

Знания, необходимые современным светотехникам¹

В. ВАН БОММЕЛЬ

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

Аннотация

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

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

ники должны ориентироваться в этих новых технологиях и областях применения.

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

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

1. Основы

1.1. Работа зрительной системы

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

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

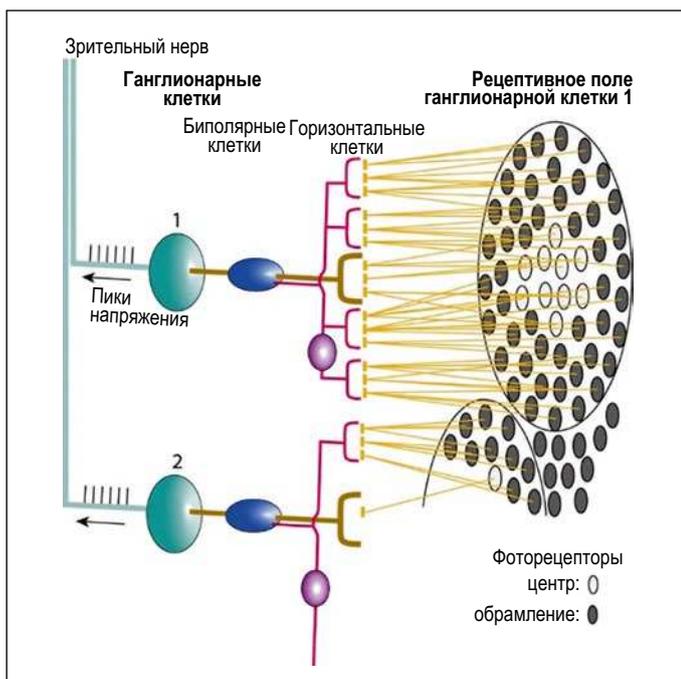


Рис. 1. Рецептивные поля двух ганглионарных клеток

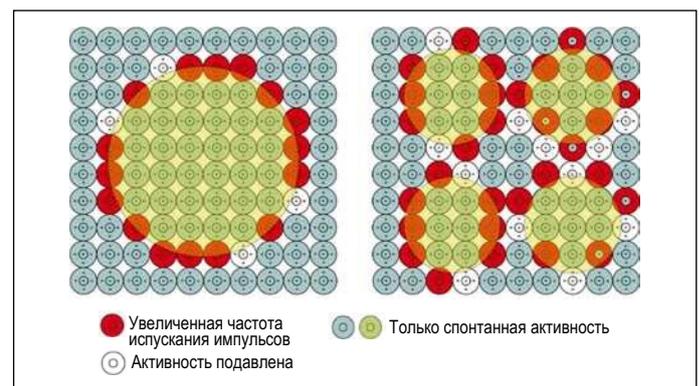


Рис. 2. Обнаружение краёв источника света. Источник света, имеющий равномерную яркость (а), возбуждает меньшее количество ганглионарных клеток, чем источник, имеющий неравномерную яркость (б)

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

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

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

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

Колбочки активны главным образом при уровнях освещения, превышающих примерно 5 кд/м^2 . В этом случае зрение называют дневным. Кривая спектральной чувствительности глаза $V(\lambda)$, которая определена для дневного зрения, лежит в основе всех фотометрических единиц измерения.

1.2. Цвет

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

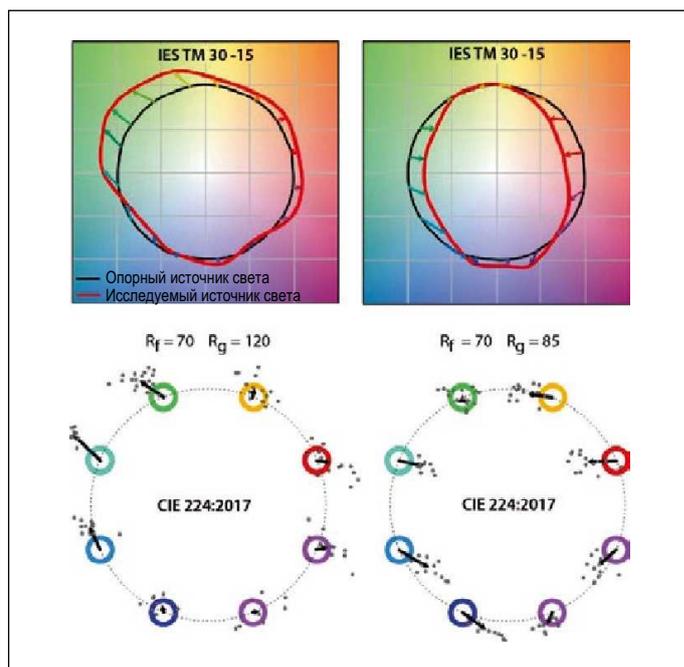


Рис. 3. Векторные отображения цветов согласно *IES TM 30-15* (вверху) и *CIE 224:2017* [11] (внизу), отображающие сдвиги цветов, полученные применительно к двум источникам света, по отношению к соответствующим им опорным источникам света

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

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

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

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

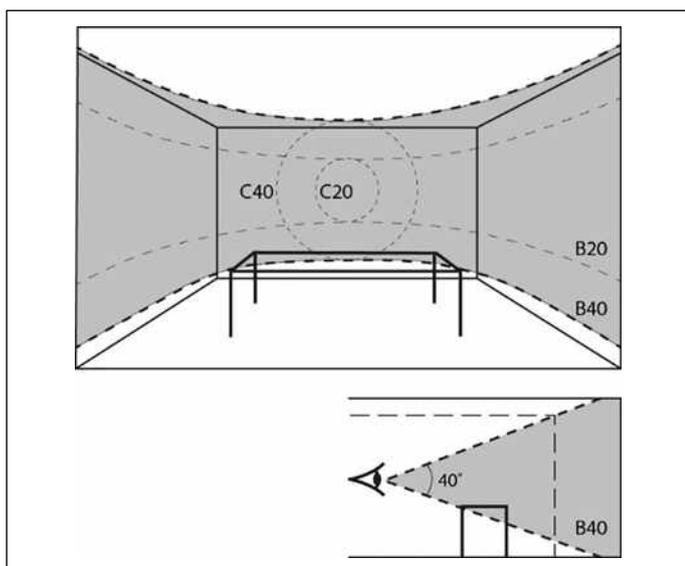


Рис. 5. Макет конференц-зала с указанием различных основных участков, который использовался в [20]

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

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

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

1.4. Зрительная удовлетворённость

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

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

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

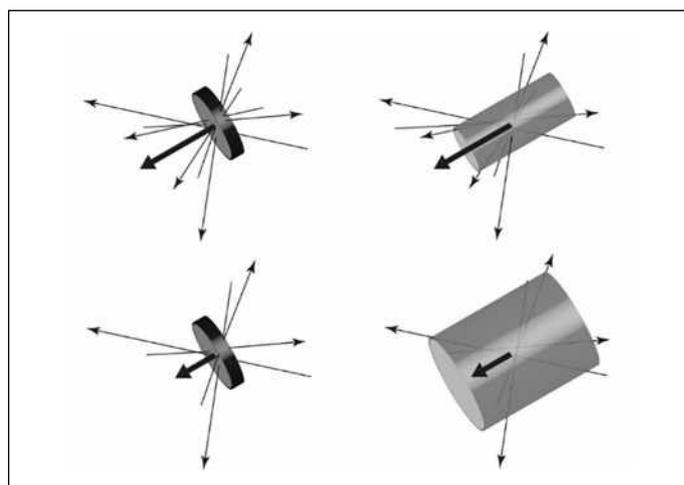


Рис. 6. Различие между световыми лучами и потоком освещения: небольшими стрелками обозначены световые лучи, а широкими стрелками обозначены векторы освещения. Диаметр световой трубки обратно пропорционален абсолютной величине вектора. Вверху: большой вектор освещения и, соответственно, маленькая световая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

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

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

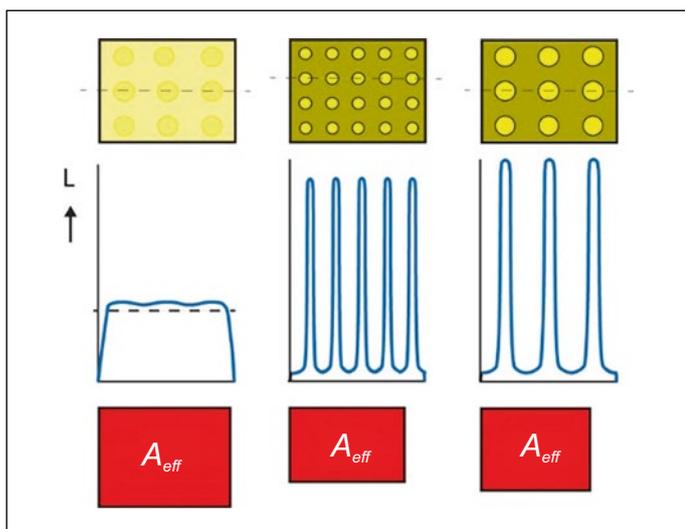


Рис. 7. Примеры эффективной площади излучающей свет области светильника с неравномерной яркостью A_{eff} , введённой МКО в 2019 г. [34] для использования в стандартной формуле для расчёта дискомфорта блёскости (UGR)

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

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

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

1.5. Невизуальное биологическое воздействие света

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

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

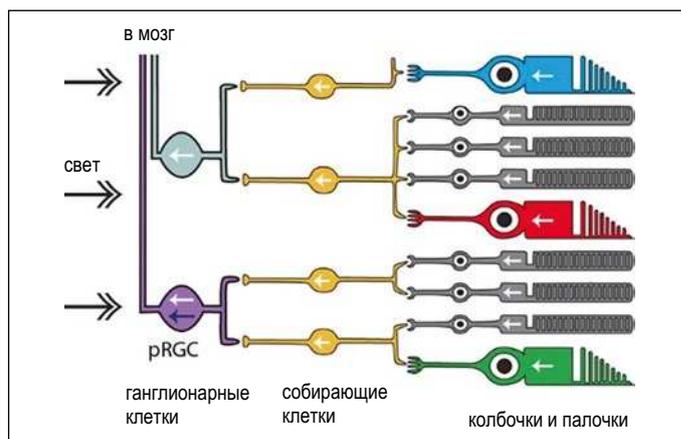


Рис. 8. Часть сетчатки с фоточувствительными клетками, включая фоточувствительные ганглионарные клетки сетчатки $pRGC$ (обозначены пурпурным цветом). Белыми стрелками обозначены сигналы, поступающие в мозг в результате преобразования света, падающего на колбочки и палочки, а синей стрелкой обозначен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

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

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

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

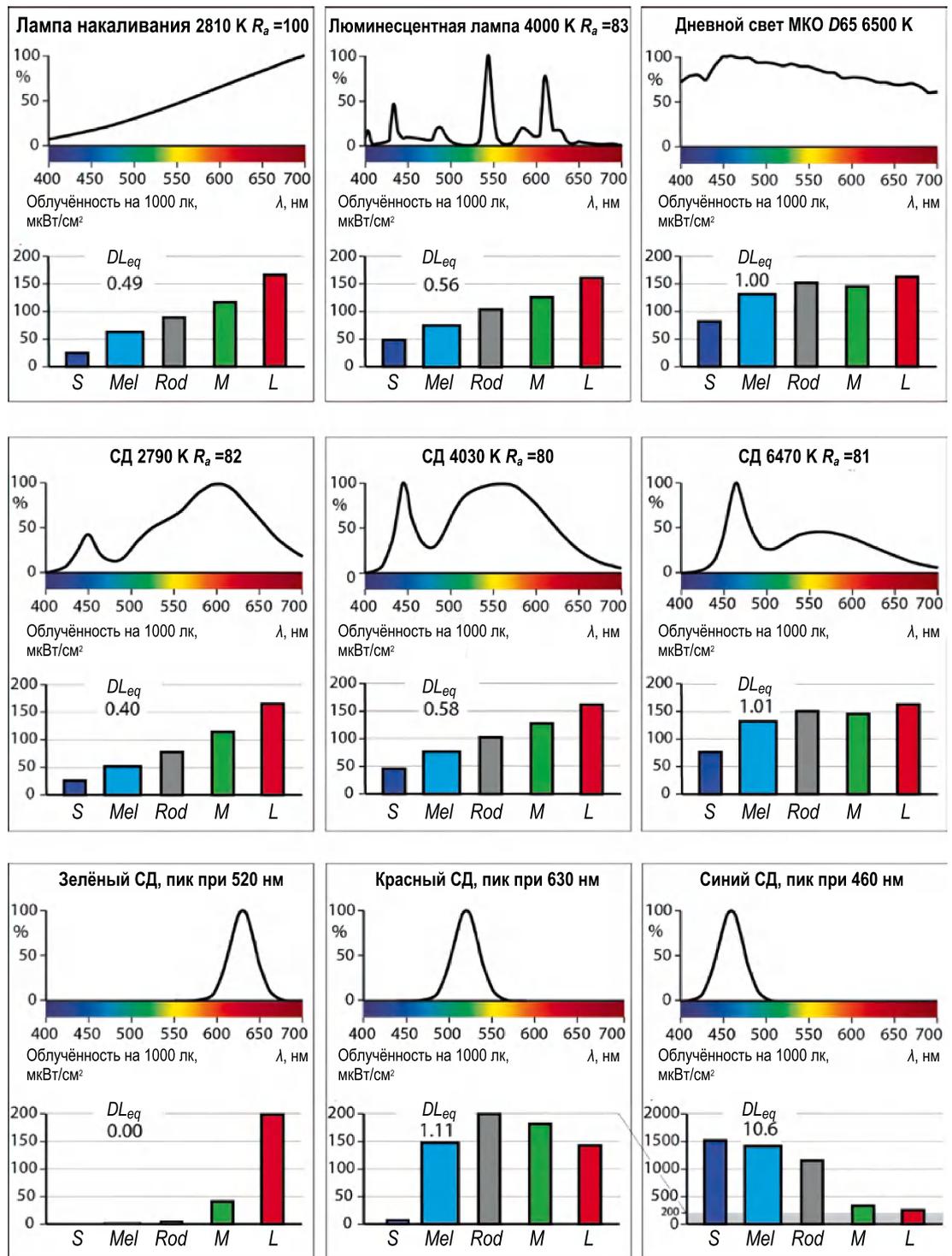


Рис. 9. α -опические облучённости, создаваемые лампами разных типов при равной 1000 лк освещённости на внешней поверхности глаза (*S* – цианопическая облучённость, *Mel* – меланопическая облучённость, *Rod* – родопическая облучённость, *M* – хлоропическая облучённость, *L* – эритропическая облучённость,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

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

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

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

Три причины несогласованности циркадных ритмов сменных работников

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

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

1.6. Свет, сон, бодрость и работоспособность

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

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

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

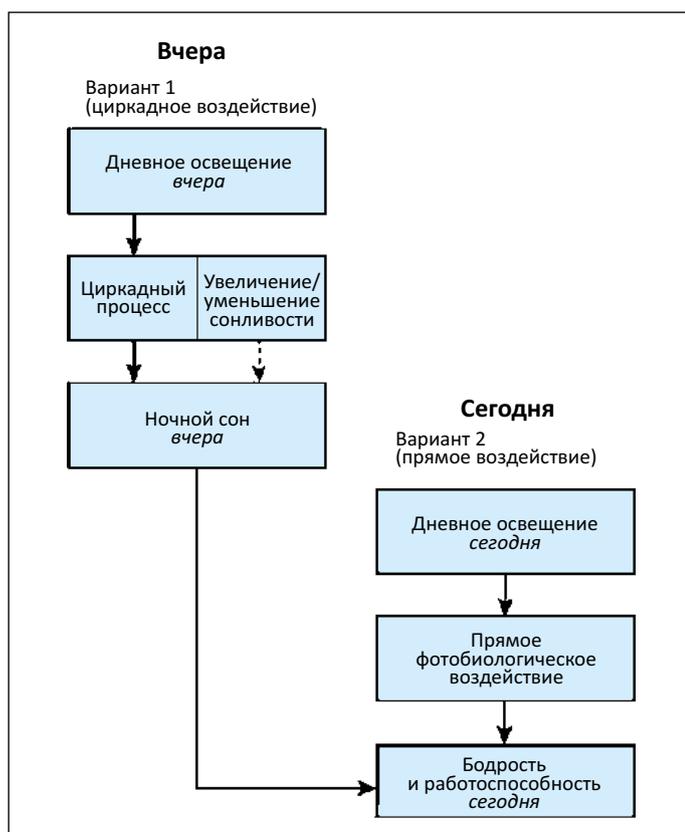


Рис. 10. Два варианта влияния дневного освещения на бодрость и работоспособность в дневное время

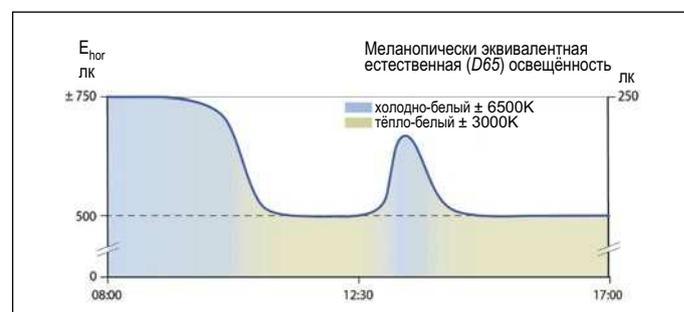


Рис. 11. Сценарий ориентированного на человека освещения офисов, в основу которого положена равная 250 лк меланопически эквивалентная естественная ($D65$) освещённость (*melanopic equivalent daylight* ($D65$) *illuminance*), которая примерно соответствует равной 750 лк горизонтальной освещённости (для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

1.7. Сменная работа, освещение, сон и работоспособность

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

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

1.8. Возрастные изменения

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

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

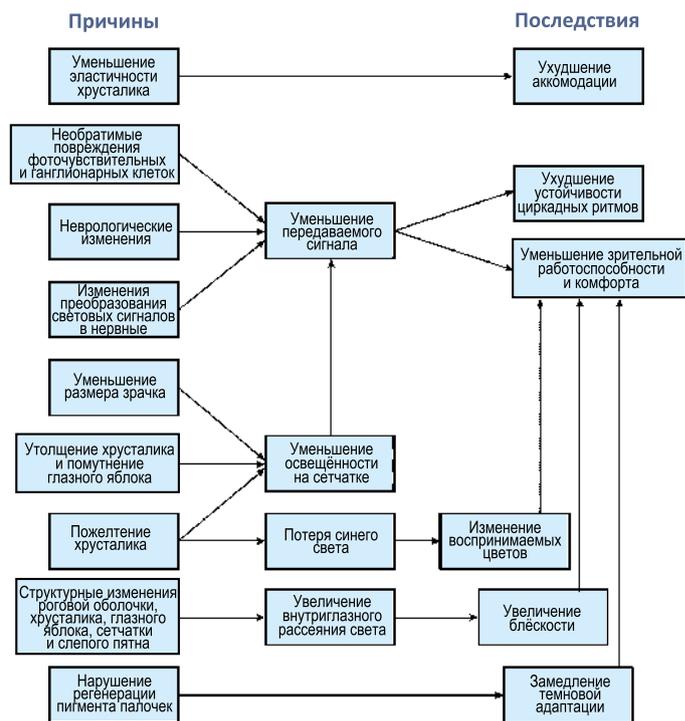


Рис. 12. Причины вредных возрастных изменений глаз и их последствия

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

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

1.9. Терапевтическое действие

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

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

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

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

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

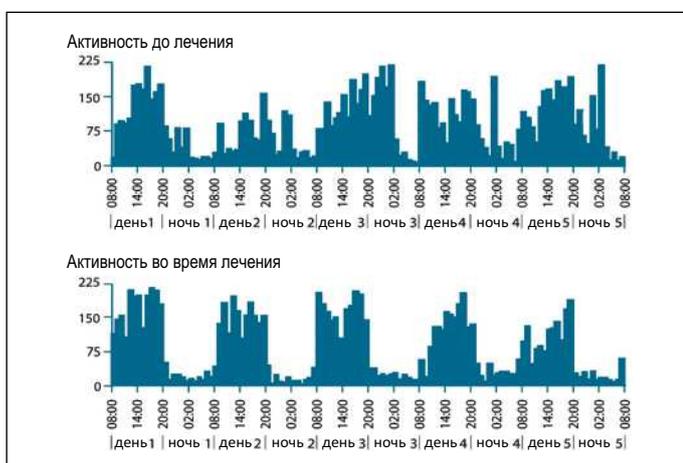


Рис. 13. Количество проявлений активности пациента с болезнью Альцгеймера в час на протяжении пяти последовательных дней до начала (вверху) и по истечении (внизу) 2-х недель ежедневного лечения светом при равной 1140 лк освещённости глаза [51]

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

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

1.10. Опасное воздействие

1.10.1. Пульсации света ламп

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

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

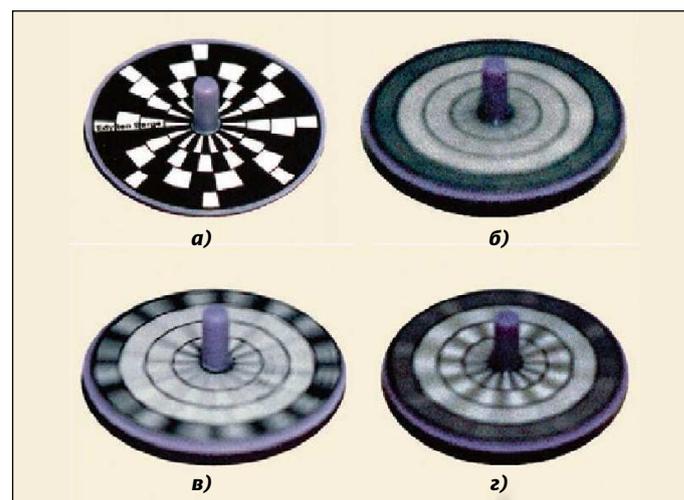


Рис. 14. Волчок, используемый для проверки пульсации света (а); размытые при всех скоростях вращения кольца, что говорит об отсутствии пульсаций (б); неподвижные при некоторых скоростях вращения бело-серые прямоугольники, что говорит о наличии пульсаций (в, г) (дизайн верхней поверхности – *Edy ten Berge*)

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

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

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

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

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

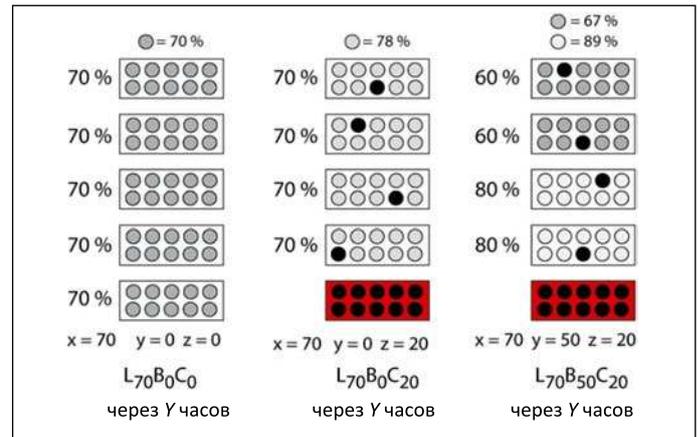


Рис. 15. Примеры соответствующих разным $LxByCz$ состояний СД модуля

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

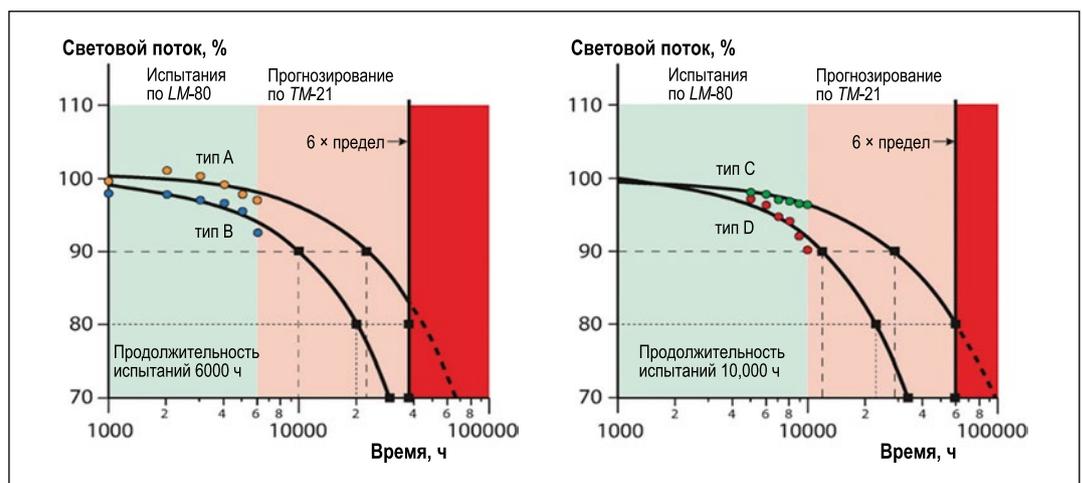
1.10.2. Опасность синего света

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

1.10.3. Яркий свет ночью

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

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



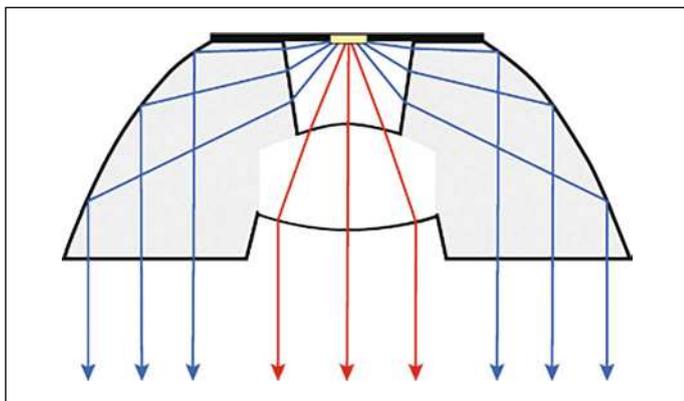


Рис. 17. Вверху: графики КЕО для офиса размером 5,4 x 3,6 м для окна, отмеченного красным цветом на приведённом в [1] рис. 12.7. Внизу: соответствующие проценты времени, в течение которого в июне и декабре горизонтальная освещённость превышает 500 лк (получено на основе результатов измерений естественного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

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

2. Техника

2.1. Лампы, пускорегулирующие аппараты и устройства управления

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2. Естественный свет

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

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

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

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

2.3. Светильники

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

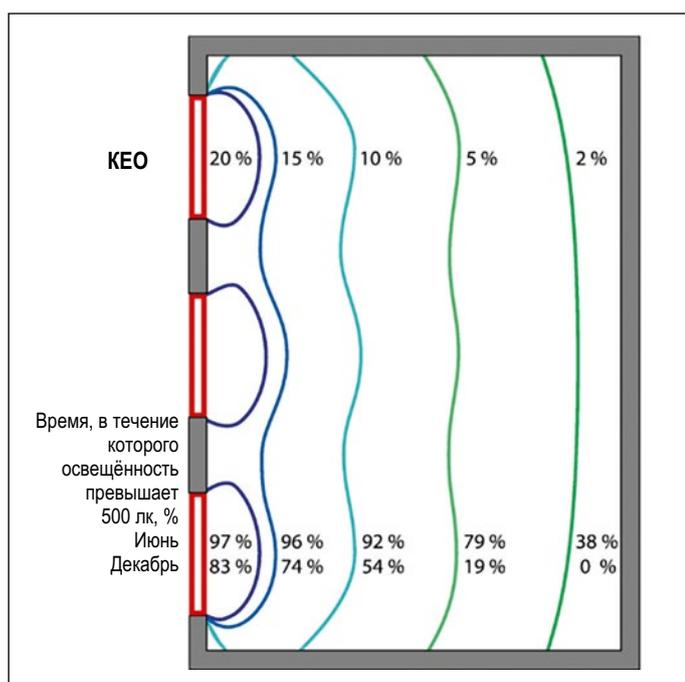


Рис. 18. Отражение и полное внутреннее отражение (при $\theta > \theta_{crit}$)

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

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

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

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

2.4. Объединённое интеллектуальное (умное) освещение

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

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

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

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

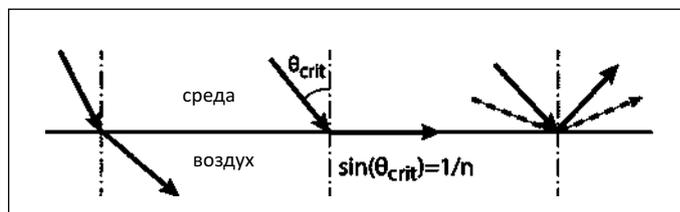


Рис. 19. Примеры предназначенных для СД круглосимметричных линз с полным внутренним отражением. Синие лучи – результат полного внутреннего отражения, красные лучи – результат действия встроенной коллиматорной линзы (обозначенной более светлым тоном)

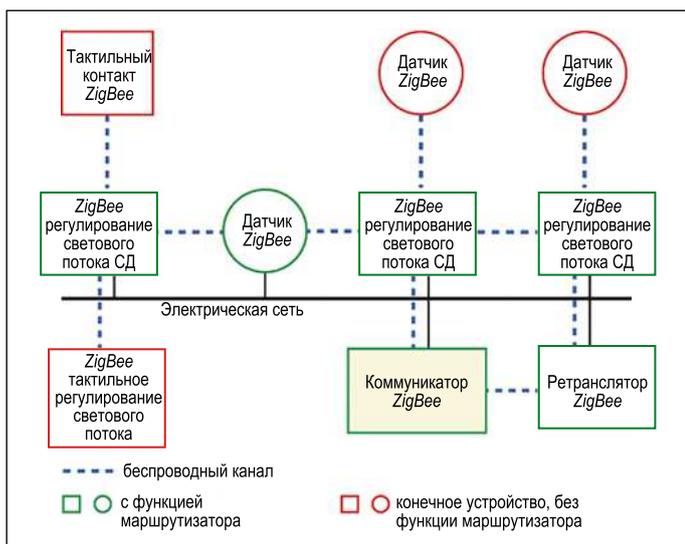


Рис. 20. Беспроводная сеть ZigBee с координатором, устройствами с функцией маршрутизатора в отношении соседних с ними устройств, встроенных в «умные» лампы и датчики, а также оконечные устройства без функции маршрутизатора

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

2.5. Свет не для освещения

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

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

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

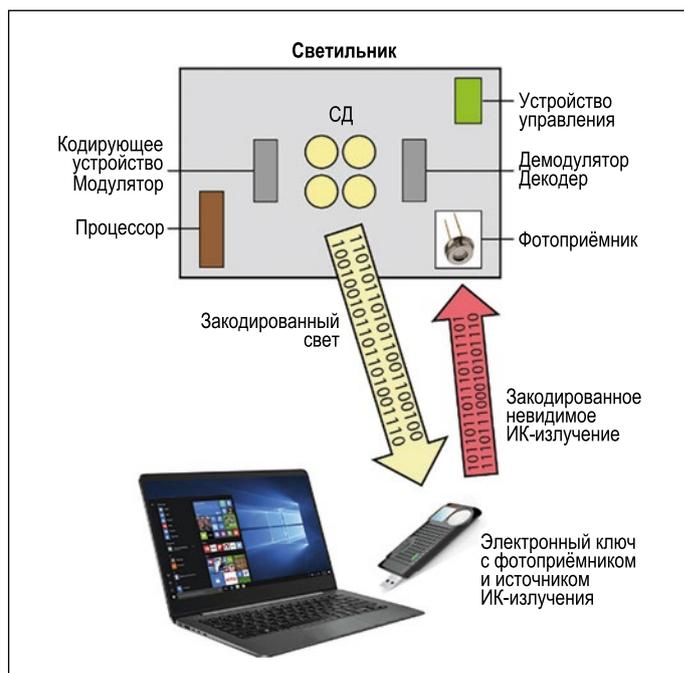


Рис. 21. Двунаправленная сеть передачи данных Li-Fi с использованием видимый свет прямым каналом и использующим инфракрасное излучение обратным каналом

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

3. Применение

3.1. Качество освещения и стандарты

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

Таблица 5

Пять этапов процесса проектирования освещения

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

в будущем при разработке рекомендаций в части невидимого биологического воздействия света.

3.2. Проектирование

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

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

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

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

3.3. Расчёты и измерения

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

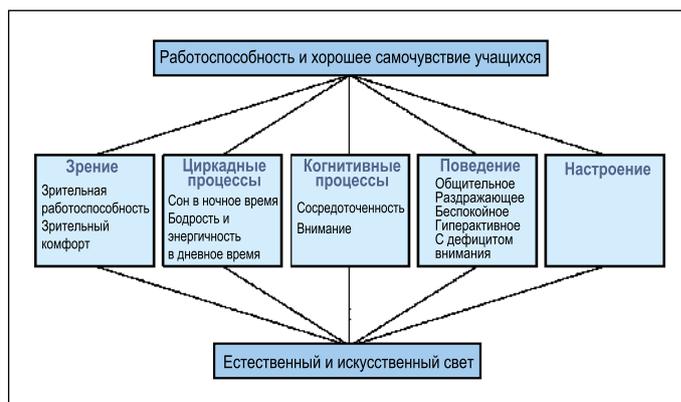


Рис. 22. Влияние освещения на работоспособность и хорошее самочувствие школьников и студентов [68]

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

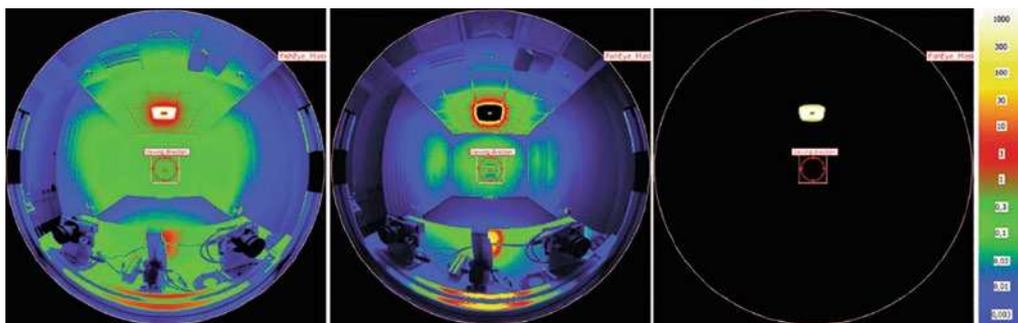
Измерения, осуществляемые применительно к внутреннему освещению, делятся на три категории, связанные в определении характеристик ламп, характеристик светильников и характеристик осветительной установки. Измерения, относящиеся к двум первым категориям, проводятся главным образом в лабораториях. Они связаны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

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

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

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

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



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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Bommel, W.J.M. Interior Lighting, fundamentals, technology and application // Switzerland: Springer Nature, 2019.
2. Donners, M.A.H., Vissenberg, M.C.J.M., Geerdinck, L.M., Van Den Broek-Cools, J.H.F., Buddemeijer-Lock, A. A psychophysical model of discomfort glare in both outdoor and indoor applications // Proc. 27th CIE Session, Manchester, 2015. – P. 1602–1611.
3. Sajdar, M., Luo, M.R., Mughal, M.F., Kuai, S., Yang, Y., Fu, L., Zhu, X. A neural response-based model to predict discomfort glare from luminance image // Lighting Res. Technol. – 2018. – Vol. 50. – P. 416–428.
4. Scheir, G.H., Hanselaer, P., Ryckaert, W.R. Pupillary light reflex, receptive field mechanism and correction for retinal position for the assessment of visual discomfort // Lighting Res. Technol. – 2019. – Vol. 51, No. 2. – P. 291–303.
5. Scheir, G.H., Donners, M., Geerdinck, L.M., Vissenberg, M.C.J.M., Hanselaer, P., Ryckaert, W.R. A psychophysical model for visual discomfort based on receptive fields // Lighting Res. Technol. – 2018. – Vol. 50. – P. 205–217.
6. IES TM-30-18: IES method for evaluating light source color rendition // IES, New York, 2018.
7. Smet, K., Ryckaert, W.R., Pointer, M.R., Deconinck, G., Hanselaer, P. Correlation between colour quality metric predictions and visual appreciation of light sources // Opt. Exp. – 2011. – Vol. 19. – P. 8151–8166.
8. Houser, K.W., Wei, M., David, A., Kramer, M.R., Shen, X.S. Review of measures for light-source colour rendition and considerations for a two-measure system for characterizing colour rendition // Opt. Exp. – 2013. – Vol. 2. – P. 10393–10411.
9. Gu, H.T., Luo, M.R., Liu, X.Y. (2017) Testing different colour rendering metrics using colour difference data // Lighting Res. Technol. – 2017. – Vol. 49. – P. 539–560.
10. Teunissen, C., van der Heijden, F.H.F.W., Poort, S.H.M., de Beer, E. (2017). Characterising user preference for white LED light sources with CIE colour rendering index combined with a relative gamut area index // Lighting Res. Technol. – 2017. – Vol. 49. – P. 461–480.
11. CIE224:2017. CIE2017 Colour fidelity index for accurate scientific use // Vienna, 2017.
12. Weston, H.C. The relation between illumination and visual performance // Reprint IHRB Rep. No. 87 (1945) and Joint Rep. (1935). Medical Research Council, HMSO, London, 1953.
13. Weston, H.C. Rationally recommended illuminance levels // Trans. Illum. Eng. Soc. (Lond). – 1961. – Vol. 26, No. 1. – P. 1–16.
14. Muck, E., Bodmann, H.W. Die Bedeutung des Beleuchtungsniveaus bei praktische Sehtätigkeit // Lichttechnik. – 1961. – Vol. 13. – P. 502–507.
15. Rea, M.S. Visual performance with realistic methods of changing contrast // J. Illum. Eng. Soc. – 1981. – Vol. 10, No. 3. – P. 164–177.
16. Rea, M.S. Toward a model of visual performance: foundations and data // J. Illum. Eng. Soc. – 1986. – Vol. 15. – P. 41–57.
17. Eklund, N.H., Boyce, P.R., Simpson, S.N. (2001) Lighting and sustained performance: modelling data-entry task performance // J. Illum. Eng. Soc. – 2001. – Vol. 30. – P. 126–141.
18. CIE145:2002. The correlation of models for vision and visual performance. CIE, Vienna, 2002.
19. Houser, K.W. To use or not to use TM-24 // Leukos. – 2014. – Vol. 10, No. 2. – P. 57–58.
20. Loe, D.L., Mansfield, K.P., Rowlands, E. Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: experimental study // Lighting Res. Technol. – 1994. – Vol. 26, No. 3. – P. 119–133.
21. Kirsch, R.M. Lighting quality and energy efficiency in office spaces // Doctoral thesis, Department of Lighting Technology, Technical University, Berlin, 2014.
22. Oi, N., Mansfield, K.P. Lighting quality: possibility of luminance distribution as its determinant // Proc. CIE28th Session, Manchester, 2015. – P. 1111–1120.
23. Loe, D.L. Light, vision and illumination: the interaction revisited // Light Res. Technol. – 2016. – Vol. 48. – P. 176–189.
24. Cuttle, C. Lighting by design, 2nd edition. Oxford: Architectural Press, 2008.
25. Cuttle, C. Towards the third stage of the lighting profession // Lighting Res. Technol. – 2010. – Vol. 42. – P. 73–93.
26. Cuttle, C. A fresh approach to interior lighting design: the design objective-direct flux procedure // Lighting Res. Technol. – 2018. – Vol. 50. – P. 1142–1163.
27. Mury, A.A., Pont, S.C., Koenderink, J.J. Representing the light field in finite three-dimensional spaces from sparse discrete samples // Applied Opt. – 2009. – Vol. 48. – P. 450–457.
28. Huang, A., Sanderson, A. Light field modelling and interpolation using Kriging techniques // Lighting Res. Technol. – 2014. – Vol. 46. – P. 219–237.
29. Pont, S.C. Spatial and form-giving qualities of light // In: Albertazzi L. (ed) Handbook of experimental phenomenology: visual perception of shape, space and appearance. Chichester: Wiley, 2013.

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



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

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