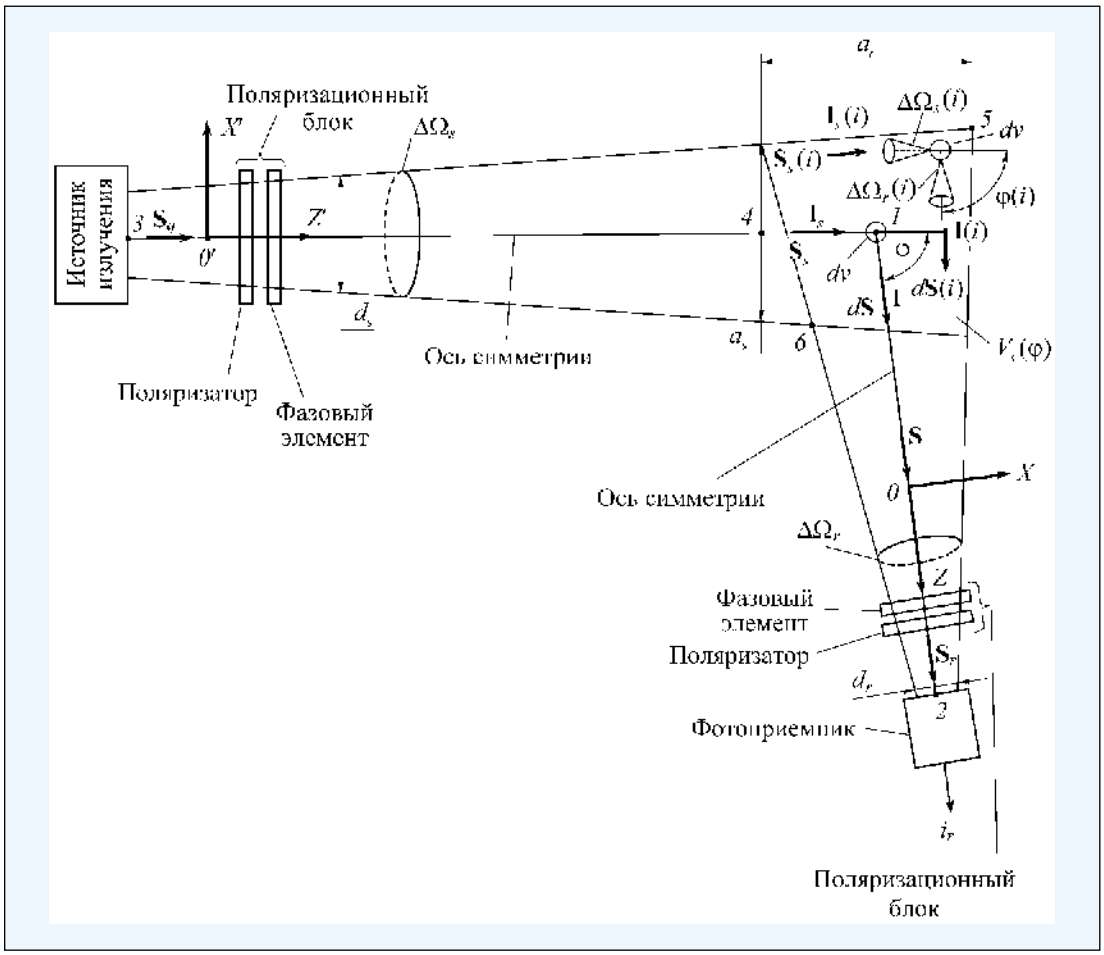


Рис. 1. Схема гониометра поляризационного нефелометра

тором $\mathbf{I}(i)$ осью, распространяющегося в пределах малого телесного угла $\Delta\Omega(i)$; $\varphi(i)$ – угол между векторами $\mathbf{I_s}(i)$ и $\mathbf{I}(i)$. Будем придерживаться обозначений параметров вектора Стокса $\mathbf{S}$, как это принято в [6, 7]: I, Q, U, V.

В случае неизотропной среды элементы матрицы $D(\varphi(i), \mathbf{I_s}(i), \mathbf{I}(i))$ есть функции положения плоскости рассеяния, определяемой векторами $\mathbf{I_s}(i)$ и $\mathbf{I}(i)$, и угла $\varphi(i)$. Для измерения матрицы $D(\varphi, \mathbf{I_s}, \mathbf{I})$ в открытом интервале $\varphi = (0^o, 180^o)$ применяется поляризационный нефелометр, построенный по схеме гониометра [2, 3] (рис. 1). ИИ создаёт ПИ диаметром d_s (диаметр – здесь наибольший размер поперечного сечения) и расходимостью $\Delta\Omega_s$. Распространяясь, излучение проходит последовательно поляризационный блок (ПБ) ИИ, состоящий из поляризатора и ФЭ. Излучение должно быть в максимальной степени монохроматическим, чтобы разность хода ортогональных компонент излучения на выходе ФЭ была величиной постоянной. Фотоприёмник с диаметром входного зрачка $d_г$ и углом поля зрения $\Delta\Omega_г$, принимает излучение, проходящее последовательно ФЭ и поляризатор ПБ. Оси симметрии ПИ ИИ и поля зрения фотоприёмника задаются направляющими векторами $\mathbf{I_s}$ и $\mathbf{I}$ соответственно. Оси симметрии пересекаются в точке *1*, фотоприёмник должен вращаться вокруг оси, проходящей через эту точку и перпендикулярной плоскости, определяемой векторами $\mathbf{I_s}$ и $\mathbf{I}$. Угол φ между этими векторами определяет угол рассеяния матрицы $D(\varphi, \mathbf{I_s}, \mathbf{I})$, а векторы – плоскость рассеяния. В [8, 9] один фотоприёмник, вращающийся вокруг оси, заменялся пятью фотоприёмниками, установленными под разными углами φ.

Сумма расстояний между точками 1, 2 (A_r) и 1, 3 (A_s) называется базой (A) нефелометра.

Параметры некоторых нефелометров, применявшихся в экспериментах в изотропной атмосфере, приведены в табл. 1, из которой видно, что нефелометры весьма различны по параметрам A, $d_г$ и d_s.

Границы применимости этих нефелометров относительно параметров атмосферы недостаточно обсуждались. Недостаточно обсуждался и вопрос оптимизации параметров нефелометра с точки зрения улучшения его точностных характеристик.

В описании нефелометров используются понятия элементарный объём $V_{s\,el}(\varphi)$ и элементарный ПИ, как идеализации реальных объёма $V_s(\varphi)$ и ПИ. Однако точность аппроксимации последних их объёмом $V_{s\,el}$ и элементарным ПИ не обсуждалась.

Таблица 1

Параметры нефелометров, применявшихся при исследовании атмосферы

Параметр	Источник информации		
	[2]	[8]	[9]
База A, м	8	0,58	0,58
d_s, м	0,2	0,03	0,03
$d_г$, м	0,1	0,03	0,03
Расходимость пучка излучения источника излучения	40′	40′	40′
Угол поля зрения фотоприёмника	2–4°	3°	3°

Рассеивающий объём $V_s(\varphi)$ (рис. 1) ограничен боковыми поверхностями ПИ ИИ и угла поля зрения фотоприёмника и характеризуется диаметрами сечений этих ПИ (a_s) и поля зрения ($a_г$).

Для малого объёма dv в точке *1* уравнение (2) имеет вид

$$d\mathbf{S} = \frac{1}{A_г^2} D\left(\varphi, \mathbf{I}_s, \mathbf{I}\right) \mathbf{S}_s \, dv. \qquad (3)$$

Введём правые системы координат XYZ и $X'Y'Z'$, причём оси XZ и $X'Z'$ лежат в плоскости рассеяния, определяемой векторами $\mathbf{I_s}$ и $\mathbf{I}$, которые одновременно – направляющие векторы осей Z' и Z соответственно. Будем определять векторы $\mathbf{S}_s$ и $d\mathbf{S}$ относительно, соответственно, осей X' и X.

Задача поляризационного нефелометра – определение элементов матрицы $D(\varphi, \mathbf{I_s}, \mathbf{I})$ в абсолютных единицах, удовлетворяющих уравнению (3). Объём dv должен быть достаточно большим, чтобы считать, что в нём представлен полный набор всех частиц, характерных для данной среды. В случае хорошо перемешанного «чистого» воздуха, содержащего вблизи земной поверхности аэрозольные частицы размером в несколько микрометров, объём dv можно принять равным нескольким кубическим сантиметрам. То же самое справедливо и для умеренно плотных, но устойчивых слоистообразных облаков. Однако в случае плотных кучевых облаков достаточно объёма и в 1 см^3, чтобы надёжно определять функцию распределения частиц по размерам и их концентрацию [10]. Малый объём dv – это объём рассеивающей среды, содержащий генеральную совокупность частиц.

Пусть в объёме $V_s(\varphi)$ содержится N малых объёмов dv и пусть в каждом i-ом объёме dv есть некая точка i, к которой привязаны свои правые системы координат $X(i)Y(i)Z(i)$ и $X'(i)Y'(i)Z'(i)$. Оси $Y(i)$ и $Y'(i)$ перпендикулярны плоскости рассеяния в точке i i-го объёма dv, которая определяется векторами $\mathbf{I_s}(i)$ и $\mathbf{I}(i)$, совпадающими с осями ПИ облучающего и рассеянного излучений i-го объёма dv соответственно. Оси $Z(i)$ и $Z'(i)$ совпадают по направлению, соответственно, с векторами $\mathbf{I}(i)$ и $\mathbf{I_s}(i)$. Векторы $\mathbf{S}_s(i)$ и $d\mathbf{S}(i)$, соответственно, падающего и рассеянного излучений i-го объёма dv определяются, соответственно, относительно осей $X'(i)$ и $X(i)$.

Расстояние $A_г$ должно всегда превышать не менее чем в 5 раз диаметр любого сечения объёма $V_s(\varphi)$ плоскостью, перпендикулярной оси поля зрения фотоприёмника [11]. Кроме того, ПБ фотоприёмника не должен попадать в объём $V_s(\varphi)$. Если потребовать, чтобы расстояние между точками *1*, *6* объёма $V_s(\varphi)$ было не больше величины $A_г$ при угле

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_{\min}, & \text{при} \quad \varphi_{\min} < 10°, \\ 10°, & \text{при} \quad \varphi_{\min} > 10°, \end{cases}$$

где $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ – интервал углов измерения матрицы D, то мы удовлетворим этому условию. Следовательно, должно выполняться условие

$$A_г > \frac{dr}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}, \qquad (3, a)$$

где также $\varphi = \begin{cases} \varphi_{\min}, & \text{при} \quad \varphi_{\min} < 10°, \\ 10°, & \text{при} \quad \varphi_{\min} > 10°. \end{cases}$

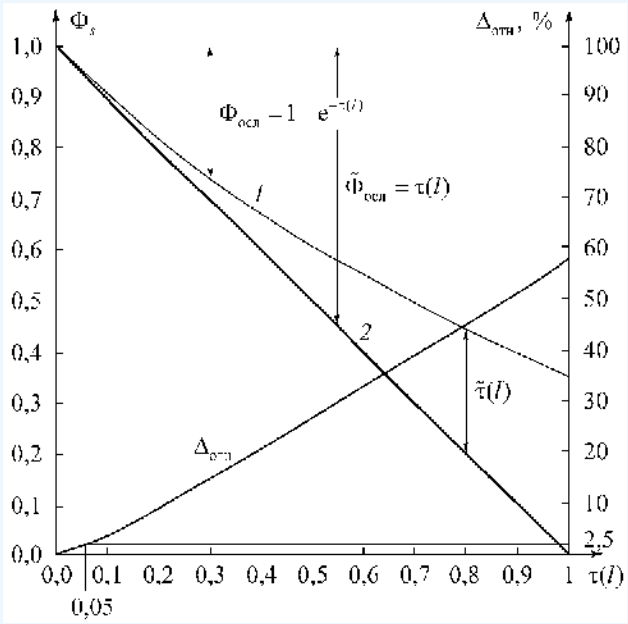


Рис. 2. Ослабление пучка излучения единичной мощности реальным объёмом $V_s(\varphi)$ (*1*) и элементарным объёмом $V_{s\,el}(\varphi)$ (*2*) и относительная ошибка аппроксимации элементарного объёма реальным объёмом $\Delta_{отн}$ (%)

Предполагается, что при $V_s(\varphi) \le V_{s\,el}(\varphi)$ на расстоянии $A_г$, удовлетворяющем (3, *a*), с учётом (3) можно выразить $\mathbf{S}$ с малой погрешностью:

$$\mathbf{S} \cong \frac{1}{A_г^2} \int\limits_{V_s(\varphi)} D(\varphi, \mathbf{I}_s, \mathbf{I}) \mathbf{S}_s(i) \, dv \cong \frac{1}{A_г^2} D(\varphi, \mathbf{I}_s, \mathbf{I}) \mathbf{S}_s V_s(\varphi), \qquad (4)$$

где $D(\varphi, \mathbf{I_s}, \mathbf{I})$, $\mathbf{S}_s(i)$ и $\mathbf{S}_s$ – матрица рассеяния объёма dv, вектор Стокса облучающего его ПИ и вектор Стокса ПИ, облучающего объём $V_s(\varphi)$ соответственно.

Выражение (4) справедливо, когда интенсивность падающего на объём $V_s(\varphi)$ излучения остаётся почти неизменной в его пределах. В объёме $V_{s\,el}(\varphi)$ количества поглощённого и рассеянного излучений пропорциональны его размеру [12]. Распространение излучения в рассеивающей среде сопровождается появлением многократного рассеяния. В излучении, падающем на объём $V_s(\varphi)$, доля многократно рассеянного излучения должна быть пренебрежимо мала по сравнению с прямым излучением. Изотропная среда может характеризоваться показателем ослабления $k_\lambda = \alpha_\lambda + \sigma_\lambda$, где α_λ – показатель поглощения, σ_λ – показатель рассеяния. В этом случае оптические толщины $\tau(A_s) = k_\lambda A_s$ и $\tau(a_г) = k_\lambda a_г$ не должны превышать 5–6 [1].

Рассмотрим аппроксимацию объёма $V_s(\varphi)$ изотропной среды объёмом $V_{s\,el}(\varphi)$.

Поток излучения Φ_s единичной мощности после пройденного расстояния l уменьшается на величину $\Phi_{осл}$:

$$\Phi_{осл} = 1 - e^{-\tau(l)} = \Phi(l) - \frac{\tau(l)^2}{2!} + \frac{\tau(l)^3}{3!} - \ldots$$

$$\ldots - \frac{\left(-\tau(l)\right)^n}{n!} = \tau(l) - \tilde{\tau}(l), \qquad (5)$$

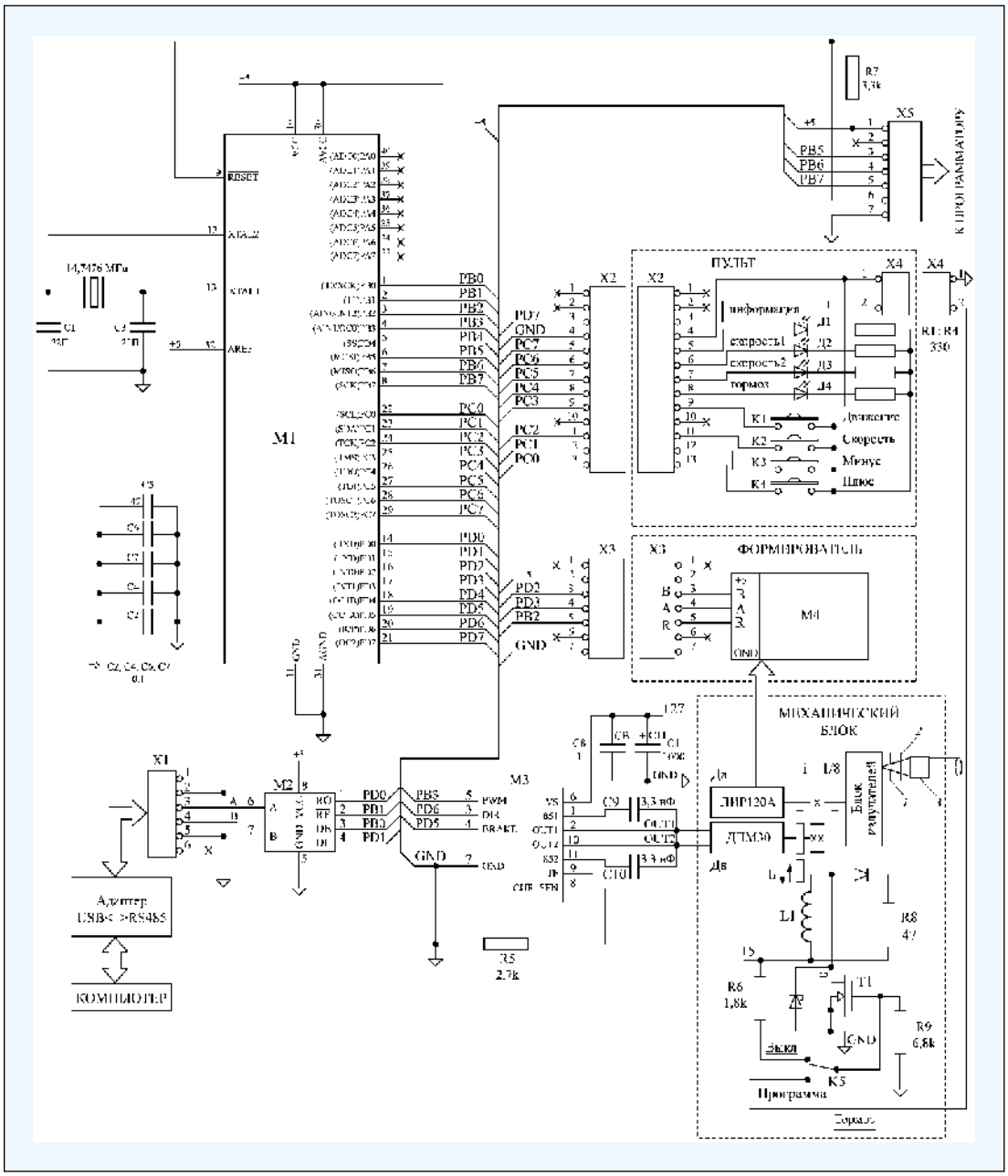


Рис. 3. Структурная схема источника излучения; *1* – диафрагма ∅ 0,5; *2* – деполяризатор; *3* – объектив ГЕЛИОС-44–2; T1 – RLU120; M1 – ATmega16; M2 – MAX 485; M3 – LMD18200

где $\tau(l) = k_\lambda l,\ \tilde{\tau}(l) = \dfrac{\tau(l)^2}{2!} - \dfrac{\tau(l)^3}{3!} + \ldots + \dfrac{\left(-\tau(l)\right)^{\mathrm{n}}}{\mathrm{n}!}.$

Из (5) следует: если оптическая толщина $\tau(a_\mathrm{г})$ (рис. 1) объёма $V_\mathrm{s}(\varphi)$ удовлетворяет условию

$$\tau(a_\mathrm{г}) \gg \tilde{\tau}(a_\mathrm{г}), \qquad (6)$$

то его можно рассматривать с некоторой погрешностью как объём $V_{\mathrm{s\ el}}(\varphi)$. На рис. 2 показано ослабление потока излучения Φ_s единичной мощности объёмом $V_\mathrm{s}(\varphi)$ (линия *1*) и при аппроксимации его объёмом $V_{\mathrm{s\ el}}(\varphi)$ (линия *2*). Относительную ошибку такой аппроксимации $\Delta_\text{отн}$ определим как

$$\Delta_\text{отн} = \frac{\tilde{\Phi}_\text{осл} - \Phi_\text{осл}}{\Phi_\text{осл}}, \qquad (7)$$

где $\tilde{\Phi}_\text{осл} = \tau(l)$ – ослабление потока излучения единичной мощности объёмом $V_{\mathrm{s\ el}}(\varphi)$.

Объём $V_\mathrm{s}(\varphi)$, оптическая толщина которого $\tau(a_\mathrm{г}) = 0{,}05$, может считаться объёмом $V_{\mathrm{s\ el}}(\varphi)$ с ошибкой $\Delta_\text{отн} = 2{,}5$ %.

Этот критерий позволяет определить величину $a_\mathrm{г}$: $a_\mathrm{г} = 0{,}05/k_\lambda$. Объём, толщина $a_\mathrm{г}$ которого для ПИ удовлетворят условию

$$a_\mathrm{г} < 0{,}05/k_\lambda, \qquad (8)$$

может считаться объёмом $V_{\mathrm{s\ el}}$.

Практически в любом объёме $V_\mathrm{s}(\varphi)$ достаточно гомогенной среды число рассеивающих и поглощающих центров велико, поэтому условие статистической презентативности элементарного объёма, оптическая толщина которого $\tau(a_\mathrm{г}) = 0{,}05$, выполняется всегда с большой точностью, и потому толщина $a_\mathrm{г}$ объёма dv может быть значительно меньше $0{,}05/k_\lambda$.

Используя формулу Кошмидера, можно (8) переписать в виде

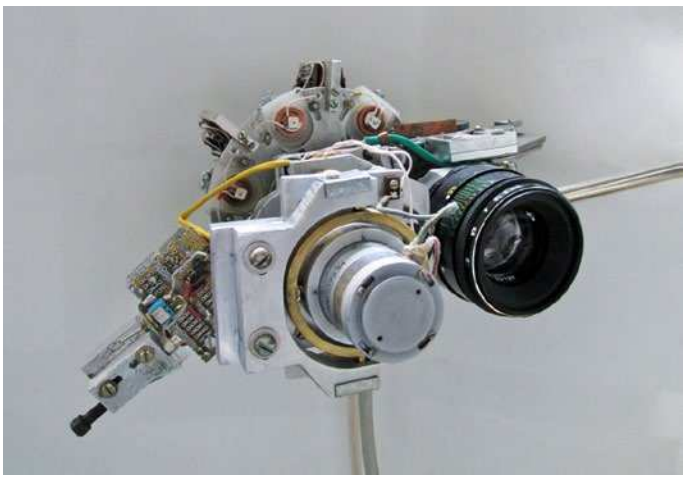


Рис. 4. Источник излучения

$$a_{\text{г}} = 0{,}013 L_{\text{МДВ}}, \tag{9}$$

где $L_{\text{МДВ}}$ – метеорологическая дальность видимости.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ. Матрица $\tilde{D}_{mn}$, $m, n = \overline{1, 4}$, измеренная поляризационным нефелометром, является матрицей D_{mn}, $m, n = \overline{1, 4}$ среды, если в объёме $V_{\text{s}}(\varphi)$ плоскости рассеяния всех малых объёмов dv, определяемых векторами $\mathbf{I}_{\text{s}}(i)$ и $\mathbf{I}(i)$, параллельны, а углы $\varphi(i)$ между ними равны.

Это предложение удовлетворятся при следующих условиях:

1. Рассеивающий объём $V_{\text{s}}(\varphi)$ стянут до объёма dv в точке *1*.

2. ПИ ИИ на длине $a_{\text{г}}$ можно аппроксимировать с малой погрешностью элементарным ПИ, а угол поля зрения фотоприёмника в плоскости рассеяния мал.

ПИ с малым относительным изменением энергетической яркости (ЭЯ) на расстоянии $a_{\text{г}}$ можно с малой погрешностью заменить элементарным ПИ. Пусть ПИ ИИ распространяется в телесном угле $\Delta\Omega_{\text{s}}$, тогда ЭЯ L_{s} ПИ, облучающего объём $V_{\text{s}}(\varphi)$, в точке *4* выражается как

$$L_{\text{s}} = \frac{E^{\perp}}{\Delta\Omega_{\text{s}}} = \frac{4I}{\pi a_{\text{s}}^2}, \tag{10}$$

где $E^{\perp}$ – энергетическая облучённость в поперечном сечении ПИ, I – сила излучения.

Относительное изменение ЭЯ δL_{s} на расстоянии $a_{\text{г}}$ определяется как

$$\delta L_{\text{s}} = \frac{L_{\text{s}} - L_{\text{s}}(a_{\text{г}})}{L_{\text{s}}(a_{\text{г}})} = \frac{L_{\text{s}}}{L_{\text{s}}(a_{\text{г}})} - 1, \tag{11}$$

где $L_{\text{s}}(a_{\text{г}})$ – ЭЯ ПИ на расстоянии $a_{\text{г}}$ от точки *4*.

Используя (10), уменьшение ЭЯ $\delta = L_{\text{s}}/ L_{\text{s}}(a_{\text{г}})$ определится в виде

$$\delta = \frac{L_{\text{s}}}{L_{\text{s}}(a_{\text{г}})} = \frac{2\left(a_{\text{s}}/2 + a_{\text{г}}\,\text{tg}\alpha_{\text{s}}\right)^2}{a_{\text{s}}^2} =$$

$$= 1 + \frac{2a_{\text{г}}\,\text{tg}\alpha_{\text{s}}}{a_{\text{s}}}\left(1 + \frac{2a_{\text{г}}}{a_{\text{s}}}\text{tg}\alpha_{\text{s}}\right), \tag{12}$$

где $2\alpha_{\text{s}}$ – угол расходимости ПИ.

С учётом (12)

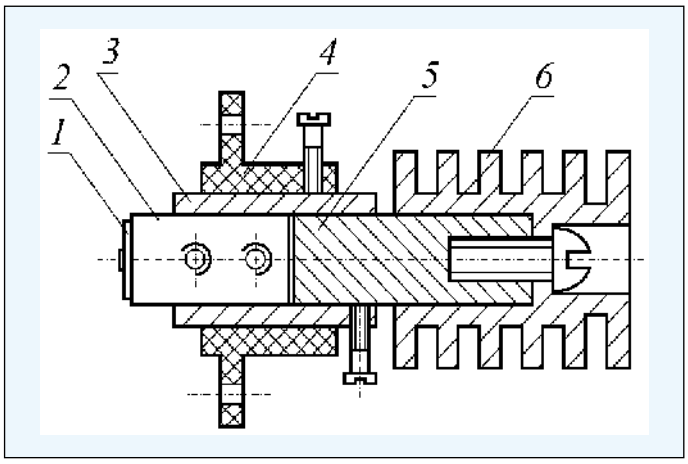


Рис. 5. Схема излучателя: *1* – СД; *2* – теплоотводящий элемент; *3* – цилиндр; *4* – изолятор; *5* – стержень; *6* – радиатор

$$\delta L_{\text{s}} = \frac{2a_{\text{г}}}{a_{\text{s}}}\text{tg}\alpha_{\text{s}}\left(1 + \frac{2a_{\text{г}}}{a_{\text{s}}}\text{tg}\alpha_{\text{s}}\right). \tag{13}$$

Величина δL_{s} характеризует относительное изменение ЭЯ ПИ L_{s} на расстоянии $a_{\text{г}}$ и определяется параметром $\delta\tilde{L}_{\text{s}} = \frac{a_{\text{г}}}{a_{\text{s}}}\text{tg}\alpha_{\text{s}}$. Параллельный ПИ – идеальный представитель элементарного ПИ, и у него параметр $\delta\tilde{L}_{\text{s}} = 0$. На малом расстоянии $a_{\text{г}}$ можно пренебречь незначительной величиной δL_{s} ПИ и считать его на этом расстоянии элементарным ПИ. Можно считать, что погрешность аппроксимации ПИ поляризационного нефелометра длиной $a_{\text{г}}$ элементарным ПИ определяется значением указанного параметра $\delta\tilde{L}_{s}$.

Источник излучения

Идеальный ИИ для поляризационных измерений должен быть монохроматическим, высокоинтенсивным, иметь несколько пиков в широком спектральном диапазоне и, согласно (13), обладать высокой направленностью излучения. В настоящее время имеется большая номенклатура СД высокой яркости, применяемых в разных областях науки и техники [13, 14]. Требования к идеальному ИИ для поляризационных измерений можно удовлетворять набором таких СД с излучающим (светящим) телом малых размеров. На рис. 3 показана структурная схема 5-волнового квазимонохроматического ИИ высокой интенсивности и направленности, а на рис. 4 дан его внешний вид. В качестве генераторов излучения используются СД высокой яркости, основные параметры которых приведены в табл. 2

СД с излучающим телом размером $d_{\text{тя}}$ = 1 мм устанавливается в ИИ на расстоянии 1 мм перед диафрагмой диаметром 0,5 мм. Объектив ГЕЛИОС-44–2 позволяет получать ПИ диаметром d_{s} = 25 мм с расходимостью 0,3°.

Минимальный объём dv чистого воздуха равен нескольким кубическим сантиметрам. Можно принять $d_{\text{г}}$ = 25 мм. Тогда минимальный объём Vs (90°), в нашем случае, можно получить большим 10 см^3. База нефелометра A = 1,2 м и величина A_r = 0,6 м могут обеспечивать измерение матрицы D при $\varphi_{\min}$ = 1,8°. Параметр ПИ $\delta\tilde{L}_{\text{s}}$, ха-

Таблица 2

Основные параметры светодиодов

Тип	Цвет излучения	λ_{max}, нм	Φ, Вт	U, В	I_{max}, мА	$I_{средн}$, мА	$\delta\lambda$, нм/°С	$d_{ит.}$, мм
ИПР169А9С	синий	455	0,6	3,5	700	350	0,17	1
ИПР169А9Л	зелёный	525	0,3	3,5				
ИПР169А9Ж	жёлтый	555	0,15	2				
ИПР162А9Ж	оранжевый	590	0,15	2				
ИПР169А9К	красный	625	0,28	2				

рактеризующий погрешность аппроксимации ПИ элементарным ПИ, изменяется от 0,0025 (при φ = 90°) до 0,013 (при φ = 180°).

Схема монтажа СД показана на рис. 5. СД *1* припаян к теплоотводящему элементу *2* (медная пластина толщиной 0,5 мм), который зажат винтами в пазу медного стрежня *5*. Продольное движение стержня *5* происходит в медном цилиндре *3*. Продольное движение цилиндра *3* происходит в изоляторе из капролона *4*. Радиатор *6* увеличивает теплоотвод от СД. Источником питания СД служит эмиттерный стабилизатор напряжения на транзисторе с большим коэффициентом β.

Блок излучателей представляет собой диск диаметром 150 мм, вращающийся вокруг оси, с размещёнными по окружности пятью излучателями по рис. 5 и пятью источниками питания, и обдуваемый снизу микровентилятором. Нужный СД подводится к диафрагме *1* (рис. 3) двигателем ДВ через безлюфтовый редуктор. После установки СД вращение диска с излучателями и источниками питания может быть заторможено упором бегунка Б в обрезиненный диск. Угол поворота диска вокруг оси вращения измеряется преобразователем ЛИР120А, который отображает его количеством импульсов относительно импульса R. Импульсы B, A, R с датчика ЛИР120А поступают на магистральный приёмник М4 на микросхеме 555ИП11 и далее через разъём Х3 на микропроцессор М1 Atmega16. Управление двигателем осуществляется драйвером М3 LMD18200. Программа в микропроцессор М1 записывается через разъём Х5. Программное обеспечение микроконтроллера М1 реализует функцию сервопривода, в котором роль датчика выполняет угловой преобразователь М3 ЛИР120А, а функцию силового моста выполняет драйвер LDM18200. Обратная связь сервопривода работает по принципу ПИД-регулятора, вычисляющего скорость и направление движения в зависимости от разности между текущей координатой и требуемой. Благодаря этому текущая координата всегда стремится к требуемой. В свою очередь, требуемая координата, а точнее связанная с ней переменная, при выполнении команды движения, меняется по математическому закону, обеспечивающему плавный старт электропривода и его плавное торможение до нулевой скорости в точке окончания движения. Уровни ускорения и торможения электропривода задаются отдельной переменной в программе микроконтроллера. Плавные ускорение и торможение и обратная связь координат с помощью ПИД-регулятора обеспечиваются стандартной математикой числового программного управления (ЧПУ).

Рис. 6. Поляризационный блок

Управление ИИ может осуществляться как с персонального компьютера, так и с пульта. Передача управляющих команд с персонального компьютера осуществляется через разъём Х1 и микросхему М2 MAX485.

Пульт позволяет плавно перемещать положение излучателя, используя три градации скорости. Перемещение с большой скоростью позволяет быстро перемещать привод на нужный угол. Низкая скорость позволяет более точно юстировать положение излучателя. Имеется также команда начальной настройки системы координат излучателя, по реперному импульсу выхода R углового преобразователя ЛИР120А. Пульт управления также позволяет записывать во внутреннюю память микроконтроллера координату текущего положения привода, чтобы иметь возможность в любой момент перехода в эту точку. Таких записанных положений может быть до 5. С помощью команд с пульта управления можно в любой момент переходить в любую из 5 записанных во внутренней памяти точек.

Программа управления с персонального компьютера имеет те же самые возможности, которые обеспечивает встроенный пульт управления. Кроме того, командами с компьютера можно устанавливать положение излучателя непосредственно на нужный угол с точностью, которую обеспечивает угловой преобразователь ЛИР120А – 0,009°.

Вместо механического блока может быть подключён ПБ (рис. 6). Управление положением БО фазового элемента ПБ аналогично описанному выше.

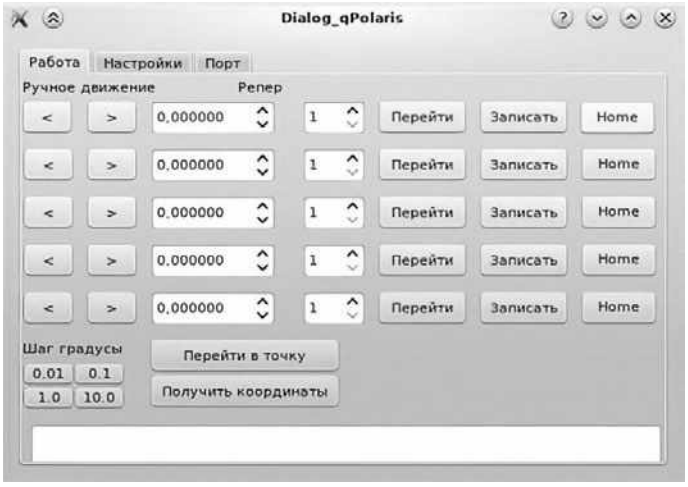


Рис. 7. Пример работы компьютерной программы для управления пятью излучателями

Компьютерная программа позволяет совместно управлять несколькими (до пяти) устройствами вроде механического блока и ПБ. Она имеет три диалоговые вкладки – «Работа», «Настройки», «Порт» (рис. 7). Две последние из них, соответственно, содержат разные настройки, включая порт связи, разрешающую способность позиционирования, пока единую для всех осей движения, и предельную скорость. На рис. 7 показана диалоговая вкладка команд управления движением. В этом окне видны пять горизонтальных массивов клавиш и текстовых полей, расположенных в одну «строку». Каждая такая группа элементов связана с управлением одним из пяти излучателей.

Компьютерная программа написана на языке C++ с помощью открытого программного обеспечения *QtCreator* версии 4. Этот инструмент содержит свободный компилятор GCC-4.7 и популярную свободную интерфейсную библиотеку *Qt* версии 4. Такое решение позволяет не только писать программы с современным интерфейсом пользователя, но и скомпилировать их под любую платформу, включая *Windows* и *Linux*, для которой в сети Интернет есть собранная библиотека *Qt*. Таким образом, программа может без изменений быть скомпилирована даже для большинства т.н. «встраиваемых» (*embedded*) промышленных компьютеров, если для них есть библиотека *Qt-embedded 4.0* или *5.0*.

Заключение

Материал статьи позволяет определять основные параметры высокоинтенсивного квазимонохроматического ИИ поляризационного нефелометра, измеряющего матрицу D в интервале углов $\varphi = [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$, а также его конструктивные особенности и принцип работы. Внешний вид ПБ характеризует конструкцию блока высокоточного управления ФЭ.

Благодарности

Авторы выражают признательность начальнику отдела ОАО «НИИ ПП» Н.Н. Бакину за консультации по применению современных СД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прожекторный луч в атмосфере: Исследования по атмосферной оптике / Ю.С. Георгиевский, А.Я. Дривинг, Н.В. Золотавина и др.; Под общ. ред. проф. Г.В. Розенберга. – М.: Изд. АН СССР, 1960. – С. 146–174.

2. *Горчаков Г.И., Розенберг Г.В.* Измерение матрицы рассеяния света в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1965. – Т. 1, № 12. – С. 1279–1287.

3. *Горчаков Г.И.* Матрицы рассеяния света приземным воздухом // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1966. – Т. 11, № 6. – С. 593–605.

4. *Perrin F.* Polarization of light scattered by isotropic opalescent media // J. Chem. Phys. – 1942. – Vol. 10, No. 7. – P. 415–427.

5. *Ван де Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами; Пер. с англ. Т.В. Водопьяновой / Под ред. В.В. Соболева. – М.: ИИЛ, 1961. – 536 с.

6. *Ошлаков В.Г.* Оптимальный измеритель матрицы рассеяния // Оптика атмосферы и океана. – 1992. – Т. 5, № 11. – С. 1190–1193.

7. *Ошлаков В.Г., Борков Ю.Г.* Численный анализ аппаратной матрицы поляризационного измерителя // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 7. – С. 635–640.

8. *Сидоров В.Н.* Проточный поляризационный нефелометр // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1979. – Т. 15, № 7. – С. 763–768.

9. *Лукшин В.В., Исаков А.А.* Оптические характеристики дымовых аэрозолей // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 24, № 3. – С. 250–257.

10. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 165 с.

11. *Гуревич М.М.* Фотометрия: теория, методы и приборы. – Л.: Энергоатомиздат, ЛО, 1983. – 268 с.

12. *Иванов А.П.* Оптика рассеивающих сред. – Мн.: Наука и техника, 1969. – 592 с.

13. *Росато А., Скорпио М., Сибилио С., Чампи Дж.* Установка для измерения фотометрических характеристик ряда светильников со светодиодами // Светотехника. – 2017. – № 1. – С. 43–48.

14. *Берген Э.* Фотометрия осветительных приборов со светодиодами // Светотехника. – 2017. – № 4. – С. 14–18.

Ошлаков Виктор Григорьевич, *кандидат физ.-мат. наук. Старший научн. сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Область научных интересов: поляриметрия, поляризационная фильтрации, активная локация, распространение поляризованного излучение в среде, физика аэрозолей и электронная техника*

Щербаков Анатолий Петрович, *кандидат физ.-мат. наук. Старший научн. сотрудник Лаборатории молекулярной спектроскопии Отделения спектроскопии атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Область научных интересов: молекулярная спектроскопия, автоматизация обработки измерений*

Оптимизация фасада учебного корпуса с использованием многокритериальных эволюционных алгоритмов[1]

А. АГИРБАС, Э. АЛАКАВУК

Факультет архитектуры, университет Ясар, Измир, Турция
Email: arda.agirbas@yasar.edu.tr, ebru.alakavuk@yasar.edu.tr

Аннотация

Дизайн архитектуры фасада как с эстетической точки зрения, так и с точки зрения распределения естественного света внутри самого здания необходимо рассматривать как комплексную задачу. В данном исследовании авторами реализуется многокритериальный эволюционный алгоритм формального процесса исследования во время реконструкции фасада учебного здания. Целью данного исследования является создание конфигурации фасада с учётом размеров и расположения его элементов и материалов, из которых они изготовлены, одновременно формируя правильное распределение естественного освещения внутри самого здания. В качестве частных критериев оптимальности рассматриваются общие затраты на строительство фасада и распределение естественного освещения внутри здания. Постановка задачи включает в себя два противоречивых частных критериев оптимальности, которые заключаются в увеличении распространения естественного света на каждом этаже, но при этом снижении общей стоимости строительства фасада. Для того, чтобы на основе Парето-аппроксимаций построить Парето-фронт, в том числе найти недоминируемые решения, был использован быстрый и элитарный многокритериальный генетический алгоритм (*NSGA-II*). Вычислительные и архитектурные результаты показывают, что *NSGA-II* достаточно эффективен, чтобы продемонстрировать приемлемые альтернативные варианты проектирования фасадов.

Ключевые слова: проектирование фасада, многокритериальная оптимизация, проектирование учебного корпуса, компьютерное проектирование.

[1] Перевод с англ. Т.В. Мешковой

1. Введение

Процедура архитектурного проектирования часто описывается как довольно сложный процесс, поскольку результат должен одновременно отвечать совершенно различным потребностям людей. Кроме того, процесс проектирования предполагает принятие таких решений по многим параметрам, которые будут соответствовать одновременно максимальному повышению эффективности здания и при этом вписываться в проектные ограничения [1]. Принятые в этом процессе решения существенно влияют на окончательный проект.

В архитектурной дисциплине учебные здания являются одним из наиболее сложных типов строений. Это связано с разнообразием требований к построению пространства в зависимости от типа образования. Наличие всевозможных представителей, материалов, поставщиков и высокой квалификации для оказания услуг создаёт определённые затруднения в управлении проектом [2]. Архитектурное проектирование учебного здания должно отвечать различным видам требований к формированию пространства, предъявляемых к образовательному процессу. Проектирование учебного здания относится к дизайну среды, который включает в себя внутреннюю планировку и дизайн интерьера (например, смежных пространств и их меблировку), естественные качества окружающей среды в помещении (например, освещение) [3] и внешние особенности здания (например, ограждающие конструкции здания, фасадные системы).

При проектировании учебных корпусов системы ограждающих конструкций зданий могут рассматриваться как важные архитектурные элементы, которые вносят существенный вклад [4], поэтому необходимо уже на ранних стадиях провести их тщательный анализ. Наличие естественного освещения в закрытых помещениях может повысить эффективность и качество обучения при одновременном снижении стресса [5]. В работе [6] авторы попытались установить связь между естественным освещением и производительностью людей в рабочих условиях. Автономность естественного освещения [7] была использована в качестве расчётной метрики при моделировании, чтобы построить связь между вероятностным потенциалом естественного света и комфортным освещением для пользователей. Были изучены эффекты изменения размеров окон, ориентации и материала остекления для того, чтобы достичь удовлетворительных значений освещённости. Эксперименты показали, что необходимый уровень освещения может быть достигнут при небольших площадях остеклённого фасада с определённой ориентацией по отношению к Солнцу. В работе [8] авторы продемонстрировали влияние естественного освещения на пользователей наряду с уменьшением энергопотребления искусственного освещения. В работе [9] авторы представили исследование оптимизации системы остекления с учётом максимального полезного действия естественного света при одновременном снижении энергопотребления. Основываясь на литературе, можно утверждать, что методология оптимизации связана с параметрическим компьютерным моделированием для определения конструкции системы остекления.

Целью данной работы является использование параметрических рабочих процессов и методов оптимизации для улучшения конструкции наружного остекления учебного здания. Исследование фокусируется на оптимизации геометрии внешнего фасада здания в Университете Ясар путём настройки расположения и величины элементов для контроля солнечного проникновения и повышения эффективности естественного света при одновременном снижении общей стоимости конструкции. Для исследования этой проблемы будет использован генетический алгоритма недоминируемой сортировки II (*NSGA-II*).

В данном исследовании юго-западный и юго-восточный фасады учебного корпуса в кампусе Университета Ясар спроектированы таким образом, чтобы увеличить использование есте-

ственного освещения внутри здания. Здание расположено в районе Борнова, город Измир, Турция, 38°27 ‘северной широты, 27°12’ восточной долготы и 17 м высоты. Размеры и материалы существующих элементов фасада определяются как переменные процесса принятия решения для анализа естественного света.

В оставшейся части статьи: раздел 2 объясняет параметрическую модель, включающую переменные процесса принятия решения и их влияние на поиск геометрической формы; в разделе 3 описывается постановка задачи с граничными условиями и частные критерии оптимальности; в разделе 4 выделяются ключевые особенности алгоритма, который использовался на протяжении всего исследования; в разделе 5 представлены как вычислительные, так и архитектурные результаты. Наконец, в разделе 6 излагается заключение исследования.

2. Параметрическая модель

Параметрическая модель генерируется в среде параметрического моделирования *Grasshopper*, которая представляет собой плагин, разработанный для программного обеспечения *Rhinoceros 3D*. В этом исследовании мы сосредоточимся на здании в границах кампуса Университета Ясар шириной 50 м и длиной 16 м.

Как показано на рис. 1, облицовка здания включает в себя семь элементов остекления навесного типа. Общая высота здания составляет 5,80 м. Высота элементов остекления фиксируется на уровне 5,80 м, а ширина определяется в качестве переменных процесса принятия решения.

Модель рассматривает осевые линии каждого остекления как относительные средние линии в процессе масштабирования 1-D, так как высота здания фиксирована. Полный перечень исходных размеров каждого элемента остекления представлен в табл. 1.

3. Постановка задачи

3.1. Частные критерии оптимальности

Мы рассматриваем два частных критерия оптимальности: минимизацию стоимости строительства фасадной системы $\left(C_{facade}\right)$ и увеличение

Рис. 1. Изображение остекления

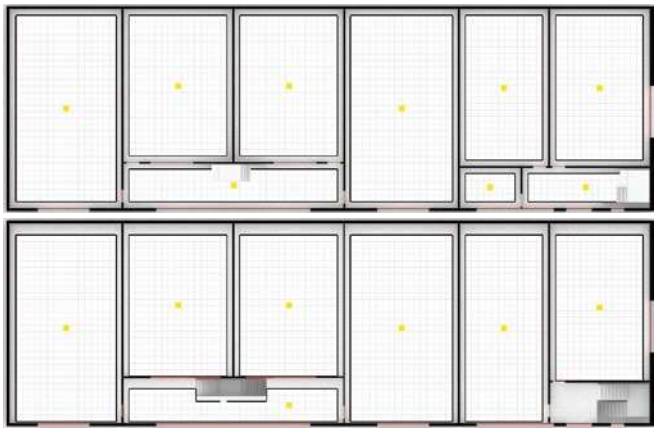


Рис. 2. Изображение измерительных сеток остекления

проникновения естественного света в фойе. Измерительные сетки создаются для каждой комнаты в соответствии с их принадлежностью к этажам, чтобы измерить и оценить эффективность естественного света каждого этажа отдельно. Измерительные сетки показаны на рис. 2. Автономность естественного освещения (*Daylight Autonomy*, далее *AEO*) [10] используется для оптимизации внутреннего распределения естественного света. Обозначения переменных функций приведены в табл. 2. Сформулируем задачу как задачу многокритериальной оптимизации (МКО-задача) следующим образом:

$$Min \cdot \left(\frac{1}{P_{AEO}}, C_{\text{фасад}}\right), \text{ где}$$

$$P_{AEO} = \sum_{i=1}^{n} \begin{Bmatrix} 0, E_i < E_{\text{мин}} \\ 1, E_i \geq E_{\text{мин}} \end{Bmatrix}, \qquad (1)$$

$$C_{\text{фасад}} = C_{\text{остекление}} + C_{\text{стена}}, \qquad (2)$$

где $C_{\text{фасад}}$ – общая стоимость строительства фасада здания, P_{AEO} – эффективность автономности естественного света, $C_{\text{остекление}}$ – общая стоимость остекления, $C_{\text{стена}}$ – общая стоимость наружных стен, $E_{\text{мин}}$ – заданный порог освещённости для оценки эффективности естественного света, E_i – освещённость в контрольной точке в определённый час при условии, что:

$$\text{пространственная } AEO > 50\ \%, \quad (3)$$

где пространственная *AEO* – средняя пространственная автономность естественного освещения.

3.2. Частный критерий оптимальности естественного освещения

AEO рассматривается как метрика для расчёта естественного освещения, упомянутая в [10], которая привела к многочисленным дискуссиям в начале 1900-х гг. Позже именно эта метрика была введена в строительные стандарты и с тех пор стала рассматриваться как часть стандартных критериев для сертификации зданий [11]. *AEO* формулируется как процент годовых дневных часов, в течение которых конкретная точка находится выше заданного уровня освещённости. Для данного исследования определённый порог освещённости ($E_{\text{мин}}$) определяется как 300 лк согласно сертифика-

Таблица 1

Исходная ширина остекления

Обозначения	Ширина, м	Примечание
G_1	4	Ширина остекления № 1
G_2	12	Ширина остекления № 2
G_3	4	Ширина остекления № 3
G_4	6	Ширина остекления № 4
G_5	2	Ширина остекления № 5
G_6	1	Ширина остекления № 6
G_7	4	Ширина остекления № 7

Таблица 2

Обозначения переменных процесса принятия решений с рассматриваемыми диапазонами значений

Обозначения	Тип	Диапазон, м	Примечание
G_1	Действительный	[4; 10]	Ширина остекления № 1
G_2	Действительный	[10; 16]	Ширина остекления № 2
G_3	Действительный	[3; 10]	Ширина остекления № 3
G_4	Действительный	[4; 7,4]	Ширина остекления № 4
G_5	Действительный	[1; 3]	Ширина остекления № 5
G_6	Действительный	[0,6; 1,7]	Ширина остекления № 6
G_7	Действительный	[4; 13]	Ширина остекления № 7

Рис. 3. Схема рабочего процесса

ции лидерства в энергоэффективности и экологическом проектировании *Leadership in Energy and Environmental Design* (*LEED*).

AEO вычисляется с использованием значений, полученных с помощью программы моделирования *Radiance*. Для того чтобы создать рабочий процесс между *Radiance* и *Rhinoceros CAD program*, *DIVA*, которая является плагином для *Grasshopper*, используется для расчёта значений *AEO*. Параметр *AEO* оценивает почасовые значения освещённости для каждой точки измерения по отношению к заданному уровню освещённости с учётом рабочего времени. Для каждого часа присваиваются значения 1 и 0 в зависимости от заданного порогового значения. Часы, превышающие пороговое значение, считаются равными 1, остальным присваивается нулевое значение, и коэффициент определяется с учётом суммирования этих часов и всех рабочих часов в течение года. Для этого исследования рабочее время определяется в интервале с 08:00 утра до 17:00 вечера. Расчёт *AEO* выражается следующим образом:

$$AEO = \sum_{i=1}^{n} \begin{Bmatrix} 0, E_i < E_{\text{мин}} \\ 1, E_i \geq E_{\text{мин}} \end{Bmatrix}. \qquad (4)$$

Так получается, что *AEO* – основной критерий для расчётов естественного освещения. Поскольку расчёт *AEO* включает в себя расчёты прямого солнечного света, это приводит к более точным результатам по сравнению с устаревшими показателями, такими как коэффициент естественной освещённости [11]. Здание имеет две южные стороны, поэтому для расчёта и дальнейшего анализа эффективности естественного освещения более приемлемо использовать параметр *AEO*, поскольку он включает в себя расчёты проникновения прямого солнечного света, а также учитывает локацию самого здания. Для нашего исследования мы определяем измерительную сетку следующим образом: 0,5 м от каждой стены и 0,8 м от уровня пола. Наша частный критерий оптимальности состоит в том, чтобы получить критерий *LEED*, согласно которому будет обеспечиваться минимум на 50 % пространства помещений внутри здания уровень освещённости выше 300 лк в рабочее время в течение всего года [11].

3.3. Частный критерий оптимальности затрат

Как показано в уравнении (5), C_{facade} можно найти в результате сложения общей стоимости строительства стен (C_{wall}) и общей стоимости элементов остекления ($C_{glazing}$). Эти затраты зависят от площади соответствующего элемента в зависимости от удельных затрат на квадратный метр.

$$C_{\text{фасад}} = C_{\text{стена}} + C_{\text{остекление}}, \qquad (5)$$

$$C_{\text{стена}} = C_{\text{ус}} \cdot A_{\text{стена}}, \qquad (6)$$

$$C_{\text{остекление}} = C_{\text{уо}} \cdot A_{\text{остекление}}, \qquad (7)$$

где $A_{\text{стена}}$ – общая площадь остекления внешних стен, $A_{\text{остекление}}$ – общая площадь остекления, $C_{\text{ус}}$ – стоимость единицы стены за кв. м, $C_{\text{уо}}$ – стоимость единицы остекления за кв.м.

3.4. Граничные условия

Как показано в уравнении (3), существует ограничение, связанное с вычисляемыми значениями *AEO*. Для того чтобы удовлетворить критерию *LEED* [11], минимальное значение пространственной автономности

естественного освещения (пространственная *AEO*) должно быть больше 50 %.

4. Эволюционный алгоритм

В современной литературе существуют различные исследования, включающие в себя задачу многокритериальной оптимизации (МКО-задача). С точки зрения алгоритмов оптимизации, эволюционные алгоритмы (ЭА) можно рассматривать как эффективный тип алгоритма оптимизации из-за его уникального способа решения задач. В этом отношении многокритериальные эволюционные алгоритмы (МЭА) определяются методом внедрения ЭА в МКО-задачу. В этой области исследований хорошо известны и эффективны алгоритмы *NSGA-II* [12] и *SPEA2* [13]. Внедряя генетические операторы эволюционных алгоритмов в МЭА, несколько многокритериальных эволюционных алгоритмов разрабатываются для многокритериальных архитектурных задач (МАЗ) [14–21]. На рис. 3 технологическая схема рабочего процесса показывает, как интегрировать алгоритм *NSGA-II* в нашу параметрическую модель.

С точки зрения МЭА, *NSGA-II*, разработанный [12], можно рассматривать как один из наиболее мощных алгоритмов. Схема алгоритма *NSGA-II* показана на рис. 4. *NSGA-II* позволяет решать очень сложные МКО-задачи. Ключевые особенности этого алгоритма выражаются следующим образом:

– для обнаружения недоминируемых решений он использует алгоритм сортировки $O\left(MN^2\right)$;

– при формировании нового поколения из комбинированной популяции отбрасываются особи с наибольшим рангом. Если в популяции остаётся только часть особей с некоторым рангом, выбираются особи с наибольшей crowding distance – средней длиной ребра кубоида, образованного соседними особями (для крайних особей этот показатель равен ∞);

– стратегия элитарности, в частности, с использованием комбинации элитных родителей и членов потомства, то есть при формировании нового поколения используются лучшие особи как из модифицированной (т.е. полученной в результате мутации и скрещивания особей текущего поколения) популяции, так и из исходной;

1 шаг: присвоить $t = 0$ и построить случайную родительскую популяцию P_t размера N.

2 шаг: сформировать популяцию поколения Q_t размера N, где будут выполняться SBX и PM.

3 шаг: если критерий прекращения удовлетворяет, останавливается и возвращает функцию P_t.

4 шаг: чтобы объединить родительскую и потомственную популяции, устанавливается $R_t = P_t \cup Q_t$

5 шаг: чтобы найти недоминируемые фронты $f_1, f_2,.., f_k$, применяется быстрый алгоритм сортировки без доминирования к R_t.

6 шаг: для $i = 1,..,k$, необходимо сделать следующие шаги:

6.1 шаг: для решений в f_i вычисляется средняя длина ребра кубоида и

6.2 шаг: создается P_{t+1} согласно условию ниже:

- *если* $|P_{t+1}| + |f_i| \le N$, тогда назначается $P_{t+1} = P_{t+1} \cup f_t$
- *если* $|P_{t+1}| + |f_i| > N$, тогда добавляется наименьшая средняя длина ребра кубоида $N - |P_{t+1}|$ решений из f_i в P_{t+1}.

7 шаг: используется конкурсный выбор средней длины ребра кубоида, чтобы выбрать родителей из P_{t+1}. Затем, применяется SBX и PM в P_{t+1} для того, чтобы получить популяцию поколения Q_{t+1} размером N.

Рис. 4. Пошаговая схема алгоритма *NSGA-II*

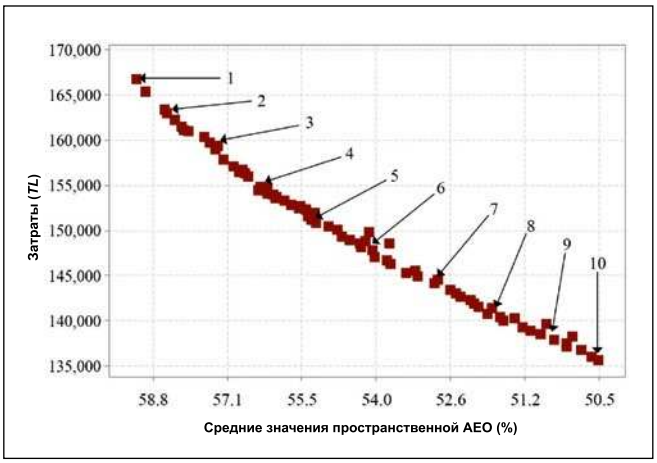


Рис. 5. Диаграмма Парето-фронта недоминируемых решения в 50-м поколений

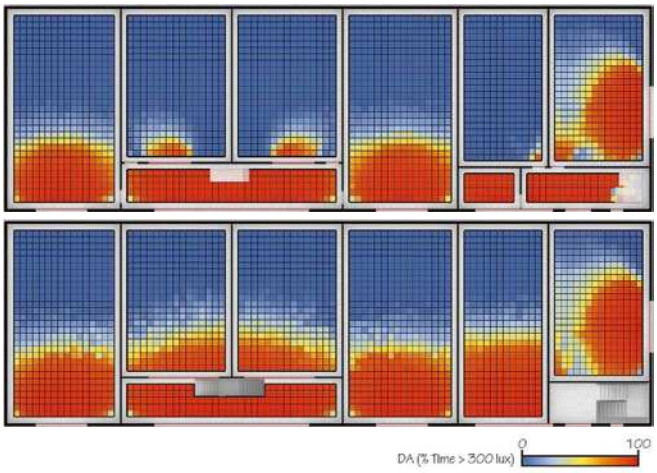


Рис. 6. Результаты измерения *AEO* для изначальной конструкции здания

Таблица 3

Переменные процесса принятия решения и частные критерии оптимальности для изначального остекления здания

Обозначения	Величина	Примечание
G_1	4 м	Ширина остекления № 1
G_2	12 м	Ширина остекления № 2
G_3	4 м	Ширина остекления № 3
G_4	6 м	Ширина остекления № 4
G_5	2 м	Ширина остекления № 5
G_6	1 м	Ширина остекления № 6
G_7	4 м	Ширина остекления № 7
Пространственная *AEO*	29,5 %	Средняя пространственная автономность естественного освещения
$C_{фасад}$	–	Общая стоимость строительства фасада
R_c	35,7 %	Отношение окна к стене

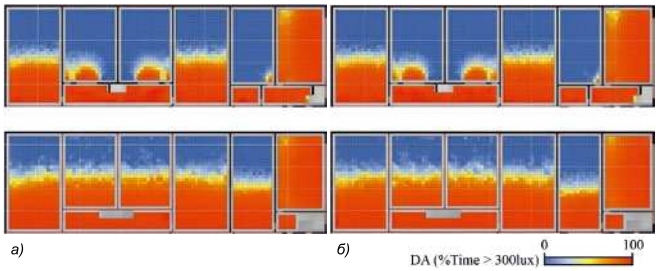


Рис. 7. Результат измерения *AEO* для случаев 1 (*а*) и 2 (*б*)

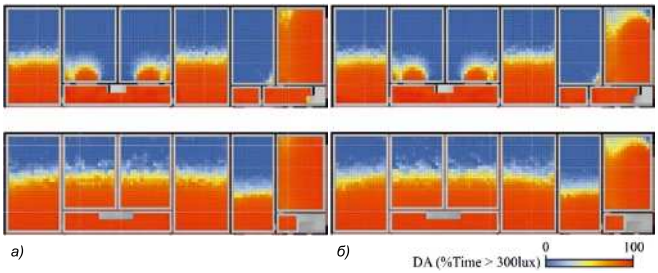


Рис. 8. Результат измерения *AEO* для случаев 3 (*а*) и 4 (*б*)

– использование генетического оператора, а именно имитирующего двоичного кроссовера (Simulated Binary Crossover, далее SBX) [12];

– использование многочленного оператора мутации (Polynomial Mutation Operator, далее PM) [12].

5. Вычислительные и архитектурные результаты

Для вычислений используется компьютер со скоростью обработки данных 4,4 ГГц и 32 ГБ оперативной памяти *DDR4*. Размер популяции определяется как 100. Поскольку разработка одного единичного случая в процессе оптимизации занимает приблизительно 150 с, алгоритм останавливается на 50-м поколении, которое определяет наши критерии завершения. За 5000 оценок, функция, алгоритм, компьютер будут работать в течение примерно 209 ч. Диаграмма Парето-фронта оптимальных недоминируемых решений в 50-м поколении для 100-го размера популяции приведена на рис. 5.

После завершения процесса оптимизации *NSGA-II* выдала стоимость затрат в диапазоне от 135617,54 TL до 166798,34 TL при значении эффективности проникновения естественного света в диапазоне от 50,02 % до 59,20 %. Так образом, средние значения для общей стоимости строительства и эффективности естественного освещения составляют 149499,92 TL и 54,50 %, соответственно. Для сравнения друг с другом и с изначальной конструкцией здания выбираются десять результатов равномерно из Парето-фронта. С точки зрения частных критериев оптимальности естественного освещения и затрат можно сделать вывод о том, переменные процесса принятия решения, а именно ширина наружных элементов остекления, оказывают значительное влияние на общую стоимость строительства и внутреннее распределение естественного света (эффективность естественного освещения).

С точки зрения эффективности естественного освещения критерий пространственной автономности естественного света для первого и второго этажа составляла 28 % и 31 %, соответственно. Распределение *AEO* по отношению к соответствующим этажам показано на рис. 6. А значения относительных переменных процесса принятия решений и частных критериев оптимальности для начального состояния остекления здания представлены в табл. 3. В соответствии с этими результатами можно утверждать, что непрозрачные внутренние стены препятствуют проникновению солнечного света в помещения, у которых отсутствует остекление. Таким образом, получается, что оба этажа не соответствуют граничным условиям Пространственая $AEO > 50$ %. Распределение *AEO* по отношению к соответствующим этажам для каждого случая показано на рис. 7–11. Значения относительных переменных процесса принятия решений и частные критерии оптимальности для каждого случая представлены в табл. 4 и табл. 5.

Для задачи оптимизации удельная стоимость остекления на квадратный метр ($C_{уо}$) определяется как 400 TL, а удельная стоимость стены на квадратный метр ($C_{ус}$) определяется как 80 TL. В расчёте дополнительные затраты на строительство, транспортировку, изготовление и т.д. не принимаются во внимание. Для повышения эффективности естественного освещения на первом этаже используются полупрозрачные перегородки (P_T). Для наружного остекления используется прозрачный стеклянный материал, коэффициент пропускания (E_{mat}) которого равен 88. Для светопрозрач-

ных межкомнатных перегородок используется двойной стеклопакет, значение коэффициента пропускания которого принимается 65.

С точки зрения частных критериев оптимальности эффективности естественного освещения и затрат можно сделать заявление о том, что некоторые переменные процесса принятия решения оказывают значительное влияние на общую стоимость строительства и внутреннее распределение естественного света по сравнению с другими. Для ширины остекления 2 (G_2) алгоритм выбирал наибольшее значение диапазона в каждом примере. На основании этого можно утверждать, что это необходимое условие для выполнения граничных условий, в противном случае результаты будут ниже требуемого минимального значения. Кроме того, для ширины остекления 7 (G_7) алгоритм не предлагал никаких значений ниже 8,60 м. Хотя минимальное значение в его диапазоне составляет 4 м, алгоритм использовал более высокие значения в этом диапазоне из-за расположения самого элемента остекления 7 и ориентации к солнечному свету, что существенно влияет на распределение естественного света внутри помещения.

С другой стороны, для ширины остекления 6 (G_6) алгоритм использовал минимальное значение его диапазона. Поэтому можно утверждать, что влияние G_6 на внутреннее распределение естественного света относительно невелико по сравнению с вкладом от других элементов остекления. При этом алгоритм выбирал максимально возможные значения для переменных процесса принятия решений G_1, G_2, G_4, учитывая их диапазон. А для переменных G_5 и G_6, наоборот, выбирались минимальные значения их диапазонов. Исходя из этих результатов, можно считать, что G_5 и G_6 практически не влияют на внутреннее распределение естественного света, в то время как их стоимость существенно влияет на общую стоимость строительства. Другие переменные процесса принятия решения были определе-

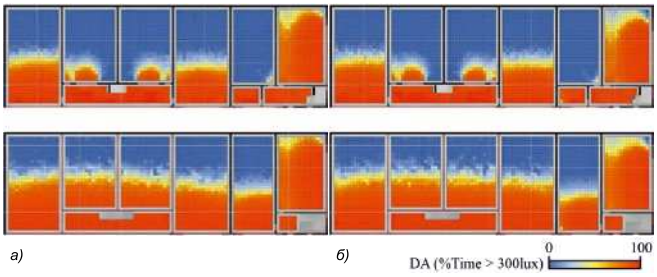


Рис. 9. Результат тат измерения *АЕО* для случаев 5 (*а*) и 6 (*б*)

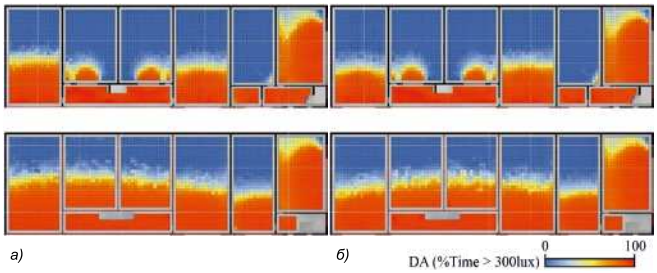


Рис. 10. Результат измерения *АЕО* для случаев 7 (*а*) и 8 (*б*)

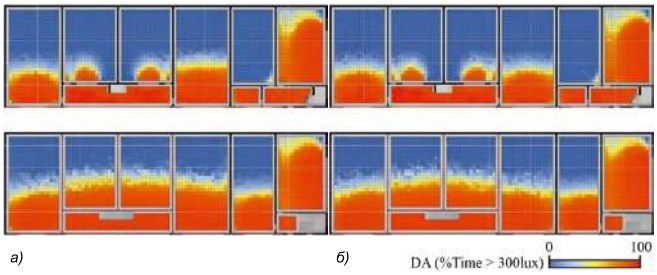


Рис. 11. Результат измерения *АЕО* для случаев 9 (*а*) и 10 (*б*)

Таблица 4

Переменные процесса принятия решения и частные критерии оптимальности для каждого случая от 1 до 5

	Случай 1	Случай 2	Случай 3	Случай 4	Случай 5
$C_{фасад}$	166798,34	163086,34	161044,74	154919,94	150465,54
Пространственная *АЕО*	59,2 %	58,5 %	58,01 %	56,43 %	55,01 %
R_w	77,8 %	73,1 %	70,6 %	63,5 %	58,8 %
G_1	10,00 м	10,00 м	9,80 м	10,00 м	10,00 м
G_2	16,40 м	16,40 м	16,40 м	16,40 м	16,40 м
G_3	9,60 м	9,80 м	9,80 м	9,80 м	6,00 м
G_4	7,40 м	5,20 м	4,40 м	5,00 м	5,00 м
G_5	1,00 м	1,40 м	1,00 м	1,00 м	1,00 м
G_6	1,00 м	0,60 м	0,60 м	0,60 м	0,60 м
G_7	12,60 м	12,60 м	12,80 м	8,80 м	10,20 м

Таблица 5

Переменные процесса принятия решения и частные критерии оптимальности для каждого случая от 6 до 10

	Случай 6	Случай 7	Случай 8	Случай 9	Случай 10
$C_{фасад}$	147867,14	144897,54	140814,34	137844,74	135617,54
Пространственная *AEO*	54,1 %	53,2 %	51,9 %	50,7 %	50,0 %
R_w	56,1 %	53,2 %	49,3 %	46,7 %	44,7 %
G_1	10,00 м	10,00 м	5,20 м	4,20 м	4,60 м
G_2	16,40 м	16,40 м	16,40 м	16,40 м	16,40 м
G_3	7,20 м	5,60 м	6,40 м	6,40 м	4,60 м
G_4	4,00 м	4,20 м	5,00 м	4,40 м	4,60 м
G_5	1,20 м	1,00 м	1,00 м	1,00 м	1,00 м
G_6	0,60 м	0,60 м	0,60 м	0,60 м	0,60 м
G_7	8,40 м	8,40 м	8,60 м	8,60 м	8,60 м

ны в соответствии с их диапазонами таким образом, чтобы выбрать оптимальные проектные решения.

6. Заключение

В данном исследовании алгоритм *NSGA-II* реализован для задачи проектирования фасада здания в учебном корпусе, которая описывается как ограниченная по реальным параметрам МКО-задачи. Задача проектирования была сформулирована таким образом, чтобы достичь минимального значения общей стоимости остекления при строительстве, при этом должно сохраняться максимально возможное количество солнечного света во внутреннем пространстве здания, используя автономность естественного освещения в качестве показателя эффективности естественного освещения. В исследовании анализировались семь переменных процесса принятия решения, связанных с шириной остекления, и одно граничное условие, чтобы разработать наилучший возможный набор решений для двух частных критериев оптимальности. Как показывают результаты, учитывая критерии завершения, алгоритм подходит для демонстрации альтернативных вариантов проектирования фасадов.

Процесс проектирования фасада содержит множество важных проектных аспектов, однако дополнительное включение ещё некоторых, связанных с эффективностью, может также принести пользу. В качестве примера можно привести исследование использования различных строительных материалов для остекления частей фасада. И последнее, но не менее важное: динамические показатели эффективности естественного освещения, такие как автономность естественного освещения (*AEO*), дают более точные результаты, однако моделирование занимает больше времени. Нет никаких сомнений в том, что статические метрики в основном, коэффициент естественной освещённости (КЕО) требуют меньшего времени вычислений по сравнению с *AEO*. При этом вопрос длительного времени моделирования для этих показателей, учитывая местный климат и прямое воздействие солнечного света на здания, требует дополнительных обсуждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Sariyildiz I. Performative computational design. // in Keynote speech in: Proceedings of ICONARCH-I: International congress of architecture-I, Konya, Turkey, 15–17 November 2012. 2012. Selcuk University.

2. Cruz-Correia R., et al., Integration of Hospital data using Agent Technologies–a case study. // Ai Communications, 2005. V18, #3, pp. 191–200.

3. Joseph A. and Rashid M., The architecture of safety: hospital design. // Current opinion in critical care, 2007. V13, #6, pp. 714–719.

4. Walch J.M., et al., The effect of sunlight on postoperative analgesic medication use: a prospective study of patients undergoing spinal surgery. // Psychosomatic Medicine, 2005. V67, #1, pp. 156–163.

5. Ulrich, R.S., et al., Stress recovery during exposure to natural and urban environments. // Journal of Environmental Psychology, 1991. V11, #3, pp. 201–230.

6. Pechacek C.S., Andersen M., and Lockley S.W., Preliminary method for prospective analysis of the circadian efficacy of (day) light with applications to healthcare architecture. // Leukos, 2008. V5, #1, pp. 1–26.

7. Nabil A. and Mardaljevic J., Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. // Energy and buildings, 2006. V38, #7, pp. 905–913.

8. Aripin S., ‘Healing architecture’: A study of daylight in public hospital designs in Malaysia. 2010.

9. Shikder S.H., Mourshed M., and Price A.D. Optimisation of a daylight-window: hospital patient room as a test case. 2010.

10. Moon P. and Spencer D.E., Illumination from a non-uniform sky. // Illuminating Engineering, 1942. 37(10): p. 707–726.

11. Mardaljevic J., Heschong L., and Lee E., Daylight metrics and energy savings. // Lighting Research and Technology, 2009. V41, #3, pp. 261–283.

12. Deb K., et al., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. // IEEE transactions on evolutionary computation, 2002. V6, #2, pp. 182–197.

13. Zitzler E., Laumanns M., and Thiele L.. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. in Eurogen. 2001.

14. Ekici B., et al. Addressing the high-rise form finding problem by evolutionary computation. in 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). 2015. IEEE.

15. Ugurlu C., et al. Evolutionary computation for architectural design of restaurant layouts. in 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). 2015. IEEE.

16. Ugurlu C., et al. Identification of sustainable designs for floating settlements using computational design techniques. in 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). 2015. IEEE.

17. Cubukcuoglu C., et al. Multi-objective harmony search algorithm for layout design in theatre hall acoustics. in Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on. 2016. IEEE.

18. Cubukcuoglu C., et al., A Multi-Objective Harmony Search Algorithm for Sustainable Design of Floating Settlements. // Algorithms, 2016. V9, #3, p. 51.

19. Cubukcuoglu C., et al. Multi-objective optimization through differential evolution for restaurant design. in Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on. 2016. IEEE.

20. Dursun O., Ekici B., and Sarıyıldız S.. Time-cost optimization at the conceptual design stage using differential evolution: Case of single family housing projects in Germany. in 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). 2015. IEEE.

21. Kirimtat A., et al. Multi-objective optimization for shading devices in buildings by using evolutionary algorithms. in Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on. 2016. IEEE.

Арда Агирбас (Arda Agirbas), *M. Sc., магистр по направлению художественная архитектура. Его научные интересы включают методы цифрового проектирования и многокритериальную эволюционную оптимизацию в области архитектуры. Уделяя особое внимание цифровым исследованиям поиска и оптимизации архитектурных форм, он исследует влияние цифровых концепций и методов в контексте архитектурного проектирования*

Эбру Алаканук (Ebru Alakavuk), *Ph.D., Университет Ясар. Она изучает экологичные здания, передовые фасадные системы и передовые строительные системы*

Защита диссертации В.Г. Тереховым

22 октября 2020 года в Диссертационном совете МЭИ.012, под председательством доктора технических наук, профессора, Заместителя заведующего кафедрой «Светотехника» Григорьева Андрея Андреевича, состоялась успешная защита Тереховым Владиславом Геннадьевичем диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 «Светотехника». Диссертационная работа «Метод экспериментального определения оптимальных параметров технологического освещения в условиях светокультуры зеленных растений» была выполнена на базе Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения Высшего Образования «Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт», под руководством кандидата технических наук, доцента, заведующего кафедрой «Светотехника» Бооса Георгия Валентиновича.

Тема диссертационной работы относится к одному из самых перспективных направлений в светотехнике – применению светодиодных источников света при выращивании растений в условиях светокультуры. Несмотря на достаточно широкое применение светодиодов в системах общего освещения, вопросы влияния квазимонохроматических источников света на рост и развитие растений изучены недостаточно, как светотехниками, так и светофизиологами растений.

В результате выполнения работы разработана методика проведения фотобиологических исследований, успешно апробированная на группе зеленных культур (салат «Ландау» и базилика «Русский гигант») и позволяющая при распространении на другие салатно-зеленные растения экспериментальным путём определять оптимальные спектральные характеристики фитооблучателей и уровень облучённости в фитоустановках. Также доказана неадитивность действия разноспектральных излучений в области ФАР обосновывающая необходимость эмпирического определения требований к спектру и уровню облучённости растений в условиях светокультуры. Сформулированы требования к системе освещения для выращивания салатно-зеленных культур, реализованные в составе экспериментальной многоярусной автоматизированной фитоустановки, обеспечивающей высокий уровень продуктивности растений, созданной на базе Всесоюзного научно-исследовательского светотехнического института им. С.И. Вавилова, где Терехов Владислав Геннадьевич занимает должность научного сотрудника.

Ведущей организацией была утверждена ФБГУ ВО «Национальный исследовательский «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», имеющий большой опыт подготовки специалистов по специальности «Светотехника». Первым оппонентом выступил доктор биологических наук, главный научный сотрудник Института биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Тихомиров Александр Аполлинарьевич. Его работы по исследованию влияния различных режимов облучения на рост и развитие растений широко освещены в российских и зарубежных научных изданиях. Второй оппонент, кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Рефлакс» Пчелин Владимир Михайлович, является ведущим в стране специалистом по разработке и серийному производству фитооблучателей для светокультуры растений на основе ламп ДНаЗ собственной разработки.

Основные четыре публикации по теме работы были опубликованы в 2018 и 2019 годах в журнале «Светотехника», а также в журнале «*Light* & *Engineering*». Также материалы работы докладывались на 10 российских и международных научных конференциях. Основные положения диссертационной работы защищены 4 патентами на изобретение.

Работа выполнялась в тесном взаимодействии с научным коллективом Кафедры физиологии растений РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, под руководством доктора биологических наук, профессора Тараканова Ивана Германовича и является примером удачного междисциплинарного взаимодействия ведущих вузов и НИИ Российской Федерации. Выполненная диссертационная работа В.Г. Терехова является развитием многолетних исследований и разработок в области светотехники для светокультуры растений, выполненных во ВНИСИ им. С.И. Вавилова, под научным руководством кандидата технических наук Прикупца Леонида Борисовича.

Экономия электроэнергии в световых технологиях сельскохозяйственного производства

С.А. ОВЧУКОВА, Н.П. КОНДРАТЬЕВА[1], О.Ю. КОВАЛЕНКО[2]*

[1] ИжГСХА, Ижевск

[2] Мордовский ГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск

*E-mail: aep_isha@mail.ru

Аннотация

При постоянном удорожании электроэнергии и неизменном уровне финансировании сельскохозяйственного (СХ) производства удовлетворять потребности населения в пищевой продукции становится всё труднее. В этих условиях актуально применение энергосберегающих световых технологий для облучения молочного стада, птицы и растений. В статье излагаются приёмы экономии электроэнергии, вытекающие из собственных многолетних теоретических и экспериментальных исследований авторов и их аспирантов, достоверность которых подтверждена защищёнными диссертациями, подробно представляющими теоретические и практические достижения, подтверждённые протоколами экспериментов и актами хозяйственных и заводских испытаний. Статья может быть полезна многочисленным мелким СХ хозяйствам нашей страны при выборе энергосберегающих световых технологий.

Ключевые слова: энергосбережение, световые технологии, оптическое излучение, освещение, облучение, разрядные лампы, светодиоды, микропроцессорные системы управления, доза облучения, животноводство, защищённый грунт, фотосинтез.

Введение

В условиях роста цен на электроэнергию и комплектующие материалы при ограниченном бюджетном финансировании рост выпуска пищевой продукции требует поиска новых экономных электротехнологий сельскохозяйственного (СХ) производства, к которым можно отнести и световые технологии, энергоэкономичные и безвредные для биообъектов и производимой продукции. В своих исследованиях мы использовали все составляющие оптического излучения: УФ, видимую, ИК и фотосинтетически активную. Исследования касались всего цикла производства пищевой СХ продукции:

- создание и внедрение новых эффективных источников излучения и облучателей;
- разработка схем включения установок со светодиодами (СД) с использованием программного комплекса промышленной автоматизации «*CoDeSys*»;
- обоснование и реализация доз УФ облучения, режимов и способов облучения животных, растений и семян;
- разработка и внедрение нового экспресс-метода этологического контроля молочного стада, который по результатам промежуточных измерений позволяет прогнозировать конечную продукцию стада без вмешательства в поведение животных.

Настоящая статья служит обзором многолетних совместных работ авторов по световым технологиям (с точки зрения экономии электроэнергии), который может быть полезен многочисленным мелким хозяйствам России в выборе энергосберегающих световых технологий.

Освещение – орудие световых технологий. Повышение уровня освещённости до 150 лк повышает надои коров, привесы крупного рогатого скота и поросят, о чём свидетельствуют результаты нашей многолетней работы в племсовхозе «Ачкасово» Московской области [1].

Опыты в птичнике, в Мордовии, показали, что продление светового дня до 15 ч в сутки способствует повышению яйценоскости кур до 25 %, а продление светового периода за 15 ч в сутки снижает этот показатель [2]. Освещение птицеферм не требует больших затрат электроэнергии в силу малой нормированной освещённости для кур (30–40 лк), но для стабильной яйценоскости требуется постепенность переходов от света к темноте и наоборот. Соответствующая регулировка светового потока обеспечивалась в опытах Мордовского ГУ системами управления освещением.

Технологическое облучение использует в основном УФ и ИК области оптического излучения. Под действием эритемного УФ излучения (λ = 315–280 нм) в организме животных образуется витамин D_3, который разносится по всему организму гуморальным и рефлекторным образом, укрепляя иммунитет и повышая резистентность к ряду болезней. В животноводческих и птицеводческих помещениях наблюдается острая недостаточность УФ облучения. Частично компенсируют это эритемные лампы с колбой из увиолевого стекла, которое пропускает излучение с $\lambda > 280$ нм. УФ облучение получали животные и птица, что оказалось эффективнее и дешевле витаминизации кормов. УФ источниками служили *G*13 40 Вт λ_{max} = 280–315 нм, производитель НИИИС (Саранск). Лампы работали в облучателях типа ЭСП0–40–111 RAY UV-B, производитель Ардатовский СТЗ. Имитацию солнечного света обеспечивала УФ лампа *Osram* ULTRA-VITALUX 300W 230V E27, UVA315–400nm, UVB280–315nm. Для облучения телят в племсовхозе «Ачкасово» мы использовали разработанные в Мордовском ГУ ЛЛ мощностью 15, 30 и 40 Вт из бактерицидного стекла с частично нанесённым на колбу эритемным люминофором [3, 4]. Повышенное терапевтическое действие ламп обеспечивалось соотношением 1: 1,4 потоков излучения в УФ-С и УФ-В зонах оптического спектра. В качестве переносных излучателей использовались усовершенствованные нами лампы комбинированного излучения типа ДРВЭД, срок службы которых был повышен заменой горелок на четырёхэлектродные с полым катодом и недокалом балластной нити накаливания.

Излучение в диапазоне λ = 200–280 нм обладает обеззараживающим действием. УФ-С излучение стерилизует воздух, воду, навозные стоки, тару, продукты, медицинские инструменты и пр. Степень сниже-

ния количества микроорганизмов определяется дозой облучения, Так, уничтожение бактерий холеры, стафилококка, коли и тифа, по последним данным, достигается при дозе 160 Дж/м^2 [3, 4]. Для максимального уничтожения микроорганизмов в воздухе мы использовали РЛНД серии «ЛБ» с колбой из бактерицидного стекла мощностью 15, 30 Вт и РЛВД типа ДРТ-400 (мощность 400 Вт) в облучателях типа ОРБН 2×15–01. Для обеззараживания воды применялись амальгамные лампы мощностью 500–900 Вт производства ООО ПК «ЛИТ». (Лампы эти экологичны, поскольку ртуть в них находится в связанном состоянии.) Попутно отметим интересный комбинированный энергоэкономичный облучатель-рециркулятор закрытого типа «АрУФ», для птицеводческих помещений, сочетающий распыление аэрозоля, УФ-С облучение и вентиляцию, разработанный в *FSA engineering Center VIM* [5]

При переходе в ИК область спектра, на λ = 680–1400 нм, энергия фотонов снижается, и выделяемой кинетической энергии хватает лишь на колебательное движение молекул, вызывающее тепловую эритему кожи, которая способствует усилению кровотока, усвояемости корма и других биологических процессов, обеспечивающих прирост и резистентность молодняка животных при экономии корма. В ИК облучении нередко используются облучатели ССП01 (светильник с СД влагозащищённый) и ССП05 мощностью по 250 Вт и др. Поскольку комбинированный обогрев эффективнее, в животноводстве используются светотехнические установки с ИК и эритемными лампами, такие как «ИКУФ» и «Луч». Для повышения энергоэкономичности ИК облучения молодняка использовались электронагревательные коврики, а для исключения эффекта фотореактивации облучение проводилось при отключённом освещении.

Недостаток разрядных ламп – наличие в них токсичной ртути, которая при температурах ниже –20 °С, к тому же, вымораживается, и напряжения сети становится недостаточно для зажигания ламп. Этого недостатка лишены лампы с полым катодом. Полый катод обеспечивает работу ламп от сети без зажигающего устройства в схеме включения при любых низких температурах и высоком сроке службы [1, 6]. Это решает проблему использования разрядных ламп на Севере. Ртутные и металлогалогенные лампы с полым катодом мощностью 400 Вт разработаны в МЭИ, но сегодня изготовление их возможно только по спецзаказу.

Производство растениеводческой пищевой продукции защищённого грунта требует огромных энергозатрат в силу высоких световых норм и большого числа холодных регионов в России [7]. На искусственное облучение растений приходится более 25 % энергопотребления агропромышленного комплекса [8]. Все высокоинтенсивные ртутные лампы имеют недостаток красной составляющей, на λ = 600–700 нм. Из выпускавшихся промышленностью источников излучения по спектру наиболее подходят для растений МГЛ мощностью 3000 и 6000 Вт (в установках УОРТ-4–2 и СОРТ –1–10), наполненные, помимо ртути, галогенидами *Tl*, *Na* и *In* (они не имеют красной составляющей в спектре, но выпускались СПО «Лисма» как растениеводческие). Вообще МГЛ имеют большой срок службы, достаточно хорошую световую отдачу, 95 лм/Вт, но широкое применение в сооружениях защищённого грунта по всему миру нашли НЛВД. При этом уже ведутся сравнительные оценки тепличных облучателей с НЛВД и с СД [9].

Наилучшие условия для выращивания растений – на их прародине. Поэтому надо изучать историю выращиваемого растения и воссоздавать характерный спектр оптического излучения этого региона. Так, гвоздика ремонтантная имеет прародину в Альпах, картофель – в Бразилии, а огурец – в Индии [10]. Так, имитация натурального солнечного спектра Перу в фитототроне Удмуртского НИИ сельского хозяйства [11] ускорила выращивание меристемного картофеля на 4 дня, повысила выход продукции на 15 %, снизила расход электроэнергии на 50 %. Для поддержания требуемого спектра излучения был разработан алгоритм работы для программируемых логических контроллеров с использованием программного комплекса промышленной автоматизации «*CoDeSys*» для фитоустановок с СД.

Экономию электроэнергии может давать импульсный режим облучения: во время импульса растение впитывает энергию, а во время паузы перерабатывает [11]. Наиболее фундаментальный труд по этой тематике [12] показал эффективность соотношения продолжительностей света и паузы 0,6 с: 1 с. Причём во время паузы в РЛВД поддерживается вспомогательный разряд между основным и вспомогательным электродами.

В последнее время всё большее распространение получают СД источники излучения. Они экономичнее разрядных ламп за счёт большей энергоэффективности, долговечности и экологичности [2, 13]. В России объём производства СД составляет 10 % от их объёма потребления, остальные 90 % СД импортируются. Облучательные установки с СД удобны в использовании с интеллектуальными системами управления освещением.

Исследования показали, что спектральная зона УФ-А играет положительную роль в «пробуждении» семян, что выражается повышением энергии прорастания и получения дружных всходов, например, древесных культур (ели) [14]. Для поддержания требуемой дозы УФ облучения была специально разработана микропроцессорная система [15, 16].

Таким образом, экономия электроэнергии в световых технологиях СХ производства возможна при широком применении энергосберегающих интеллектуальных фитоустановок с СД, в которых можно создавать любой спектр излучения и поддерживать требуемую дозу облучения с помощью программируемых логических контроллеров.

В заключение, опираясь на результаты собственных исследований, можно рекомендовать следующие способы экономии электроэнергии в световых технологиях СХ производства:

1. Во избежание зартученности помещений предпочтительнее использовать вместо ЛЛ экологичные амальгамные лампы или СД излучатели.

2. В уличном освещении в холодных зонах незаменимы лампы «ДРЛ» и МГЛ мощностью до 400

или 700 Вт с полым катодом, которые включаются при напряжении 220 В без дополнительных зажигающих устройств.

3. Необходимо учитывать возможность изменения спектра излучения ламп при изменениях температуры, влажности и других параметров окружающей среды, что влияет на дозу облучения.

4. Для получения высоких урожаев необходим анализ спектральных составляющих естественного солнечного излучения прародины выращиваемых растений и имитация их фитооблучателями с СД, управляемыми программируемыми логическими контроллерами.

5. Можно существенно экономить электрическую энергию, используя импульсное облучение растений облучательными установками с СД, а также комбинированное облучение (то есть одновременное использование электронагревательных ковриков, эритемного и прочего оптического излучения).

6. Для автоматического регулирования потока и спектра излучения, дозы облучения, времени включения и отключения осветительных (облучательных) установок следует активно применять микропроцессорные системы управления или программируемые логические контроллеры, так как недооблучение и переоблучение ведут к негативным последствиям.

7. Следует повышать продуктивность животных, используя этологический (поведенческий) метод, позволяющий отбирать здоровых животных, не вмешиваясь в их поведение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Овчукова С.А.* Применение оптического излучения в сельскохозяйственном производстве / Дис…д-ра техн. наук. – М., 2001. – 515 с.

2. *Zhuravleva Yu.A., Kovalenko O. Yu., Nesterkina N.P., Ovchukova S.A.* Optical Radiation and Growth of Farm Animals // Bioscience Biotechnology Research Communications. – 2019. – Vol. 10, No. 5. – P. 126–130.

3. *Коваленко О.Ю.* Светотехнические установки для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных / Дис…д-ра техн. наук. – Саранск, 2009. – 496 с.

4. *Пильщикова Ю.А.* Повышение эффективности облучательной установки для птицеводства / Дис…к-та техн. наук. – Саранск, 2014. – 152 с.

5. *Юферев Л.Ю., Довлатов И.М.* Повышение эффективности энергоресурсосберегающей системы УФО // Вестник ВИЭСХ. – 2017. – № 2(27). – С. 70–75.

6. *Атаев А.Е., Ворончев Т.А., Мельников Б.М., Овчукова С.А., Урлапова М.А.* Ртутная газоразрядная лампа высокого давления / Авт. свид. СССР № 680083. 1979. Бюл. № 30.

7. *Прикупец Л.Б.* Светокультура. Рациональный подход к выбору системы освещения // Теплицы России. – 2016. – № 1. – С. 56–61.

8. *Прикупец Л.Б., Емелин А.А., Тараканов И.Г.* Светодиодные облучатели: из фитотрона в теплицу? // Теплицы России. – 2015. – № 2. – С. 52–56.

9. *Кондратьева Н.П., Филатов Д.А., Терентьев П.В., Аль-Хелю А.С.* Сравнительная оценка основных характеристик натриевых и светодиодных тепличных облучателей // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – Т. 14, № 1. – С. 50–54.

10. *Bolshin R.G., Kondratieva N.P., Krasnolutskaya M.G.* Irradiating set with UV diodes and microprocessor system of automatic dose control // Light & Engineering. – 2019. – Vol. 27, No. 6. – P. 127–132.

11. *Kondrateva N.P., Bolshin R.G., Belov V.V., Krasnolutskaya M.G.* Energy-saving electric eouipment applied in agriculture / International Science and Technology Conference EastConf 2019 (Vladivostok, 01–02.03.2019). – Vladivostok, 2019. – P. 436–438.

12. *Корш Б.В.* Использование коротких серий импульсного освещения для изучения процессов фотосинтеза дыхания зелёных растений на свету / Дис…к-та биол. наук. – Л.: 1976. – 194 с.

13. *Коваленко О.Ю., Журавлёва Ю.А, Микаева С.А., Немов В.В.* Исследование изменения светотехнических характеристик полупроводниковых источников света различного конструктивного исполнения в процессе эксплуатации // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 471–476.

14. *Краснолуцкая М.Г.* Повышение эффективности ультрафиолетовой светодиодной облучательной установки для предпосевной обработки семян ели / Дис…к-та техн. наук. – Ижевск, 2018. – 163 с.

15. *Kondrateva N.P., Kasatkina N.I., Kuryleva A.G., Baturina K.A., Ilyasov I.R., Korepanov R.I.* Effect of treatment of seeds of grain crops by ultraviolet radiation before sowing // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020. – Vol. 433. – P. 012039.

16. *Kondrateva N., Terentyev P., Filatov D., Maksimov I., Kirillov N., Ovchukova S., Rybakov L.* The effect of greenhouse irradiators on the load factor of step-down transformers // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020. – Vol. 433. – P. 012039.

Овчукова Светлана Александровна, *доктор техн. наук, доцент. Окончила в 1963 г. Мордовский государственный университет. Область научных интересов: применение источников оптического излучения в промышленности и сельском хозяйстве*

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»*

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, стандартизации 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*

СветоСервиС
ВОЛГОГРАД
Умный свет — для умного города!
«Светосервис-Волгоград».
ООО «Светосервис-Волгоград»
400107, г. Волгоград, ул. Карла
Либкнехта, 4
svetoservis.ru
+7 (8442) 36-63-32
+7 (8442) 36-63-31
На фото: Проспект имени Жукова

Динамический анализ влияния загрязнения воздуха на уровень естественной освещённости в офисе открытой планировки в Лондоне

Ц. ДУ, С. ШАРПЛС

Школа архитектуры Ливерпульского университета, Великобритания
E-mail: jiangtao.du@liverpool.ac.uk

Аннотация

Осаждение загрязнителей воздуха на остеклении может существенно повлиять на пропускание естественного света через оконные проёмы в зданиях в городских районах. Это исследование представляет собой имитационный анализ влияния загрязнения воздуха и коэффициента пропускания остекления на проникновение естественного света в помещения офиса открытой планировки в Лондоне. Во-первых, были разработаны и оценены прямые связи между коэффициентом пропускания остекления и условиями естественного освещения. Во-вторых, было разработано несколько простых алгоритмов для оценки потери естественного света из-за осаждения загрязняющих веществ на внешней поверхности вертикального остекления. Наконец, были разработаны некоторые выводы и проектные стратегии для сопровождения планирования фасадов на ранней стадии проектирования городского строительного проекта.

Ключевые слова: проникновение естественного света, загрязнение воздуха, динамическое моделирование, офисы открытой планировки, Великобритания.

1. Введение

Естественное освещение (от небосвода или солнца) было признано одним из наиболее важных решений экологических проблем в офисных зданиях, таких как энергосбережение [1, 2], повышение производительности труда [3, 4], улучшение здоровья и комфорта человека [5, 6, 7].

В крупных городах осаждение переносимых воздухом загрязняющих веществ на поверхности зданий может заметно повлиять на проникновение естественного света в здания [8, 9, 10]. Для элементов остекления влияние осаждения загрязнений воздуха на пропускание естественного света обычно количественно определяется с помощью применения поправочного коэффициента загрязнения остекления [11, 12]. Для точного проектирования естественного освещения в загрязнённом городском районе важно иметь соответствующие, релевантные участку значения поправочного коэффициента загрязнения остекления [12]. В период с 1999 по 2003 год в Великобритании и Сингапуре было проведено несколько полевых исследований [8, 9, 13] для измерения снижения пропускания естественного света остеклением из-за осаждения загрязняющих веществ в городских зданиях. Британские исследователи Трегенза и др. [8] наблюдали среднее снижение коэффициента пропускания от 4 % до 8 % для коммерческих зданий в чистых средах, в то время как Шарплз и др. [9] обнаружили, что потери в диффузном пропускании для вертикального окна обычно не превышают 10 %. Эти результаты могут быть использованы в архитектурных расчётах естественного освещения для регионов, экологически близких к умеренному морскому климату Великобритании. В другом исследовании, проведённом в городе с высокой плотностью населения Сингапуре, который имеет тропический влажный климат, было обнаружено общее снижение коэффициента пропускания в диапазоне от 9 % до 36 % для вертикальных и горизонтальных окон [13]. В общем, Трегенза и др. [8] пришли к выводу, что поправочный коэффициент загрязнения остекления связан с твёрдыми частицами во внешней атмосфере, осадками и формой здания. В двух исследованиях [13, 14] далее подчёркивался тот факт, что внешние атмосферные загрязнители должны в первую очередь учитываться при оценке потерь пропускания естественного света через остекление фасада.

Однако упомянутый выше поправочный коэффициент загрязнения обычно измерялся с помощью простого подхода (например, люксметра), который не учитывал природу и состав загрязняющих веществ в городской атмосфере [13]. Поэтому был изучен механизм загрязнения остекления. Согласно Уотту и Гамильтону [10], загрязнение стекла принимается как «визуальная помеха, возникающая в результате потемнения открытых поверхностей в результате осаждения атмосферных частиц». В более раннем исследовании [15] указывалось, что основным источником загрязнения поверхности остекления в городах является твёрдые частицы углерода (ЧУ). Глобальная модель загрязнения современного остекления была разработана в Париже в простых условиях воздействия (отсутствия дождя) [16, 17]. Было обнаружено, что четыре параметра загрязнения изменяются с увеличением времени воздействия, включая общую массу осаждённых частиц (путём взвешивания), массу общего углерода (методом термокулометрии), массу водорастворимых ионов (методом ионной хроматографии на воде для промывки поверхности стекла) и дымку (методом спектрофотометрии) [17]. Основываясь на измеренных данных из шести европейских городов, Фавес и др. [18] построили новые модели для прогнозирования влияния загрязнения на оптические свойства архитектурного остекления в терминах двух типичных загрязняющих веществ: ЧУ и ионов (растворимых неорганических частиц). Эти исследования дали бы возможность количественно оценить поправочный коэффициент загрязнения более точным способом.

Из литературного обзора можно сделать вывод, что существует лишь несколько исследований, посвящённых прямой связи между ситуацией загрязнения воздуха/осаждением грязи на остеклении и окончательным снижением проникновения естественного света в здания [8, 9, 13]. Кроме того, могут потребоваться некоторые простые

[1] Перевод с англ. Т.В. Мешковой

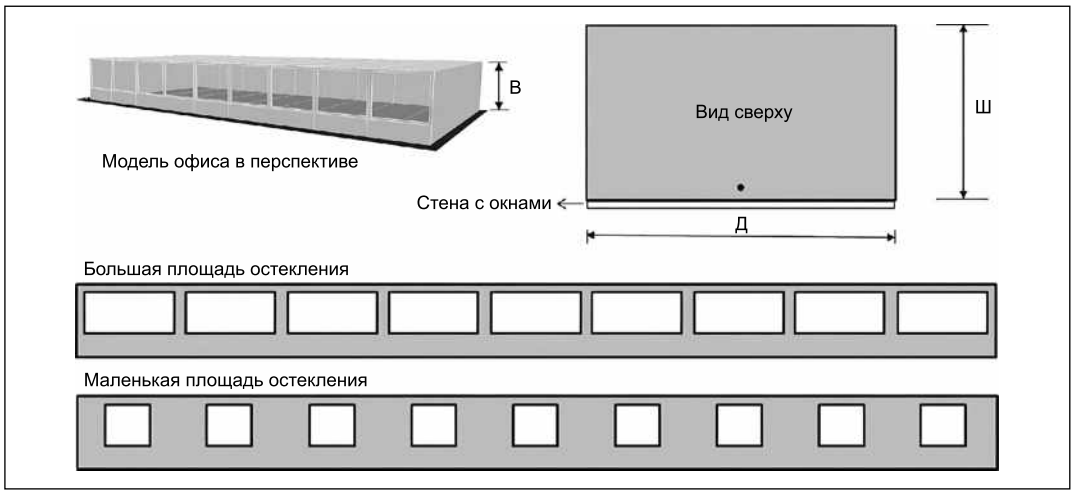


Рис. 1. Модель офиса

стратегии проектирования [12] для сопровождения практического проектирования применения естественного света, учитывающего негативное воздействие загрязнения окружающей среды городским воздухом. Таким образом, данная статья представляет собой моделирование естественного освещения в офисном здании открытой планировки и преследует две цели: исследовать связь между коэффициентом пропускания вертикального остекления и наличием естественного света в помещении и построить алгоритмы оценки снижения проникновения естественного света в соответствии с типовыми загрязнителями в европейских городских районах. Достигнутые результаты могут быть полезны для разработки методических рекомендаций по проектированию фасадов на ранней стадии.

2. Моделирование

2.1. Расположение, модель офиса и размеры остекления

В данном исследовании было смоделировано многоэтажное офисное здание в одном из районов Лондона (рис. 1). Это место имеет типичный умеренный морской климат. Офис имеет открытую планировку (Д×Ш×В: 21,6×10×3 м^3) и вертикальные боковые окна на единственном фасаде. Были изучены два размера остекления: одно с отношением большой площади остекления к площади стены (ООС) 60 % и другое с малым ООС 30 %. Общее значение коэффициента пропускания (КП) остекления, использованного при моделировании, было уменьшено с 0,85 до 0,3 с интервалом 0,05 шага для моделирования диапазона изменений пропускания, вызванных загрязнением воздуха. Предполагалось, что остекление непосредственно подвергается воздействию городского воздуха (то есть никаких препятствий, никаких защитных эффектов от углублений или затеняющих элементов). Коэффициенты отражения поверхности офисного помещения составляли 0,8 (потолок), 0,6 (стена) и 0,3 (пол).

2.2. Моделирование естественного освещения

В качестве инструмента моделирования естественного света на основе климата [19] в этом исследовании был принят программный комплекс *DAYSIM* [20]. Были использованы четыре параметра естественного света: средний коэффициент естественной освещённости (КЕО) [21, 11], автономность естественной освещённости (АЕО), постоянная автономность естественной освещённости (АЕОп) и полезная естественная освещённость (ПЕО) [22, 23]. Средний коэффициент естественной освещённости – это обычная метрика, которая в основном используется в условиях облачного неба МКО, и которая может отображать базовый уровень достаточности естественного света. Как динамическая метрика при различных условиях неба, автономность естественной освещённости является показателем того, соответствует ли естественная освещённость требуемой освещённости рабочей плоскости. Данные о постоянной автономности естественной освещённости включают не только естественную освещённость выше стандартного уровня, но и ту часть в каждом временном интервале, когда естественная освещённость ниже требуемого уровня освещённости. Для офисного здания, смоделированного в данном исследовании, была выбрана минимальная освещённость рабочей плоскости 500 лк. Параметр полезной естественной освещённости (ПЕО) также может быть использован для оценки естественного света в различных климатических условиях. Три типа ПЕО определяются в соответствии с диапазонами естественной освещённости: 0–100 лк (слишком тёмный), 100–2000 лк (полезный свет) и более 2000 лк (слишком яркий).

В качестве рабочей расчётной плоскости при моделировании использовалась горизонтальная поверхность на высоте 0,8 м от пола. Расчётная сетка с 880 точками была равномерно распределена по плоскости. В этом исследовании было получено среднее значение для всех расчётных плоскостей для представления доступности естественного света в офисе. Для каждой модели офиса (большое или малое ООС) для создания алгоритмов использовались смоделированные средние значения КЕО, АЕО, АЕОп, ПЕО, связанные с переменным коэффициентом пропускания остекления.

3. Модель загрязнения стекла

Модель загрязнения стекла изучалась в течение 15-летнего периода [17]. На основе измерений в шести европейских городах (Афины, Краков, Лондон, Прага, Монтелибретти и Труа) были разработаны два уравнения для оценки влияния загрязнителей воздуха на оптические свойства стекла (поглощение и рассеяние света) [18]:

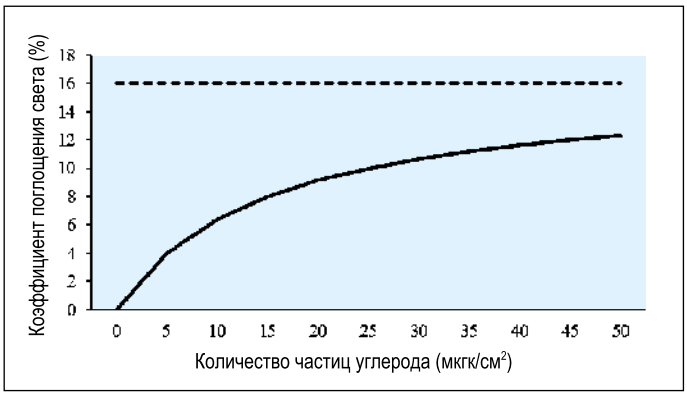


Рис. 2. Зависимость поглощения света от количества частиц элементарного углерода

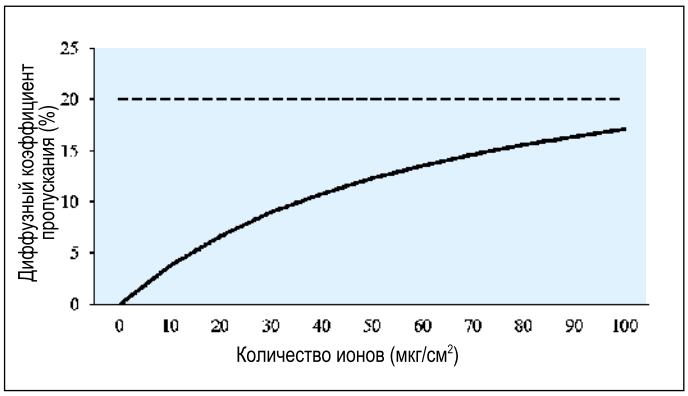


Рис. 3. Зависимость диффузного коэффициента пропускания от количества растворимых неорганических частиц (ионов)

$$X = 0{,}16 \cdot ЧУ / (ЧУ + 15), \quad (1)$$

$$Y = 0{,}28 ions / (ions + 64), \quad (2)$$

где X – коэффициент поглощения света (%), $ЧУ$ – количество частиц элементарного углерода (мкгк/см^2) на внешней поверхности остекления, Y – диффузный коэффициент пропускания, а ионы (*ions*) – количество растворимых неорганических частиц (мкг/см^2) на внешней поверхности остекления. На рис. 2 и рис. 3 представлены графики уравнений (1) и (2). Из графиков видно изменение поглощения света и диффузного пропускания вследствие осаждения загрязняющих веществ.

На рис. 2 показано, как увеличение количества ЧУ будет явно увеличивать поглощение света (сплошная кривая). Однако измерения Фавеса и др. [18] показали, что можно обнаружить насыщение осаждения ЧУ. Это приведёт к тому, что верхний предел коэффициента поглощения света составит около 16 % (пунктирная линия на рис. 2). Аналогично, с увеличением количества ионов происходит увеличение диффузного коэффициента пропускания света (сплошная кривая на рис. 3). Верхний предел диффузного коэффициента пропускания составляет около 20 % (пунктирная линия на рис. 3), что связано с насыщением осаждения ионов [18].

Как отмечалось в ряде исследований [13, 17, 18], осаждение ЧУ является основным фактором, способным существенно снизить визуально коэффициент пропуская остекления городских зданий. Этот эффект загрязнения согласно (1) обычно обнаруживался на внешней поверхности остекления [18]. Тем не менее, согласно измерениям [18], влияние ионов на диффузный коэффициент пропускания использовался только для индикации помутнения стекла (визуальной прозрачности), в то время как никаких результатов, касающихся общего визуального пропускания, не сообщалось. Поэтому в данном исследовании в качестве базового алгоритма для установления связи между внешним загрязнением воздуха и наличием естественного света было принято только уравнение (1).

4. Результаты и обсуждение

4.1. Коэффициент пропускания остекления и естественный свет

Сначала были проанализированы результаты моделирования офиса с большим размером остекления (ООС 60 %). На рис. 4 показано влияние коэффициента пропускания остекления на средний коэффициент естественной освещённости (КЕО) в сильно остеклённом офисе. При ООС 60 % коэффициент пропускания (КП) 0,3 может обеспечить хороший уровень естественной освещённости (КЕО = 2 %). Увеличение КП остекления позволит значительно увеличить КЕО. Например, если взять КП = 0,3 в качестве эталона, то при удвоении до 0,6 относительное увеличение КЕО составит 126 %. Линейное уравне-

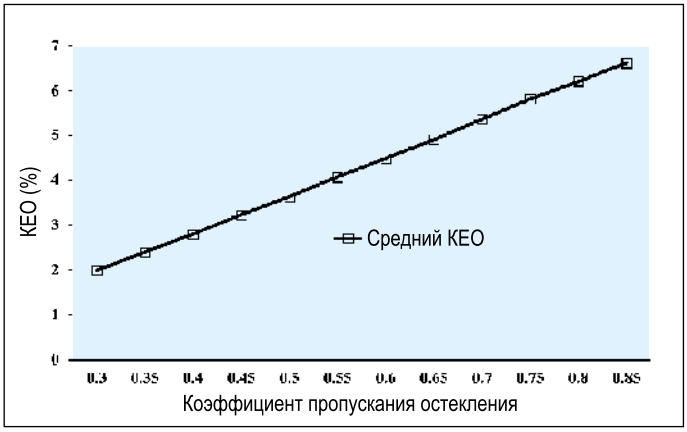


Рис. 4. Зависимость среднего значения КЕО (большая площадь остекления) от коэффициента пропускания остекления

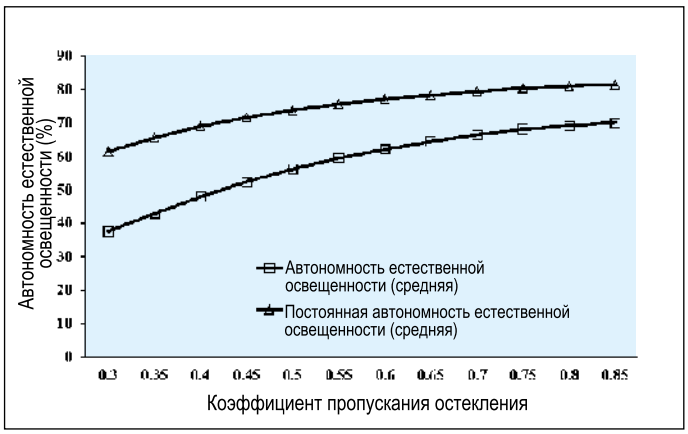


Рис. 5. Зависимость средней автономности естественной освещённости от коэффициента пропускания остекления (для большой площади остекления)

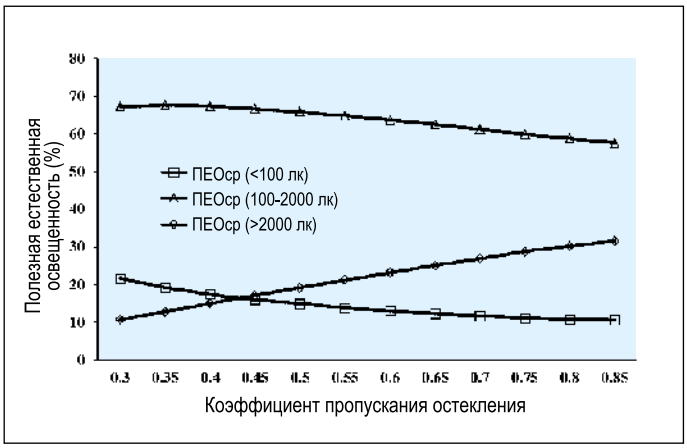


Рис. 6. Зависимость средней полезной естественной освещённости от коэффициента пропускания остекления (для большой площади остекления)

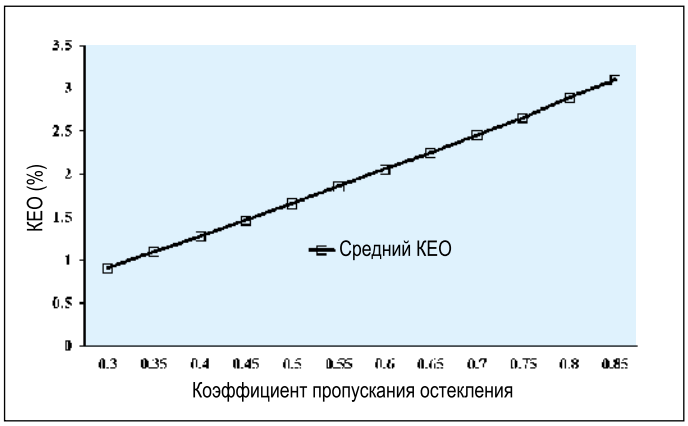


Рис. 7. Зависимость среднего значения КЕО от коэффициента пропускания остекления (маленькая площадь остекления)

ние может быть получено с помощью регрессии для выражения простого изменяющегося тренда:

$$KEO = 8,48 \cdot T - 0,583,\ (R^2 = 0,999), \qquad (3)$$

где T – коэффициент пропускания остекления.

На рис. 5 представлены вариации средней автономности естественной освещённости и средней постоянной автономности естественной освещённости для различных коэффициентов пропускания остекления. В отличие от линейного изменения КЕО, два значения АЕО имеют полиноминальную тенденцию изменения. По-видимому, увеличение КП приведёт к увеличению АЕО или АЕОп. Это нормально, что значение АЕОп выше, чем значение АЕО при каждом КП. Однако разница между АЕО и АЕОп имеет тенденцию уменьшаться с увеличением КП. Абсолютная разница между АЕОп и АЕО, в среднем, составляет около 16 %. Это связано с тем, что естественная освещённость ниже 500 лк все ещё будет включена в расчёт постоянной АЕО с дополнительной величиной (Райнхарт и др. 2006). Графики на рис. 5 могут быть описаны с помощью следующих уравнений:

$$AEO = 41,23 \cdot T^3 - 165,20 \cdot T^2 + 205,17 \cdot T - 10,22,$$
$$(F - test, p < 0,001), \qquad (4)$$
$$AEOn = 88,31 \cdot T^3 - 217,34 \cdot T^2 + 192,10 \cdot T + 21,17,$$
$$(F - test, p < 0,001). \qquad (5)$$

На рис. 6 показано, как три средних значения ПЕО изменяются в трёх различных тенденциях при различных значениях КП остекления в офисе открытой планировки. При увеличении КП уровни ПЕО (100–2000 лк) и ПЕО (<100 лк), как правило, немного уменьшаются, а ПЕО (>2000 лк), незначительно увеличивается. Очевидно, что ПЕО (100–2000 лк) достигает наибольшего значения для каждого КП. При КП = 0,45 ПЕО (<100 лк) и ПЕО (>2000 лк) имеют одинаковое значение. ПЕО (<100 лк) имеет более низкое значение, чем ПЕО (>2000 лк), когда КП <0,45, в то время как обратная тенденция появляется при КП >0,45. Средние значения ПЕО этих трёх типов составляют около 15 % (<100 лк), 64 % (100–2000 лк) и 21 % (>2000 лк). В офисе с большой площадью остекления обычно естественное освещение может создавать уровни освещённости в диапазоне 100–2000 лк. Кроме того, большой размер остекления приводит к превышению верхнего предела диапазона. Таким образом, освещённость в «тёмном» диапазоне (<100 лк) присутствует меньше всего. Более низкий коэффициент пропускания стекла (<0,45) приведёт к более низкой естественной освещённости (<100 лк). На основе кривых ПЕО на рис. 6 были получены следующие три уравнения для большой площади остекления:

$$ПЕО(<100лк) = -46,59 \cdot T^3 +$$
$$+ 115,80 \cdot T^2 - 103,51 \cdot T + 43,49,$$
$$(F - test, p < 0,001), \qquad (6)$$

$$ПЕО(100 - 2000лк) = 71,10 \cdot T^3 -$$
$$- 144,92 \cdot T^2 + 72,88 \cdot T + 56,57,$$
$$(F - test, p < 0,001), \qquad (7)$$

$$ПЕО(> 2000лк) = -24,0 \cdot T^3 +$$
$$+ 27,99 \cdot T^2 + 31,45 \cdot T - 0,46,$$
$$(F - test, p < 0,001). \qquad (8)$$

На втором этапе анализа были рассмотрены результаты моделирования офиса с небольшой площадью остекления (ООС 30 %). Как и на рис. 4, была обнаружена линейная зависимость между коэффициентом пропускания остекления и средним коэффициентом естественной освещённости, что и подтверждается рис. 7 (малый размер стеклопакета ООС 30 %). Линейный тренд можно выразить следующим уравнением:

$$KEO = 3,97 \cdot T - 0,308,\ (R^2 = 0,999). \qquad (9)$$

С увеличением КП увеличивается КЕО. Принимая КП = 0,3 в качестве эталона, значения КП 0,6 и 0,8 соответствуют КЕО 126 % и 218 %. По сравнению со случаем анализа большой площади остекления (рис. 4) значения КЕО офиса с малой площадью остекления возрастают медленней. Обычно уменьшение размера остекления с ООС 60 % до ООС 30 % приводит к 50 % снижению величины КЕО по всей рабочей плоскости.

На рис. 8 показано изменение средней автономности естественной освещённости и постоянной автономности ес-

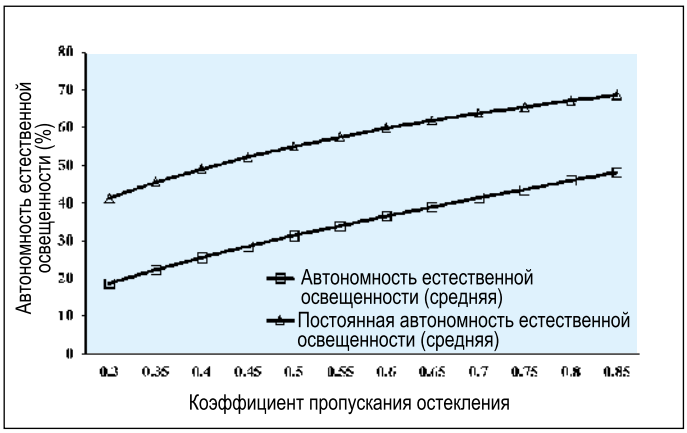


Рис. 8. Зависимость средней автономности естественной освещённости от коэффициента пропускания остекления (для маленькой площади остекления)

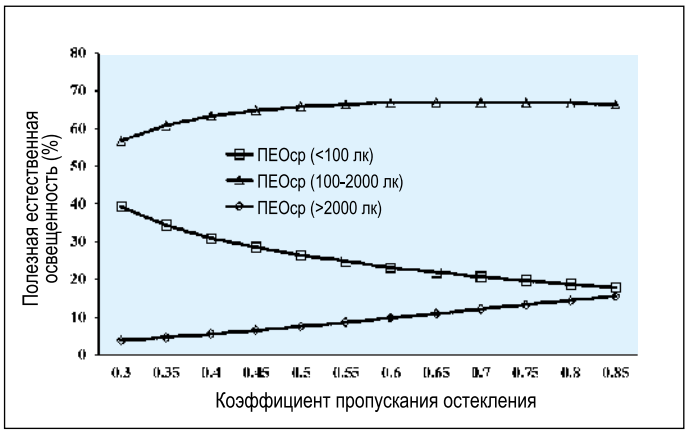


Рис. 9. Зависимость средней полезной естественной освещённости от коэффициента пропускания остекления (для маленькой площади остекления)

тественной освещённости при различных коэффициентах пропускания остекления. Увеличение КП значительно увеличивает значения АЕО и АЕОп. В отличие от ситуации с большой площадью остекления (рис. 5), малая площадь остекления на рис. 8 приводит к двум параллельным кривым АЕО и АЕОп. Для каждого коэффициента пропускания абсолютная разница между АЕО и АЕОп составляет около 21 %. Так результаты рис. 8 можно описать с помощью следующих уравнений:

$$AEO = 37{,}09 \cdot T^3 - 88{,}67 \cdot T^2 + 115{,}81 \cdot T - 8.98, \quad (F - test, p < 0{,}001), \tag{10}$$

$$AEOn = 50{,}70 \cdot T^3 - 136{,}9 \cdot T^2 + 152{,}75 \cdot T + 6{,}57, \quad (F - test, p < 0{,}001). \tag{11}$$

На рис. 9 приведены три средних значения ПЕО для офиса с малым остеклением, которые имеют различные вариации с точки зрения различных коэффициентов пропускания остекления. Когда КП < 0,45, увеличение коэффициента пропускания остекления всё ещё может увеличить значения ПЕО (100–2000 лк). Однако при КП > 0,45 увеличение коэффициента пропускания остекления существенно не повлияет на ПЕО (100–2000 лк). Аналогично результатам для большой площади остекления (рис. 6), более высокий КП приведёт к появлению низких значений ПЕО (<100 лк) и высоких значений ПЕО (>2000 лк). Разница между ПЕО (<100 лк) и ПЕО (>2000 лк) имеет тенденцию уменьшаться с увеличением коэффициента пропускания остекления. Средние значения ПЕО в этих трёх диапазонах составляют 26 % (<100 лк), 65 % (100–2000 лк) и 9 % (>2000 лк). Интересно, что можно обнаружить, что большое остекление (рис. 6) и малое остекление (рис. 9) достигают одинаковой полезной естественной освещённости (100–2000 лк). В отличие от большой площади остекления, офис с малой площадью остекления получает большее значение ПЕО (<100 лк) и меньшее значение ПЕО (>2000 лк). Эти результаты могут быть объяснены размером остекления: ООС 30 % соответствует минимальным требованиям размера окна согласно рекомендациям Британского института стандартов (2008), которые могут обеспечить достаточный уровень естественной освещённости в диапазоне 100–2000 лк и менее высокий уровень естественной освещённости >2000 лк в офисном здании.

Таким образом, графики на рис. 9 можно представить в виде следующих уравнений:

$$ПЕО(<100лк) = -135{,}80 \cdot T^3 + 294{,}69 \times \times T^2 - 232{,}55 \cdot T + 85{,}91, \quad (F - test, p < 0{,}001), \tag{12}$$

$$ПЕО(100 - 2000лк) = 151{,}63 \cdot T^3 - 328{,}13 \times \times T^2 + 232{,}75 \cdot T + 12{,}78, \quad (F - test, p < 0{,}001), \tag{13}$$

$$ПЕО(> 2000лк) = -16{,}61 \cdot T^3 + 34{,}67 \times \times T^2 - 0{,}74 \cdot T + 1{,}37, \quad (F - test, p < 0{,}001). \tag{14}$$

4.2. Зависимость естественного освещения от наличия загрязняющих частиц на остеклении

На внешней поверхности остекления поглощение света за счёт наличия слоя частиц углерода можно рассчитать с помощью (1). Коэффициент пропускания света $T_{ЧУ}$ можно рассчитать по формуле:

$$T_{ЧУ} = 1 - X - R, \tag{15}$$

где R – коэффициент отражения слоя твёрдых частиц углерода, X – коэффициент поглощения света. Согласно исследованию Фавеса и др. [18], количество отражённого света от слоя ЧУ было незначительным ($R \approx 0$). Таким образом, коэффициент пропускания света $T_{ЧУ}$ просто определяется уравнением поглощения света:

$$T_{ЧУ} = 1 - X. \tag{16}$$

Это выражение (16) может быть использовано в качестве динамического коэффициента коррекции загрязнения для пропускания окон в городских зданиях.

На основе уравнений (16) и (3) – (14) было разработано несколько алгоритмов оценки негативного влияния слоя ЧУ на проникновение естественного света в помещение. Для большой площади остекления разница доступности

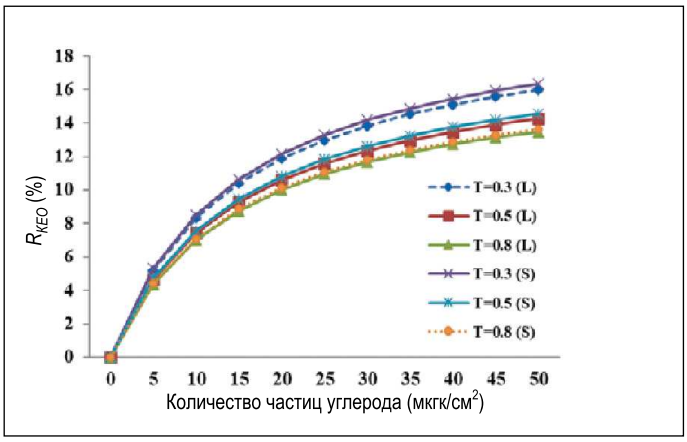


Рис. 10. Относительное снижение КЕО с увеличением количества частиц элементарного углерода на внешней поверхности остекления для трёх типовых коэффициентах пропускания (0,3, 0,5 и 0,8)

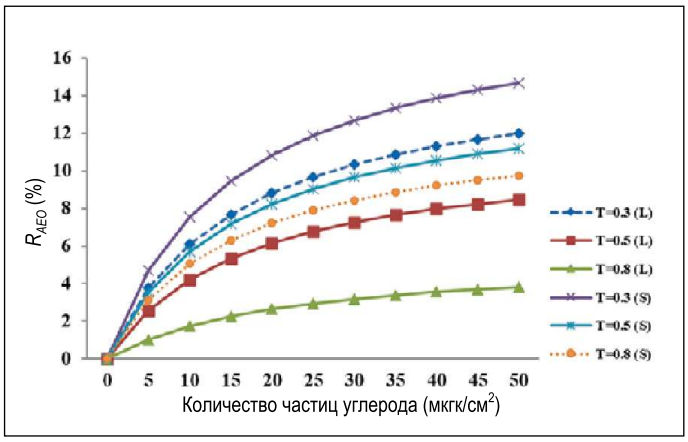


Рис. 11. Относительное снижение АЕО с увеличением количества частиц элементарного углерода на внешней поверхности остекления для трёх типовых коэффициентах пропускания (0,3, 0,5 и 0,8)

естественного света между чистым и загрязнённым остеклением рассчитывается по формуле:

$$\Delta KEO = 8{,}48 \cdot T \cdot X, \quad (17)$$

$$\Delta AEO = 41{,}23 \cdot T^3 A - 165{,}20 \cdot T^2 B + 205{,}17 \cdot T \cdot C, \quad (18)$$

$$\Delta AEOn = 88{,}31 \cdot T^3 A - 217{,}34 \cdot T^2 \cdot B + 192{,}10 \cdot T \cdot C, \quad (19)$$

$$\Delta ПЕО(<100\text{лк}) = -46{,}59 \cdot T^3 A + \\ + 115{,}8 \cdot T^2 \cdot B - 103{,}51 \cdot T \cdot C, \quad (20)$$

$$\Delta ПЕО(100-2000\text{лк}) = 71{,}10 \cdot T^3 \cdot A - \\ -144{,}92 \cdot T^2 \cdot B + 72{,}88 \cdot T \cdot C, \quad (21)$$

$$\Delta ПЕО(>2000\text{лк}) = -24{,}0 \cdot T^3 \cdot A + \\ + 27{,}99 \cdot T^2 \cdot B + 31{,}45 \cdot T \cdot C, \quad . \quad (22)$$

Для маленькой площади остекления разница доступности естественного света между чистым и загрязнённым остеклением могут быть описаны следующими формулами:

$$\Delta KEO = 3{,}97 \cdot T \cdot X, \quad (23)$$

$$\Delta AEO = 37{,}09 \cdot T^3 \cdot A - 88{,}67 \cdot T^2 \cdot B + 115{,}81 \cdot T \cdot C, \quad (24)$$

$$\Delta AEOn = 50{,}70 \cdot T^3 \cdot A - 136{,}92 \cdot T^2 \cdot B + 152{,}75 \cdot T \cdot C, \quad (25)$$

$$R_{ПЕО} = \frac{\Delta ПЕО}{ПЕО} \times 100\%, \quad (26)$$

$$\Delta ПЕО(100-2000\text{лк}) = 151{,}63 \cdot T^3 \times \\ \times A - 328{,}13 \cdot T^2 \cdot B + 232{,}75 \cdot T \cdot C, \quad (27)$$

$$\Delta ПЕО(>2000\text{лк}) = -16.6 \cdot T^3 \times \\ \times A + 34{,}67 \cdot T^2 \cdot B - 0{,}74 \cdot T \cdot C, \quad (28)$$

$$\Delta KEO = KEO(T) - KEO(T \cdot T_{ЧУ}) = \\ = KEO(T) - KEO(T \cdot (1-X)), \quad (29)$$

$$\Delta AEO = AEO(T) - AEO(T \cdot T_{ЧУ}) = \\ AEO(T) - AEO(T \cdot (1-X)), \quad (30)$$

$$\Delta ПЕО = ПЕО(T) - ПЕО(T \cdot T_{ЧУ}) = \\ ПЕО(T) - ПЕО(T \cdot (1-X)), \quad (31)$$

где коэффициенты A, B и C определяются следующим образом:

$$A = 1 - (1-X)^3, \quad (32)$$

$$B = 1 - (1-X)^2, \quad (33)$$

$$C = 1 - (1-X) = X. \quad (34)$$

С точки зрения этих алгоритмов, потеря доступности естественного света может быть оценена для конкретного остекления после измерения ситуации загрязнения слоя ЧУ.

4.3. Применение

В этом разделе представлено применение алгоритмов (17) – (28). Типовые коэффициенты пропускания остекления 0,3, 0,5 и 0,8 были выбраны в качестве репрезентативных для систем остекления с низким, средним и высоким коэффициентами пропускания соответственно. Применение алгоритмов рассматривается только для КЕО, АЕО и ПЕО (100–2000 лк).

На рис. 10 приведены графики снижения среднего КЕО в относительных единицах из-за осаждений ЧУ в соответствии со значениями КП 0,3, 0,5 и 0,8. Для расчёта было использовано следующее уравнение:

$$R_{KEO} = \frac{\Delta KEO}{KEO} \times 100\ \%. \quad (35)$$

Уменьшение КЕО изменяется полиномиально, то есть увеличение осаждения ЧУ явно уменьшило бы КЕО на рабочей плоскости, особенно в диапазоне 0–10 мкгк/м². При низком уровне осаждения ЧУ (<5 мкгк/м²) чётких различий в снижении КЕО между различными размерами остекления и коэффициентами пропускания обнаружить не удаётся. Однако снижение КЕО начинает расходиться при значении 5 мкгк/м², и эта расходимость имеет тенденцию к увеличению с увеличением осаждения ЧУ.

Как правило, размер остекления существенно не влияет на относительное снижение КЕО из-за ЧУ. Коэффициент пропускания стеклопакета является основным фактором, влияющим на его снижение. Чем ниже КП, тем выше относительное снижение КЕО. Для мест с преобладанием облачного неба наличие естественного света в помещении очень чувствительно к осаждению грязи на остеклении. Очень важно регулярно чистить оконную поверхность городских зданий. Если предположить, что уровень насыщения осаждения ЧУ составляет 30 мкгк/м^2, то максимальное относительное снижение КЕО составит менее 16 % [18].

На рис. 11 показано относительное снижение автономности естественной освещённости, вызванное осаждением ЧУ, в соответствии со значениями КП остекления 0,3, 0,5 и 0,8. Значения были рассчитаны следующим образом:

$$R_{AEO} = \frac{\Delta AEO}{AEO} \times 100\ \%. \qquad (36)$$

Относительные значения АЕО увеличиваются с увеличением количества ЧУ на внешней поверхности остекления. В отличие от наблюдений КЕО на рис. 10, как размер остекления, так и коэффициент пропускания могут оказывать явное влияние на снижение АЕО. При большом остеклении с КП=0,8 наблюдается наименьшее снижение АЕО (R_{AEO} <5 %), в то время как наибольшее снижение АЕО соответствует маленькой площади остекления с КП=0,3 (R_{AEO}>5 %). Интересно, что большая площадь остекления с КП=0,3 обеспечивает более резкое снижение АЕО, чем маленькая площадь остекления с КП 0,5 и 0,8. Это может свидетельствовать о том, что коэффициент пропускания света играет более важную роль в снижении АЕО, чем размер остекления. Средние значения каждой кривой составляют 10,3 % (маленькая площадь остекления, КП=0,3), 8,38 % (большая площадь остекления, КП=0,3), 7,84 % (маленькая площадь остекления, КП=0,5), 6,85 % (маленькая площадь остекления, КП=0,8), 5,88 % (большая площадь остекления, КП=0,5) и 2,57 % (большая площадь остекления, КП=0,8). Аналогично, максимальное относительное снижение АЕО было бы менее 14 %, если бы уровень насыщения осаждения ЧУ равен 30 мкгк/м^2. Можно отметить, что большой размер остекления в сочетании с более высоким коэффициентом пропускания остекления обеспечит достаточные условия естественного освещения даже при сильном загрязнении наружного воздуха и без регулярной очистки и технического обслуживания.

На рис. 12 наглядно с помощью графиков представлено влияние увеличения осаждения ЧУ на внешней поверхности остекления на относительное снижение полезной естественной освещённости в диапазоне 100–2000 лк. Значения были рассчитаны следующим образом:

$$R_{ПЕО} = \frac{\Delta ПЕО}{ПЕО} \times 100\ \%. \qquad (37)$$

По-видимому, вариации относительного снижения ПЕО (100–2000 люкс) можно разделить на две группы с точки зрения отрицательных/положительных значений ПЕО. При $R_{ПЕО}$>0 три кривые (ООС 30 %, КП=0,3, ООС 30 %, КП=0,5, ООС 60 %, КП=0,3) показывают возрастающее относительное снижение ПЕО с увеличением количества ЧУ. Это указывает на то, что ЧУ оказывает негативное влияние на уровень ПЕО. Маленькая площадь остекления с КП=0,3 имеет самые высокие значения, в то время как самые низкие значения достигаются большой площадью остекления с КП=0,3. Значения ООС 30 % с КП=0,5 находятся посередине. Эти результаты означают, что маленькая площадь остекления в сочетании с низким коэффициентом пропускания очень чувствительна к осаждению загрязняющих веществ для достижения необходимого уровня ПЕО. С другой стороны, при увеличении осаждения ЧУ для трёх кривых при $R_{ПЕО}$ <0 обнаруживается тенденция к уменьшению (ООС 60 %, КП=0,8, ООС 60 %, КП=0,5; ООС 30 %, КП=0,8). Это выражает противоположное мнение о том, что осаждение ЧУ может положительно повлиять на доступность полезной дневной освещённости. Кроме того, большая плоскость остекления с КП=0,8 позволяет получить самые низкие значения $R_{ПЕО}$, что означает наилучшее условия для ПЕО. Самые высокие значения найдены для маленькой площади остекления с КП=0,8. В общем случае верхние диапазоны абсолютных значений $R_{ПЕО}$ для представленных графиков составляют 1 % (ООС 60 %, КП=0,3; ООС 30 %, КП=0,8), 3 % (ООС 30 % и ООС 60 %, КП=0,5) и 6 % (ООС 60 %, КП=0,8, ООС 30 %, КП=0,3). За исключением крайних случаев (маленькая площадь остекления и низкий коэффициент пропускания, большой площадь остекления и высокий коэффициент пропускания), осаждение ЧУ существенно не повлияет на наличие полезной естественной освещённости. Согласно определению ПЕО, широкий диапазон освещённости (100–2000 лк) вполне может объяснить полученные результаты. Частое техническое обслуживание очистки может потребоваться только для зданий с небольшой площадью остекления (ООС 30 %).

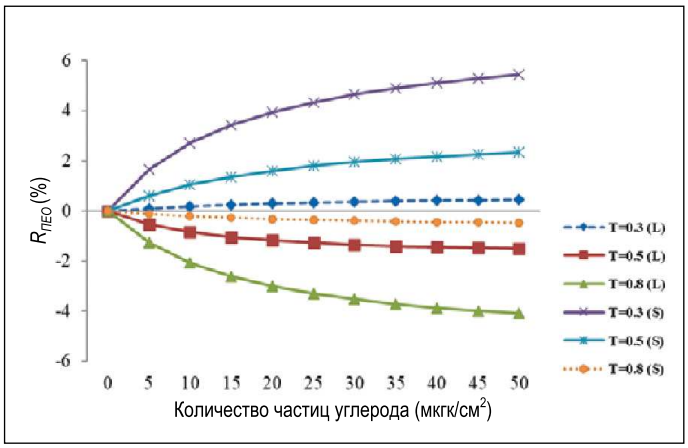


Рис. 12. Относительное снижение ПЕО (100–2000 лк) с увеличением количества частиц элементарного углерода на внешней поверхности остекления для трёх типовых коэффициентах пропускания (0,3, 0,5 и 0,8)

Согласно предыдущему анализу и обсуждениям, различные показатели естественного света, такие как КЕО, АЕО и ПЕО, приведут к некоторым расхождениям в оценке воздействия загрязнения на результирующие условия естественного освещения в офисе.

5. Заключение

В этом исследовании был представлен имитационный анализ доступности естественного света и загрязнения воздуха в типовом офисе открытой планировки в город-

ском районе Великобритании. Некоторые выводы, которые можно сделать из этого исследования, включают:

1. возможно, потребуется провести исследование прямой связи между коэффициентом пропускания остекления и наличием естественного света в помещениях офисных зданий, чтобы упростить процесс проектирования на ранней стадии,

2. установлено несколько простых алгоритмов оценки влияния коэффициента пропускания остекления на доступность естественного света для создания уровня освещённости на рабочей плоскости офисных зданий. Кроме того, были разработаны дополнительные алгоритмы прогнозирования снижения доступности естественного света из-за одного типового загрязнителя воздуха (элементарных частиц углерода). Эти алгоритмы могут быть использованы для эффективного сопровождения проектирования фасада,

3. было бы крайне важно провести динамический анализ с использованием климатического моделирования естественного света для достижения практической и всеобъемлющей оценки эффективности естественного освещения в офисном здании открытой планировки, поскольку традиционный метод расчёта КЕО может обеспечить только фундаментальную оценку без учёта местоположения и климата. Однако следует отметить, что различные показатели естественного света приведут к тому, что окончательные оценки будут демонстрировать некоторые расхождения,

4. для метрики, использующей средний КЕО, доступность естественного света в помещении значительно чувствительна к коэффициенту пропускания остекления, на который на прямую зависит от загрязнения окружающей среды. Однако размер остекления не окажет существенного влияния на условия естественного освещения, если будет достигнуто минимальное значение ООС 30 %,

5. согласно метрике, использующей АЕО, как коэффициент пропускания остекления, так и размер остекления могут оказывать влияние на доступность естественного света в помещении. Однако коэффициент пропускания остекления должен быть первым фактором, который следует учитывать при проектировании естественного освещения. Явное негативное воздействие загрязнения воздуха можно было бы обнаружить только для систем остекления со средним/низким коэффициентом пропускания. Большая площадь остекления в сочетании с высоким коэффициентом пропускания, возможно, обеспечит достаточный уровень естественной освещённости при наличии загрязнения воздуха,

6. в соответствии с наличием естественного света в помещении и метрикой, использующей ПЕО, позитивная тенденция может наблюдаться при загрязнении воздуха для систем остекления с большой площадью остекления (например, 80 %) и высоким коэффициентом пропускания, или отрицательная тенденция, при маленькой площади остекления (например, 30 %) и низком коэффициенте пропускания.

Ограничения и будущая работа: эти выводы, очевидно, ограничены простой офисной моделью и одним типовым загрязнителем воздуха (ЧУ), а также конкретным местоположением и климатом. Следует исследовать офисные модели с различными фасадными системами и ориентациями, а также в более сложных условиях загрязнения воздуха, чтобы найти общие результаты коррекции коэффициента загрязнения остекления в помещениях с наличием естественного света. Эти вопросы будут изучены в дальнейшей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. IEA (SHC Task 21/ ECBCS Annex 29) (2000). Daylight in buildings: a source book on daylighting system and components. Report of Lawrence Berkeley National Laboratory. Available from: https://facades.lbl.gov/daylight-buildings-source-book-daylighting-systems [Accessed 10 July 2019].

2. *Boyce P, Hunte C, Howlett O* (2003). The benefits of daylight through windows. Report of Lighting Research Centre. USA. Available from: www.lrc.rpi.edu/programs/daylighting/pdf/DaylightBenefits [Accessed 9 Nov 2011].

3. *Chen X, Zhang X, Du J* (2019a). Exploring the effects of daylight and glazing types on self-reported satisfactions and performances: a pilot investigation in an office. // Architectural Science Review, V64, #4, pp. 388–352.

4. *Chen X, Zhang X, Du J* (2019b). Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and human performances at a workspace: A full-scale experiment in Beijing. // Building and Environment, V153, pp. 168–185.

5. *Boubekri M, Cheung IN, Reid KJ, Wang CH, Zee PC* (2014). Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study. // Journal of Clinical Sleep Medicine, V10, #6, pp. 603–611.

5.1. *Borisuit A, Linhart F, Scartezzini J-L, Munch M* (2015). Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood. // Lighting Research & Technology, V47, pp. 1–18.

6. *Figueiro MG, Rea MS* (2016). Office lighting and personal light exposures in two seasons: Impact on sleep and mood. // Lighting Research & Technology, V48, #3, pp. 352–364.

7. *Tregenza PA, Stewart L, Sharples S* (1999). Reduction of glazing transmittance by atmospheric pollutants. // Lighting Research & Technology, V31, pp. 135–138.

8. *Sharples S, Stewart L, Tregenza PA* (2001). Glazing daylight transmittances: a field survey of windows in urban areas. // Building and Environment, V36, pp. 503–509.

9. *Watt J, Hamilton R* (2003). The soiling of buildings by air pollution. In: Brimblecombe, P. (Ed), Air Pollution Reviews. The Effects of Air Pollution on the Built Environment. Vol. 2. Imperial College Press, London, UK. pp. 289–334.

10. BSI (British Standards Institution) (2008). BS8206–2:2008. Lighting for buildings. Code of practice for daylighting.

11. SLL (The Society of Light and Lighting) (2014). Lighting for the built environment: LG10: Daylighting – a guide for designers. Norwich. UK.

11.1. *Ullah MB, Kurniawan JT, Poh, LK, Wai TK., Tregenza P A* (2003). Attenuation of diffuse daylight due to dust deposition on glazing in a tropical urban environment. // Lighting Research & Technology, V35, pp. 19–29.

12. *Mastekbayeva GA, Kumar S* (2000). Effect of dust on the transmittance of low-density polythene glazing in a Tropical climate. // Solar Energy, V68, pp. 135–41.

13. *Lanting RW* (1986). Black smoke and soiling. In: Lee, S.D., Schneider, T., Grant, L.D., Verkerk, P.J. (Eds.), Aerosols. // Lewis Publisher, Chelsea, Michigan, USA, pp. 923–932.

14. *Lombardo T, Chabas A, Lefevre RA, Verita M, Geotti-Bianchini F* (2005a). Weathering of a float glass exposed outdoor in urban area. // Glass Technology, V46, pp. 271–276.

15. *Lombardo T, Ionescu A, Lefevre RA, Chabas A, Ausset P, Cachier H* (2005b). Soiling of silica-soda-lime float glass in urban environment: measurements and modelling. // Atmospheric Environment, V39, pp. 989–997.

16. *Favez O, Cachier H, Chabas A, Ausset P, Lefevre R* (2006). Crossed optical and chemical evaluations of modern glass soiling in various European urban environments. // Atmospheric Environment, V40, pp. 7192–7204.

17. *Mardaljevic J* (2006). Examples of climate-based daylight modelling. // CIBSE National Conference 2006: Engineering the Future, London, UK.

18. *Reinhart CF, Herkel S* (2002). The simulation of annual daylight illuminance distributions – a state-of-art comparison of six Radiance-based method. // Energy and Buildings, V32, pp. 167–187.

19. *Philips GM, Littlefair PJ* (1988). Average daylight factor under rooflights. // CIBSE National Lighting Conference, Cambridge, UK.

20. *Nabil A, Mardaljevic J* (2006). Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors. // Energy and Buildings, V38, #7, pp. 905–913.

21. *Reinhart CF, Mardaljevic J, Rogers Z* (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. // LEUKOS, V3, pp. 7–31.

***Цзянтао Ду (Jiangtao Du)**, Ph.D. (2011) в настоящее время является профессором Школы архитектуры Ливерпульского университета, Великобритания. Он является дизайнером освещения и дипломированным инженером в международной профессиональной инженерной ассоциации, базирующейся в Лондоне (CIBSE) и членов общества света и освещения SLL. Его научные интересы включают свет и здоровье, проектирование естественного освещения и световое загрязнение. Его текущие исследования сосредоточены на изучении того, как вид, цвет и условия освещения влияют на здоровье и состояние человека в рабочих и жилых помещениях*

***Стив Шарплз (Steve Sharples)**, Ph.D. Возглавляет кафедру устойчивого экологического дизайна в Школе архитектуры Ливерпульского университета, Великобритания. Он является дипломированным инженером в международной профессиональной инженерной ассоциации, базирующейся в Лондоне (CIBSE) и членом общества света и освещения SLLОбласть научных интересов включает влияние окружающей среда на производительность зданий в контексте изменения климата, низкого углерода и экологического дизайна. Он работал в широком спектре предметных областей, включая энергетику, тепловой комфорт, вентиляцию, естественное освещение, шум, изменение климата и экологический дизайн*

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И ВЫСТАВКИ В 2021 ГОДУ (I квартал)

Дата	Название мероприятия	Место проведения
20–22.01	**Nepcon Japan – LED & Laser Diode Technology Expo** Международная выставка с конференцией по светодиодам и лазерным диодам	**Токио, Япония** lightsearch.com
26–29.01	**DairyTech. Молочная и мясная индустрия – 2021** 19-я Международная выставка оборудования и технологий для животноводства, молочного и мясного производств	**Москва, РФ** exponet.ru
09–11.02	**Strategies in Light 2021** Международная конференция с выставкой по светодиодам и освещению светодиодами	**Санта-Клара (Калиф.), США** manufacturer.lighting/expo/
02–05.03	**Интерлакокраска – 2021** 25-я Юбилейная международная специализированная выставка	**Москва, РФ** exponet.ru
30.03–02.04	**Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2021** 15-я Международная специализированная выставка оптической, лазерной и оптоэлектронной техники	**Москва, РФ** exponet.ru

Правила оформления рукописей, подаваемых в журнал «Светотехника»

Журнал публикует неопубликованные нигде ранее результаты оригинальных исследований и обзорные статьи на русском языке по различным направлениям светотехники. Рукописи статей принимаются на русском и (или) английском языках. Все авторы несут ответственность за содержание статьи. Плата с авторов за публикацию не взимается, гонорар не выплачивается.

Структура статьи

1. Название
2. ФИО авторов, место работы, e-mail
3. Аннотация 200–250 слов. Аннотация – это метаданные, публикуются на сайте отдельно от статьи, доступно всем бесплатно, что позволяет оценить необходимость изучения самой статьи. Для чиновников Международных науко-метрических баз данных служат для точно классификации статьи. Пишется в формате *IMRAD* – по сути, по два предложения на каждый пункт.
4. Ключевые слова на русском и английском языках не более 10-15 слов – так же метаданные. Сами слова могут в статье и не встречаться, их назначение – точное определение области исследований публикации.
5. Структура статьи в формате *IMRAD* (лучше, чтобы и разделы так и назывались):

– Введение (*Introduction*): для экспериментальных работ – точная формулировка решаемой научной задачи; для обзоров – цель обзора; для теоретических работ – постановка задачи, для которой позднее в статье будет дана точная формулировка.

– Методы (*Methods*): для экспериментальных работ – настолько точное описание установки, чтобы любой читатель мог повторить эксперимент, для теоретических работ – все основные приёмы и методы решения, позволяющие заинтересованному читателю получить окончательные выражения самому; обзорам определение метода не требуется.

– Результаты (*Results*) – должны быть указаны все основные новые научные результаты.

– Дискуссия или заключение (*Discussion*) – необходимо проанализировать, что дают новые результаты для данной области науки, каково их соотношение с действующей теорией.

– Подтверждение и признание участия третьих лиц, финансирования работы (*Acknowledgement*).

– Список литературы. Желательно не менее 10-12 источников литературы, причём из них около 40 % иностранные источники.

6. На отдельной странице приводятся (на английском языке):

– Название статьи.

– Имена и фамилии авторов (как в загранпаспорте).

– Официальное название места работы.

– Аннотация и ключевые слова.

– Список ссылок на статьи из журнала «Светотехника» дополнить соответствующими ссылками на статьи из журнала «*Light & Engineering*» (если они есть).

Список литература

Научная статья является частью развивающейся мировой научной дискуссии, поэтому в списке литературы должно быть не менее 30% адекватных ссылок на публикации ведущих мировых научных изданий на английском языке, входящих в базы данных цитируемых международных агентств, например, Scopus и Web of Science. Среди ссылок на статьи из баз должны быть статьи, опубликованные не позднее двух-пяти лет назад.

Порядок работы с редакцией и рецензирование

Статья проходит двойное рецензирование.

Рецензенты дают заключение по следующим пунктам: а) соответствует ли статья тематике журнала; б) является ли статья оригинальным исследованием или обзором; в) приведены ли в оригинальном исследовании чётко сформулированные новые научные результаты; г) достаточно ли надёжно обоснованы выводы статьи; д) понятно ли изложен материал статьи, соблюдено ли в ней единообразие в терминах и обозначениях; е) соблюдена ли структура IMRAD; ж) приведены ли ссылки на свежие данные и работы по теме, опубликованные в журналах, входящих в базы цитирования, например, *Scopus* и *Web of Science*.

В случае несоответствия тематике журнала, или отсутствия в статье сформулированного научного результата, или при значительном количестве выявленных фактических ошибок статья может быть отклонена от публикации без подробной рецензии.

При положительном заключении рецензентов, статья редактируется и отправляется в вёрстку. Редакция не согласовывает с авторами изменения и сокращения рукописи, имеющие редакционный характер и не затрагивающие принципиальных вопросов.

Оформление статьи

Оформление списка авторов

Первыми указываются инициалы, затем фамилия. Если коллектив авторов включает сотрудников разных учреждений, следует указать место работы почты каждого автора сноской при фамилии автора. Хотя бы для одного автора должен быть указан адрес *электронной почты для корреспонденции.*

На отдельном листе следует приложить краткие сведения об авторах (когда и какой вуз окончен, настоящее место работы и занимаемое положение, учёная степень и учёное звание, почётное звание, занятие научно-общественной деятельностью, область научных интересов и т.п.). Следует также представить цветную фотографию каждого автора в электронной виде: не менее 25×32 *мм*, от 300 *dpi*.

Оформление рисунков и таблиц

Таблицы, иллюстрации (рисунки, фотографии) и подписи к иллюстрациям нумеруются по порядку упоминания в тексте. Название иллюстрации или рисунка пишется после номера таблицы или рисунка.

Все графы в таблице имеют заголовки и разделяются вертикальными линиями. Сокращение слов в таблицах не допускается. При наличии в тексте одной таблицы таблица не нумеруется. В таблице без заголовка (что нежелательно) пишется только слово «Таблица».

Авторам следует избегать повторения одних и тех же данных на рисунках, в таблицах и в тексте.

Используемые сокращения

Следует избегать введения новой терминологии. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми (использоваться физические величины, единицы и обозначения, в частности, принятые в Международной системе СИ и Международном светотехническом словаре (М.: Русский язык, 1979)) Справочной книге по светотехнике (3-е изд.) 2006 г.

Все употребляемые в статье обозначения (за исключением общеизвестных констант типа e, h, c, π и т. п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом появлении в тексте.

Оформление списка литературы

Источниками данных предпочтительно указывать не сообщения частных лиц или организаций, а публикации в научной литературе.

Нежелательно давать ссылки на труднодоступные широкому читателю издания (например, на труды студенческих и ведомственных конференций). К ссылкам на материал из Интернета следует указывать дату последнего обращения к материалу.

Библиографические ссылки оформляются с учётом ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Например:

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.

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

Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.

Kokoschka, S. Zur Berechnung von Schwellenkontrasten fur die Detektion einfacher Schobjekte // Licht. – 1988. – 40, № 4. – S. 305–308.

Каршенбойм С.Г. Новые рекомендованные значения фундаментальных физических постоянных (КОДАТА2006) // УФН. – 2008. – Т. 178, № 10. –С. 1057–1064.

Патент РФ № 2159021, 04.12.2000.

Сысун В.В. Светомаскировочная фара на светодиодах // Патент России № 2266466. 2005. Бюл. № 35.

Официальные периодические издания:

электронный путеводитель / Рос. нац. б –ка

Центр правовой информации. [СПб], 2005–2007

URL: www.nlr.ru/lawcenter/izd/index.html (дата обращения: 18.01.2007).

Форма приёма статьи

Максимально допустимый объём статьи, как правило, 12 машинописных страниц формата *A4* и содержит не более 8 рисунков. Статья представляется в электронном виде, расширение имени файла – *doc* или *docx*, шрифт *Times New Roman*, размер шрифта –12, междустрочный интервал – 1,5, поля – верхнее и нижнее – 2, левое – 2,5, правое – 1,0).

Если статья подаётся на русском языке, все подписи на всех рисунках должны быть на русском языке.

Предпочтительные форматы рисунков: *jpg*, *png*, *tif, tiff, pdf.* Растровые рисунки должны иметь разрешение не менее 300 *dpi*. Оригиналы рисунков должны быть приложены отдельными файлами. Для векторных изображений желательно приложить оригинал в векторном формате. Графики, созданные в *MS Excel*, допускается передавать в документе *MS Word* вместе с текстом статьи. Необходимо учесть, если используются рисунки из других источников (например, Интернет), что каждый рисунок имеет автора, что должно быть указано.

Формулы в рукописи статьи должны быть набраны в программе *MathType*. Не принимаются статьи с формулами, набранными новым встроенным в *Microsoft® Word* (*Word* 2007 – 2016) редактором формул EqEd. Статьи подаются в том формате *doc* или *docx* редактора *Microsoft® Word*, что и были созданы – не допускается конвертация из одного формата в другой. Предпочтительным является формат doc редактора *Microsoft® Word* 2003.

После успешного рецензирования статьи на русском языке и её принятия к публикации в журнале «Светотехника», просим авторов сделать перевод полного редактированного текста на английский язык, что позволит ускорить публикацию статьи в журнале «*Light & Engineering*».

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

BL Group
International Lighting Engineering Corporation
BOOS LIGHTING GROUP

ВНИСИ

REFLUX
HID Lighting systems

interlight RUSSIA | intelligent building RUSSIA

СветоСервиС
СТАВРОПОЛЬЕ

г. Пятигорск, Беседка Эолова Арфа

ООО «Светосервис-Ставрополье»
357500, г. Пятигорск, проезд Суворовский 1И, стр. 1, помещение 6

pleskach@svsrv.ru
svetoservis.ru

+7 (8793) 38-33-71

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «СВЕТОТЕХНИКА» ЗА 2020 ГОД

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОБЗОРЫ

Айзенберг Ю.Б., Будак В.П. 2010-е: о времени, журнале и светотехнике. № 1. С. 1–3.

Ван Боммель В. Знания, необходимые современным светотехникам. № 2. С. 16–32.

БИБЛИОГРАФИЯ И КРИТИКА

Готовится к выходу книга «Утилитарное наружное освещение». № 4. С. 54.

Коробко А.А. Комментарий к статье М.С. Сенгиза «Влияние угла наклона светильника и топологии осветительной установки на характеристики дорожного освещения». № 2. С. 54–55.

Лесман Е.А. Летопись инженерных систем Эрмитажа. № 1. С. 87

Новые книги по светотехнике. № 5. С. 96.

БИЗНЕС И ИННОВАЦИИ

№ 1. С. 26, 59, 63; № 2. С. 4–5, 45; № 3. С. 9, 41, 50, 58, 63, 70, 77, 85; № 4. С. 10, 16, 59, 88; № 5. С. 8, 28, 51, 60, 78; № 6. С. 25, 30, 52.

ЕСТЕСТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Гиясов А.И. Моделирование инсоляционного режима застройки с применением инсопланограммы. № 1. С. 60–63.

Гиясов А.И. Светопланограф, моделирующий инсоляцию зданий и застройки арктической зоны России. № 6. С. 31–36.

Дворецкий А.Т., Сергейчук О.В., Спиридонов А.В. Солнечные карты в проектировании солнцезащитных устройств общего положения. № 5. С. 21–24.

Ду Ц., Шарплс С. Динамический анализ влияния загрязнения воздуха на наличие естественного освещения в офисе открытой планировки в Лондоне. № 6. С. 72–80.

Захид М.А., Чаван Г.Т., Чо Я.Х., Ы Дж. Расчёт оптимального угла наклона для выработки максимальной энергии от солнечной панели с использованием моделей ясного неба и интенсивности падающих лучей. № 5. С. 67–72.

Кёсе Б., Казанасмаз Т. Применение призматических панелей для оптимизации размера окна, обращённого на юг, и глубины помещения для наиболее эффективного использования естественного света. № 2. С. 72–75.

Леонидов А.В. Аналитическое представление взаимосвязи угловой высоты Солнца и местного времени при расчётах естественной облучённости и освещённости земной поверхности. № 2. С. 37–39.

Соловьёв А.К. Современные подходы к нормированию естественного освещения жилых зданий. Результаты исследований. № 4. С. 5–10.

Яо Ц., Чэнь Л.И., Цзинь У. Неопределённость характеристик естественного освещения при использовании регулируемых вручную солнцезащитных устройств и её влияние на расходуемую на освещение энергию. № 1. С. 48–54.

ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИЙ

Защита диссертации В.Г. Терехова. № 6. С. 67.

Защита диссертации Т.В. Мешковой. № 2. С. 103.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Opora *Engineering*: Качество, надёжность, оперативность. № 1. 2 с. обл.; № 2. 2 с. обл.; № 3. 3 с. обл.; № 4. 2 с. обл.

Гарантия высокого качества жизни жителей города «Светосервис Сочи». № 3. С. 59.

Инновационные решения в освещении для столицы и регионов. № 1. С. 95.

Лихославльский завод «Светотехника»: российское производство с качеством мирового уровня. № 1. 4 с. обл.

Международная выставка *Interlight Russia | Intelligent building Russia*. № 2. С. 46.

Новая книга – учебное пособие по светотехнике. № 6. С. 1.

Освещение беседки «Эолова Арфа» в г. Пятигорске («Светосервис-Ставрополье»). № 6. С. 83.

Подписка на журнал «Светотехника». № 1. С. 96; № 2. 4 с. обл.; № 3. 4 с. обл., № 4. 4 с. обл.

Светильник со светодиодами производства Кадошкинского электротехнического завода. № 1. С. 85; № 2. С. 93.

Светлые решения для умного города от МСК БЛ Групп. № 1. С. 64–65; № 2. С. 40–41; № 3. С. 42–43; № 4. С. 64–65; № 6. С. 10–11.

Светосервис-Кубань: уникальные решения для освещения. № 4. С. 1.

Светосервис-СПб: светотехнические проекты любого уровня сложности. № 4. С. 31.

Ультрафиолетовые облучатели ЛЗСИ. № 3. С. 96; № 5. С. 1; № 6. 4 с. обл.

Умный свет для умного города. Светосервис-Волгоград. № 2. С. 104; № 6. С. 71.

Управление светом – основа безопасности. № 1. 3 с. обл.; № 4. 3 с. обл.; № 6. 3 с. обл.

Фитооблучатели производства Кадошкинского электротехнического завода. № 3. 2 с. обл.

ИСТОРИЯ СВЕТОТЕХНИКИ

Айзенберг Ю.Б. Воины-светотехники на передовой при штурме Берлина в апреле 1945 года. № 3. С. 10–11.

Айзенберг Ю.Б. Полые световоды – одно из новых направлений развития светотехнической науки и техники (мемуарно-обзорная статья). № 5. С. 79–90.

Лесман Е.А. Свет в Берлинской операции. № 3. С. 11–12.

Слава участникам Великой Отечественной войны. № 3. С. 1.

Снетков В.Ю., Лебедкова С.М. Вклад в великую победу преподавателей и сотрудников кафедры светотехники НИУ «МЭИ». № 3. С. 17–21.

Федорищев П.А. Ветераны Всесоюзного светотехнического института. № 3. С. 13–16.

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Ким Ц.-Т., Ким Ч.-Х. Исследование безопасности и светотехнических параметров светодиодной лампы прямой замены. № 5. С. 29–35.

Коваленко О.Ю., Журавлёва Ю.А. Анализ характеристик галогенных и светодиодных автомобильных ламп. № 2. С. 42–45.

Маняхин Ф.И., Ваттана А.Б., Мокрецова Л.О. Применение механизма рекомбинации Шокли-Нойса-Саа для модели вольт-амперной характеристики светодиодных структур с квантовыми ямами. № 4. С. 45–50.

Маняхин Ф.И., Мокрецова Л.О. Физико-математическая модель зависимости внутренней квантовой эффективности от тока светодиодов с квантовыми ямами от тока. № 5. С. 73–78.

Раул Д., Гхош К. Термический анализ радиаторов и кристаллов мощных светодиодных модулей при разных материалах теплового интерфейса. № 4. С. 80–88.

Сокмен К.Ф, Караташ О.Б. Исследование зависимостей температуры p-n-переходов и световых потоков СД модулей нового поколения от различных параметров. № 3. С. 51–58.

Старшинов П.В., Попов О.А., Иликеева Р.А., Буреева Д.А., Ирхин И.В., Левченко В.А., Терехов Г.П. Эффективный источник УФ излучения на основе бесферритного индукционного ртутного разряда в замкнутой трубке малого диаметра. № 1. С. 56–59.

Юссиф Р.А., Сахаб А., Циссис Ж., Малеб В., Хамади М. Расчёт полных объёмных коэффициентов излучения разрядных ламп высокой интенсивности. № 1. С. 71–75.

КАЧЕСТВО И СЕРТИФИКАЦИЯ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Нестёркина Н.П., Журавлёва Ю.А., Коваленко О.Ю., Микаева С.А. Сравнительный анализ характеристик светодиодных филаментных ламп для бытового освещения. № 5. С. 25–28.

Рожкова Т.А., Сысоева Е.А. Новые правила доступа светотехнической продукции на рынок ЕАЭС: соответствие четырём техническим регламентам. № 4. С. 60–63.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ РАСЧЁТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Агирбас А., Алакавук Э. Оптимизация фасада учебного корпуса с использованием многокритериальных эволюционных алгоритмов. № 6. С. 60–67.

Алатас Б., Бингол Х. Сравнительная оценка основанных на законах распространения света интеллектуальных поисковых и оптимизационных алгоритмов. № 3. С. 86–93.

Гиясов А.И. Моделирование инсоляционного режима застройки с применением инсопланограммы. № 1. С. 60–63.

Ершов С.В., Жданов Д.Д., Волобой А.Г., Дерябин Н.Б. Метод квазизеркальных элементов для снижения стохастического шума при моделировании освещённости. № 3. С. 64–70.

Катаев М.Ю., Дадонова М.М. Ефременко Д.С. Коррекция освещённости многовременных *RGB*-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата. № 6. С. 19–25.

Маняхин Ф.И., Ваттана А.Б., Мокрецова Л.О. Применение механизма рекомбинации Шокли-Нойса-Саа для модели вольт-амперной характеристики светодиодных структур с квантовыми ямами. № 4. С. 45–50.

Сенгиз М.С., Йеткин С. Расчёт теплового менеджмента уличных светильников со светодиодами. № 5. С. 61–66.

Талби М., Менсиа Н., Эззауйя Н. Моделирование фотоэлектрической панели с использованием *MATLAB* и *Simulink* и применение метода отслеживания точек максимальной мощности на основе нейронных сетей. № 6. С. 46–52.

ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И НЕЗРИТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТА

Вассерман А.Л. Обеззараживание воздушной среды УФ бактерицидным излучением. № 2. С. 6–15.

Ошлаков В.Г., Щербаков А.П. Оптимизация поляризационного нефелометра. № 6. С. 53–59.

Поповский Ю.Б., Щепетков Н.И. Инсоляция и *COVID*-19: защита от агрессора. № 3. С. 23–26.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Айзенберг Ю.Б., Будак В.П. 2010-е: о времени, журнале и светотехнике. № 1. С. 1–3.

ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Аяз М., Юсел У., Эрхан К., Оздемир Э. Новая энергоэффективная система управления освещением с учётом изменения естественной освещённости в помещении: проектирование и внедрение. № 6. С. 37–45

Баг М., Мазумдар С., Рэй К.К. Дешёвый датчик освещённости для систем управления совмещённым освещением. № 3. С. 71–77.

Капитонов С.С., Винокуров А.С., Прытков С.В., Григорович С.Ю., Капитонова А.В., Гущин Д.В., Медведев С.А., Вильгельм Д.В. Влияние электрического режима работы светильников со светодиодами на изменение их коррелированной цветовой температуры в процессе эксплуатации. № 4. С. 66–70.

Кокаман Б. Энергоэффективность освещения исторических зданий на примере освещения караван-сарая Эль-Аман. № 2. С. 56–62.

Сенгиз М.С. Влияние угла наклона светильника и топологии осветительной установки на характеристики дорожного освещения. № 2. С. 47–54.

Ширяев Д.С., Козырева О.А., Полухин И.С., Щеглов С.А., Дегтярёва С.А., Одноблюдов М.А., Бугров В.Е. Система интеллектуального освещения и передачи на основе *RGBW*-светодиодов. № 6. С. 26–30.

ОСВЕЩЕНИЕ ГОРОДОВ

Нарбони Р. Освещение общественных пространств: новые тенденции и дальнейшее развитие. № 3. С. 27–37.

Сенгиз М.С., Йеткин С. Расчёт теплового менеджмента уличных светильников со светодиодами. № 5. С. 61–66.

ПРАКТИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Будак В.П., Желтов В.С., Мешкова Т.В., Чембаев В.Д. Экспериментальное исследование нового критерия качества освещения на основе анализа распределения яркости на станциях Московского метрополитена. № 1. С. 20–26.

Капитонов С.С., Винокуров А.С., Прытков С.В., Григорович С.Ю., Капитонова А.В., Гущин Д.В., Медведев С.А., Вильгельм Д.В. Влияние электрического режима работы светильников со светодиодами на изменение их коррелированной цветовой температуры в процессе эксплуатации. № 4. С. 66–70.

Спиридонов А.В., Умнякова Н.П. Рекомендации по реставрации исторических светопрозрачных покрытий ГМИИ им. А.С. Пушкина. № 4. С. 11–16.

Чаттерджи С., Рой Б. Разработка и практическая реализация установки внутреннего освещения с возможностью передачи данных видимым светом. № 1. С. 76–84.

ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩИЕ АППАРАТЫ, ЭЛЕКТРОУСТАНОВОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Баг М., Мазумдар С., Рэй К.К. Дешёвый датчик освещённости для систем управления совмещённым освещением. № 3. С. 71–77.

Кондратьева Н.П., Филатов Д.А., Терентьев П.В. Исследование режимов работы системы «светодиодный источник света с управляемым УУ – симисторный светорегулятор». № 2. С. 63–66.

РАБОТА МЕЖДУНАРОДНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Блаттнер П. О нынешней и будущей деятельности Международной комиссии по освещению. № 5. С. 5–8

Зиничева А.С., Качалина М.Д. Онлайн семинар Американского светотехнического общества (*IES*) на тему «Бактерицидное УФ облучение во время коронавируса *COVID*-19»

Международная комиссия по освещению выпустила официальное заявление по использованию УФ излучения для снижения риска передачи *COVID*-19. № 3. С. 26

Новости Международной комиссии по освещению. № 1. С. 59.

Семинар МКО по фотометрии и колориметрии. № 4. С. 88.

СВЕТОВОЙ ДИЗАЙН

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». № 2. С. 94–100.

Виноградов В.В. Варианты экспериментального дизайна в СССР на примере дизайн-проекта бытовых светильников. № 6. С. 5–9.

Воронов В.В., Щепетков Н.И. О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера. (Часть I. Теоретические основы и результаты натурных исследований). № 1. С. 6–11.

Воронов В.В., Щепетков Н.И. О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера. (Часть II. Экспериментальные лабораторные исследования). № 2. С. 33–36.

Воронов В.В., Щепетков Н.И. О методе проектирования архитектурного освещения производственного интерьера (Часть III. Результаты и выводы). № 3. С. 60–63.

Карпенко В.Е. Методика обучения световому дизайну по направлению «Дизайн архитектурной среды». № 4. С. 17–22.

Нарбони Р. Освещение общественных пространств: новые тенденции и дальнейшее развитие. № 3. С. 27–37.

Тереджи А., Озата О. Анализ и стратегия проектирования зонального освещения участка «Музей Мевланы – Культурный центр «Мевлана»» в г. Конья. № 1. С. 41–47.

Щепетков Н.И., Завгородская Т.Н. Свет памяти в мемориальных ансамблях. № 3. С. 4–9

Эфе С.Б., Вархан Д. Внутреннее освещение исторического здания с помощью светодиодных технологий на примере мечети Фейт Паша. № 5. С. 15–20.

СВЕТОВЫЕ ПРИБОРЫ

Абрамов А.В, Богданов А.А., Данилко А.В., Дмитриев П.Б., Карев А.В., Степанов А.В. Методика измерения пусковых токов в осветительных приборах со светодиодами. № 5. С. 9–14.

Икстена П.Р., Пучета А.А., Колонна К.Л., Буфо Н. Оценка аргентинских светодиодных светильников для уличного освещения. № 1. С. 66–70.

Капитонов С.С., Винокуров А.С., Прытков С.В., Григорович С.Ю., Капитонова А.В., Гущин Д.В., Медведев С.А., Вильгельм Д.В. Влияние электрического режима работы светильников со светодиодами на изменение их коррелированной цветовой температуры в процессе эксплуатации. № 4. С. 66–70.

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Международные конференции и выставки в 2020 году (II квартал). № 1. С. 55.

Международные выставки и конференции в 2020 г. (III квартал). № 3. С. 63

Международные выставки и конференции в 2020 г. (IV квартал). № 4. С. 50.

Международные выставки и конференции в 2021 г. (I квартал). № 6. С. 80.

Правила оформления рукописей, подаваемых в журнал «Светотехника». № 1. С. 92–93.

СТУДЕНЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Конкурс курсовых проектов НИУ «МЭИ» по дисциплине «Компьютерная графика». № 1. С. 88.

Краснов С. Проект освещения «зелёного» эко-кафе. № 1. С. 89–90.

Работы по световому дизайну, выполненные студентами Дальневосточного федерального университета. № 4. 1 с. обл.

Серпикова А.О. Освещение концертной площадки.. № 1. С. 91.

Чуканова А.С. Освещение художественной мастерской. № 1. С. 88–89.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СВЕТОТЕХНИКА И ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Айзенберг Ю.Б., Будак В.П. 2010-е: о времени, журнале и светотехнике. № 1. С. 1–3.

Апресян Л.А., Власова Т.В. Асимметричное приближение эффективной среды для описания оптических характеристик случайно-неоднородных сред с дискретными вкраплениями. № 2. С. 90–92.

Бодроги П., Го С., Кхан Т.К. Светлота в условиях дневного зрения: психофизическое моделирование посредством сигналов синечувствительных фоторецепторов сетчатки. № 4. С. 32–44.

Бодроги П., Карелла Д., Кхан Т.К. Взвешивание значимости различных цветов на основе субъективных оценок цветовых предпочтений. № 2. С. 82–89.

Будак В.П., Ефременко Д.С., Смирнов П.А. Описание дифракции Фраунгофера в приближении теории светового поля. № 4. С. 55–59.

Векленко Б.А. Энергия, информация и запредельные скорости в квантовой электродинамике. № 2. С. 67–71.

Герри Э., Циссис Ж., Комон С., Каналь Л., Бешар Э. Световая и цветовая среда для престарелых. № 1. С. 12–19.

Калошин Г.А., Будак В.П., Шишкин С.А., Жуков В.В. Влияние рассеянного излучения на возможности наведения по лазерному пучку. № 5. С. 38–43.

Леонидов А.В. Методика определения эффективных режимов воздействия оптического излучения при управлении циркадианной активностью организма человека. № 5. С. 44–51.

Николаева О.В. О вариантах основной формулы атмосферной коррекции. № 2. С. 76–81.

Скорик Ю.А. О влиянии освещения светодиодами и его динамики на зрительные функции и общее состояние наблюдателя. № 1. С. 27–30.

Хуан Ч., Лю Ц., Лю И., Пойнтер М., Бодроги П., Кхан Т.К., Лю А. Зависимость цветовых предпочтений от пола: предварительное исследование. № 4. С. 23–30.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Просовский О.Ф., Буднев А.Ю., Денисов Д.Г., Барышников Н.В., Просовский Ю.О. Современная система прямого оптического широкополосного контроля толщины напыляемых оптических покрытий. № 4. С. 51–54.

ФОТОМЕТРИЯ И КОЛОРИМЕТРИЯ

Аталар Ф., Узун К., Гедикли А., Йылмаз А.Е., Уур М. О влиянии источников света на цвета объектов. № 1. С. 31–35.

Бодроги П., Карелла Д., Кхан Т.К. Взвешивание значимости различных цветов на основе субъективных оценок цветовых предпочтений. № 2. С. 82–89.

Гурылева А.В., Хорохоров А.М., Кобозев В.С. Методы многоканальной съёмки для гиперспектрометров с высоким спектральным и пространственным разрешением. № 3. С. 78–85.

Жбанова В.Л. Исследование методов определения цветовых различий в равноконтрастной колориметрической системе *CIELAB*. № 1. С. 36–40.

Жбанова В.Л. Оценка и подбор цветовых пространств для цифровых систем. № 5. С. 53–60.

Столяревская Р.И. Обзор особенностей использования мини-спектрорадиометров с ПЗС-матрицами в прикладной фотометрии. № 6. С. 12–18.

ХРОНИКА

Айзенберг Ю.Б. Всемирный День света. № 3. С. 93.

Журналу «Электричество» – 140 лет. № 4. С. 93–96.

Лесман Е.А. Зеркала в пустыне. № 2. С. 102, 1 с. обл.

Лесман Е.А. Летопись инженерных систем Эрмитажа. № 1. С. 87

Лесман Е.А. Световое шоу в Санкт-Петербурге. № 5. С. 95.

Мешкова Т.В. Всероссийская научно-практическая конференция по светотехнике. № 5. С. 94–95.

Памяти Е.И. Розовского. № 4. С. 89.

Потапова Н.В. Увидеть невидимое! № . 5. С. 91–93.

Серый Е.С. Новое в техническом регулировании рынка. № 2. С. 101–**102.**

Юбилей А.Э. Юновича. № 4. С. 90–92.

Юбилей В.В. Бармина. № 1. С. 86.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Аяз М., Юсел У., Эрхан К., Оздемир Э. Новая энергоэффективная система управления освещением с учётом изменения естественной освещённости в помещении: проектирование и внедрение. № 6. С. 37–45.

Гюрсой М.Е., Диндар Б., Гюль О. Новая стратегия преобразования традиционного дорожного освещения в умное. № 3. С. 44–50.

Кокаман Б. Энергоэффективность освещения исторических зданий на примере освещения караван-сарая Эль-Аман. № 2. С. 56–62.

Овчукова С.А., Кондратьева Н.П., Коваленко О.Ю. Экономия электроэнергии в световых технологиях сельскохозяйственного производства. № 6. С. 68–70.

Тихонов П.В. Энергосберегающая система освещения на основе фотоэлектрических модулей. № 3. С. 38–41.

Чибук М. Снижение энергопотребления в беспроводных сенсорных сетях дорожного освещения. № 4. С. 71–79.

75 ЛЕТ ПОБЕДЕ В ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЕ

Айзенберг Ю.Б. Воины-светотехники на передовой при штурме Берлина в апреле 1945 года. № 3. С. 10–11.

Лесман Е.А. Свет в Берлинской операции. № 3. С. 11–12.

Слава участникам Великой Отечественной войны. № 3. С. 1.

Снетков В.Ю., Лебедкова С.М. Вклад в великую победу преподавателей и сотрудников кафедры светотехники НИУ «МЭИ». № 3. С. 17–21.

Федорищев П.А. Ветераны Всесоюзного светотехнического института. № 3. С. 13–16.

Щепетков Н.И., Завгородская Т.Н. Свет памяти в мемориальных ансамблях. № 3. С. 4–9

Подписывайтесь на журнал

СВЕТО ТЕХНИКА

На 1-е полугодие 2021 года

Индекс журнала 70808
в каталоге «Пресса России»,
отдел «АРЗИ».
Редакция также оформляет
подписку на журнал

Адрес: 129626, г. Москва,
пр. Мира, 106, ВНИСИ, оф. 327, 334
Тел/факс: 8(495) 682-58-46
E-mail: bulgakova@l-e-journal.com

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-42849 от 01 декабря 2010 г., выданное Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Тираж 1200. Цена свободная.

СветоСервиС
ТЕЛЕМЕХАНИКА

Управление светом – основа безопасности

- Экономия
- Безопасность
- Энергоэффективность

ООО «Светосервис-ТМ»
129626, Москва, 1-й Рижский переулок, д. 6, стр.2

info@svs-tm.ru
svs-tm.ru

+7 (495) 780-75 98

ООО «Лихославльский завод светотехнических изделий»

Ультрафиолетовые облучатели ЛЗСИ – надёжная защита от бактерий и вирусов!

БАКТЕРИЦИДНЫЕ ОБЛУЧАТЕЛИ ОТКРЫТОГО ТИПА – ЭТО:

- ВЫСОКАЯ СКОРОСТЬ ДЕЗИНФЕКЦИИ
- МАКСИМАЛЬНАЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ
- ЭКОНОМИЧНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ
- ПРОСТОТА ПРИМЕНЕНИЯ

ISSN 0039-7067

9 770039 706006 >

171210, Тверская область, г. Лихославль, Первомайская улица, 51

galad.ru

(48261) 3-59-04

Бактерицидный облучатель открытого типа «Нуклон»