

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 628.92/.97

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АРХИТЕКТУРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ С УЧЕТОМ ЕГО БИОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ

канд. техн. наук **Е.Н. САВКОВА**

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрены основные тенденции развития архитектурного освещения, связанные с открытием новой фоторецепторной системы человеческого глаза, наиболее чувствительной в коротковолновой области видимого спектра, ранее не учитываемой при стандартизации и нормировании световой среды. Данные тенденции обусловлены влиянием спектрального состава оптического излучения на нейроповеденческие функции человеческого организма, регулируемые сменой света и темноты и называемые циркадными ритмами. Знание закономерностей таких влияний позволяет оптимизировать проекты строящихся зданий и архитектурного освещения с учетом его биологических аспектов путем оценки циркадной эффективности, индикатрис применяемых источников света, а также комбинирования естественного и искусственного освещения. Предложено использовать динамические осветительные системы, изменяющие в течение суток яркость, освещенность, направление и цвет оптического излучения, которые будут благотворно влиять на работоспособность и общее физическое состояние людей. На основе анализа ряда опубликованных работ и нормативных документов выделены основные направления нормирования архитектурного освещения для формирования здоровой световой среды.

Введение. Архитектурное освещение традиционно преследует четыре цели: 1) создание наилучших условий для зрительной работы; 2) обеспечение зрительного комфорта; 3) обеспечение эстетичности освещаемого пространства; 4) экономию электроэнергии [1]. Поэтому проектировщики зданий и их осветительных систем должны решать комплексную задачу, заключающуюся в оптимизации организации жизненного или рабочего пространства с учетом аспектов энергосбережения.

Последнее десятилетие ознаменовалось рядом научных открытий в области влияния спектрального состава оптического излучения на зрительные, биологические и эмоциональные механизмы деятельности человека, что отражено в опубликованных работах отечественных и зарубежных ученых. Данные открытия взволновали светотехническое сообщество открывающейся возможностью применить новые знания для создания более здоровой световой среды [2]. Результаты проводимых научных исследований, уже нашедшие практическое применение, например, в светотерапии, являются еще недостаточными для изменения нормативной базы, однако следует выделить ряд тенденций в светотехнике, фотобиологии и других междисциплинарных областях, которые возможно в будущем изменят номенклатуру фотометрических понятий и позволят достигать целей с существенно меньшими затратами, повышая при этом безопасность и работоспособность людей.

Свет условно определяют как электромагнитное излучение в диапазоне длин волн 380 – 780 нм, вызывающее ощущение яркости, то есть стимулирующее зрительный аппарат человека. До недавнего времени полагали, что в зрительном анализаторе существует два вида фотоприемников, участвующих в преобразованиях светового излучения: палочки и колбочки, для которых была определена кривая видности с максимумом 555 нм для дневного зрения. Открытие нового фотопигмента позвоночных в 1998 году инициировало ряд исследований, которые со временем привели к установлению прежде неизвестного класса фоторецепторов в сетчатке позвоночных, включая человека, – меланопсина, влияющего на незрительные механизмы восприятия света, с максимальной чувствительностью в диапазоне 446 – 477 нм (голубая область видимого спектра) [3 – 5]. В настоящее время известны работы, в которых исследуются возможности голубого света эффективно воздействовать на фазовый сдвиг циркадных ритмов и усиливать состояние наивысшей бодрости у здоровых индивидуумов [1], что, несомненно, скажется в будущем на дальнейшем развитии архитектурного освещения.

Влияние света на нейроповеденческие функции организма человека. Новая фоторецепторная система представляет собой «недостающее звено» в описании механизма биологических воздействий света, управляемого циклической сменой света и темноты (циркадных ритмов) [6], и в основном участвует в нейроэндокринных и нейроповеденческих реакциях человека на свет. Меланопсинсодержащие

клетки сетчатки не пригодны для создания изображения, так как имеют обширную ветвистую структуру и сравнительно большой радиус, но являются оптимальными для пространственного широкого захвата света из окружающей среды [7], что объясняет многие процессы, называемые незрительными реакциями, протекающими в организме.

В темное время суток шишковидная железа производит гормон мелатонин, который управляет усталостью человека и его потребностью во сне. Когда подается сигнал о наличии яркости и света к шишковидной железе через оптический нерв, железа подавляет производство мелатонина; когда мало света или его вообще нет, то полное производство гормона возобновляется, и в результате человек получает здоровый, восстанавливающий силы сон [7]. Таким образом, свет имеет решающее влияние на вегетативную систему [8], и третий вид фоторецепторов, наиболее чувствительных к коротковолновым световым излучениям, обуславливает различную активность человека в разные периоды светового дня.

С изобретением искусственного освещения произошло нарушение естественного ритма дня и ночи в ряде случаев: при наружном подсвечивании зданий, работе в третью смену, дорожном движении в темное время суток, ночных межконтинентальных перелетах, и т.д., что несомненно может влиять на нейроповеденческие реакции человека. Например, установлена взаимосвязь между ночным архитектурным освещением (что характерно для развитых стран), работой в третью смену и повышением числа заболеваний раком молочной железы. Таким образом, знание закономерностей нейроанатомии зрительных и незрительных каналов восприятия света является чрезвычайно важным при проектировании зданий и их осветительных систем.

Кроме того, доказано, что меланопсинсодержащие рецепторы имеют максимальную чувствительность и большую концентрацию в нижней части сетчатки. Поэтому особой биологической ценностью обладает свет, поступающий сверху (как это и имеет место при пребывании под открытым небом). Для искусственного освещения исходно предпочтительными являются условия, создаваемые установками общего освещения (в особенности в помещениях без естественного света или с недостаточным естественным освещением) [7].

Современные технологии позволяют оптимизировать источники света с учетом его воздействия на нейроповеденческие функции организма. В [9] приведен обзор источников света с точки зрения их циркадной эффективности, оцениваемой с помощью коэффициента a_{cv} , представляющего собой отношение интегралов циркадных и фотометрических характеристик:

$$\alpha_{cv} = \frac{\int X_{ec} c(\lambda) d\lambda}{\int X_v(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $v(\lambda)$ – спектральная световая эффективность; $c(\lambda)$ – функция относительной спектральной циркадной эффективности.

Коэффициент α_{cv} позволяет проводить сравнение между светом разных цветов. Соотношение между циркадными X_{ec} и фотометрическими величинами X_v можно выразить следующим образом [4]:

$$X_{ec} = \frac{\alpha_{cv}}{K_m} X_v, \quad (2)$$

где K_m – максимальная спектральная световая эффективность.

Создание динамических осветительных систем – путь к оптимизации архитектурного освещения. В настоящее время на основе передовых технологий возможно производство источников света с разными коэффициентами циркадной эффективности, а поэтому возможны и системы, позволяющие изменять значение a_{cv} определенным образом [9]. В работе [4] экспериментально установлено, что максимальные значения $a_{cv} = 6,9$ имеют монохроматические светодиоды с $\lambda_{max} = 468$ нм; для белых светодиодов $\alpha_{cv} = 1,05 \dots 2$; люминесцентные лампы обеспечивают $\alpha_{cv} = 1,0$ при $T_u = 6400$ К (*LUMILUX SKYWHITE 880*); голубое небо – $\alpha_{cv} = 1,49$ при $T_u = 19963$ К; лампа накаливания – $\alpha_{cv} = 0,35$ при $T_u = 2800$ К.

«Хороший проект должен предусматривать центральную сцену освещения, освещение дисплейных экранов, холлов, зон досуга и отдыха, а также освещение рабочих мест, значимое для активизации и стимулирования рабочего персонала. Такая осветительная система может включать четыре компонента:

- 1) рассеянную компоненту от подвесного светильника с люминесцентной лампой, создающего световой поток, контролируруемую датчиком дневного света;
- 2) направленную компоненту от подвесного светильника, непосредственно управляемую пользователем в качестве рабочего освещения;

- 3) освещение на стене в виде световых полос, создаваемых галогенными лампами теплого белого цвета, управляемое автоматическим таймером;
- 4) дневной свет, изменяемый с помощью жалюзи» [5].

Прямые и рассеянные компоненты могут быть отделены друг от друга. В качестве примера авторами [5] был выбран белый цвет освещения. Различные цвета рассеянной и прямой компонент (теплый белый и дневной белый свет) воздействуют на человека, и в настоящее время эта особенность исследуется. Программы освещения реализуются в сценарий, который создается на этапе планирования системы освещения и описывает, как последовательная смена рассеянного освещения взаимодействует с дневным светом. Крюгер сформулировал важное физиологическое и познавательное правило для системы освещения: «не чувствовать освещение как что-то статичное, как установку, помещенную в комнате или рядом, а как нечто однородное, насколько это возможно, и понимать освещение как динамическую особенность визуального климата интерьера» [7], а именно:

- изменение уровня яркости или освещенности;
- изменение цвета освещения;
- изменение распределения света или распределения яркости, тенеобразования, направления освещения.

Изменение световой окружающей среды в течение суток благоприятно сказывается на работоспособности, что подтверждается соответствующими исследованиями [7]. Кроме того, установлено влияние освещения на эмоции человека. При увеличении освещенности возбуждение повышается при более высоком значении рассеянной световой компоненты. Вместе с тем энергопотребление динамических осветительных систем не выше, чем стандартных (статических).

Перспективы нормирования архитектурного освещения. В Республике Беларусь проектирование освещения помещений вновь строящихся и реконструируемых зданий и сооружений различного назначения, мест производства работ вне зданий, площадок промышленных и сельскохозяйственных предприятий, устройств местного освещения осуществляется в соответствии с СНБ 2.04.05-98 [10]. Данный документ регламентирует требования к коэффициенту естественного освещения, освещенности, допустимым сочетаниям показателей ослепленности и коэффициента пульсации освещенности, показателю дискомфорта и минимальному индексу цветопередачи источников света и диапазону их цветовой температуры. Однако цветовые характеристики освещения регламентированы с точки зрения комфортного восприятия и цветоразличения зрительным анализатором в процессе производства соответствующей продукции.

Тем не менее нормы освещения периодически пересматриваются с учетом экономических, энергетических и технических возможностей общества в сторону оптимизации световой среды. Существуют международные нормативные документы, определяющие безопасные уровни экспозиций как широкополосного, так и узкополосного световых излучений [11 – 15]. В плане нормирования положение о зависимости биологического действия света от его спектральной характеристики совпадает с регламентируемыми требованиями достаточного естественного освещения в помещениях с длительным пребыванием людей, особенно для детей или больных людей, а также с рекомендациями норм по использованию ламп с высокой цветовой температурой (до 6000 К), то есть с достаточно «холодным» спектром излучения в помещениях для активной деятельности человека, а ламп с более низкой цветовой температурой (2700 – 3500 К) – в помещениях для отдыха. При планировании новых экспериментов и приложений с использованием насыщенного голубого света благоразумно учитывать меры безопасности для глаз.

По мнению многих специалистов в области светотехники, в дальнейшем для оптимизации систем архитектурного освещения необходимо включать не только фотометрические, но также и циркадометрические параметры. Поэтому станет существенным измерение коэффициента циркадной эффективности ламп и светильников.

В работе [9] исходя из определения функции относительной спектральной циркадной эффективности или функции циркадной эффективности $c(\lambda)$ построена циркадная метрия – циркадометрия (величины и единицы) и разработаны методы измерений для оценки светотехнических систем.

Исследования коэффициентов циркадной эффективности, описанные К. Биске [9], проводились в реальной рабочей обстановке в офисах и промышленных помещениях. Измерения выполнялись в рабочих зонах в соответствии с типичным лучом обзора, горизонтальным или вертикальным. Полученные результаты измерений α_{cv} находились в пределах между 0,35 и 0,45. Минимальная освещенность в исследуемой зоне составляла 320 лк, максимальная – 1640 лк [9]. Установлено, что помимо значений α_{cv} и освещенности в рабочей зоне для циркадного воздействия необходимо учитывать отражательную способность среды. Исследования показывают, что уровни облученности, оказывающие циркадное воздействие, составляют от 0,06 до 0,24 Вт/м² [9].

Учитывая изменения внимательности и работоспособности в течение дня, хронобиологи рекомендуют использовать искусственные источники света с низкой блескостью и большой площадью выходного отверстия [5], препятствующие появлению зрительного дискомфорта, связанного с высокой яркостью. Кроме того, условия освещения в производственных и жилых помещениях можно изменять в течение дня, чтобы создавать разнообразие и стимуляцию к активности, а также улучшать восприятие окружающей среды. Система освещения, которая создает эффект биологического возбуждения, может действовать как форма профилактической медицины, чтобы сохранить здоровье людей, работающих в офисах [8].

Сооружения для обслуживания пожилых людей должны проектироваться таким образом, чтобы они включали освещенные (залитые) солнцем пространства. В работе [16] представлены возможности увеличения доступа к дневному свету и комфортности наружной среды, а также архитектурные изменения и изменения электрического освещения, которые могли бы улучшать световую экспозицию в помещениях. Они содержат предложения по сокращению световой экспозиции для индивидуумов ночью без ухудшения уровней безопасности или комфорта. Должны обеспечиваться, по крайней мере, 1000 лк вертикальной освещенности на зрачке глаза, обеспечивающих комфорт в этих помещениях и их привлекательность для проживающих, способных деятельно использовать эти помещения по несколько часов в день [17]. Стекло световых фонарей и окон должно быть таким, чтобы гарантировать нужное спектральное пропускание.

В жилых помещениях (в домашних условиях) необходимо создавать одно или более ярких мест в интерьере с помощью электрического освещения синеватого цвета при уровнях, кажущихся чрезмерными для более молодых людей [16, 17]. В качестве средства добавления к дневной световой экспозиции могут быть эффективны персональные защитные козырьки с синими светодиодами. В ночное время в коридорах, спальнях и ваннах следует создать такие условия, чтобы ночью там автоматически поддерживалось слабое освещение при возможно меньшем числе ярко освещенных поверхностей (менее 100 лк вертикальной освещенности на сетчатке глаза) [18].

При освещении в темное время суток должны поддерживаться уровни яркости порядка 1 кд/м², что предполагает использование высокоэффективных разрядных ламп [13]. Для этого предпочтительнее использовать натриевые и лампы высокого давления (НЛВД), дающие желтоватый свет, и металлогалогенные лампы (МГЛ), свет которых кажется белым. МГЛ обладают лучшей цветопередачей и меньшей световой отдачей, чем НЛВД. По данным фирмы Osram-Sylvania типичное отношение световых потоков этих ламп равно 1,416, чему соответствуют световые потоки 400-ваттных НЛВД и МГЛ (производимые этой фирмой), равные 50 и 35,3 клм соответственно [18].

Яркость дорожного покрытия зависит от отражающих свойств поверхности. Существовало ошибочное мнение, что последняя отражает неселективно. Фактически асфальтовые и бетонные покрытия отражают в длинноволновой части видимого спектра (красно-желтой) и коротковолновой (голубовато-зелено-синей) [18]. При этом НЛВД в длинноволновой части излучают больше, чем МГЛ, и при одинаковых световых потоках обеспечивают на 22 – 24 % большую яркость указанных покрытий. Проводимые эксперименты показали, что излучение НЛВД на 22 – 24 % лучше отражается от поверхности дорожного покрытия (асфальта), чем излучение МГЛ. Это усиливает эффект относительно большего, на 25,4 % интегрального пропускания хрусталика для излучения НЛВД, что свидетельствует о преимуществе использования НЛВД перед МГЛ в уличном освещении (световая отдача в 1,416 раза больше) [18].

Заключение. Существующие подходы к освещению разработаны при неполном понимании световоспринимающих возможностей сетчатки. Открытие третьего вида фоторецепторов – меланопсинсодержащих клеток сетчатки, предоставляет новые возможности развития систем архитектурного освещения с учетом его влияния на нейроповеденческие реакции человеческого организма. Развитие светотехники в настоящее время определяется текущим знанием механизма дневного зрения. Необходимо осуществлять корректировку норм ночного освещения, поскольку уже установлено наличие взаимосвязи между воздействием света, регуляцией мелатонина, нарушениями в циркадной системе и развитием опухолей [1].

Принимая во внимание эффекты подавления мелатонина, фазового сдвига циркадных ритмов и «всплеска» бодрости, можно заключить, что необходимо совершенствование существующих осветительных систем, одним из путей которого является создание динамического освещения. Такие системы будут изменять свои параметры в течение суток: направление и интенсивность светового потока, спектральный состав и коэффициент циркадной эффективности, что позволит повышать общебиологическое воздействие искусственного освещения на организм человека.

Разработка динамических систем потребует международного сотрудничества ученых, работающих над проблемами, связанными с циркадной системой и зрением, координирующей деятельности Международной комиссии по освещению (МКО). Международные дискуссии, организуемые авторитетными светотехническими журналами, будут способствовать новым практическим решениям как в

нормировании освещения, так и в использовании наиболее совершенных источников света и приемов освещения не только для повышения зрительной работоспособности, но и для сохранения и укрепления здоровья людей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брейнард, Г.К., Провенсио, И. Восприятие света как стимула незрительных реакций человека / Г.К. Брейнард, И. Провенсио // Светотехника. – 2008. – № 1. – С. 6 – 12.
2. Шанда, Я. Свет как актиничное (фотохимически активное) излучение / Я. Шанда // Светотехника. – 2006. – № 3. – С. 51 – 53.
3. Provencio, I. Melanopsin: an opsin in melanophores, brain, and eye, Proc. Natl. Acad. Sci. / I. Provencio, G. Jiang, W.J. De Grip, W.P. Hayes & M.D. Rollag. – U.S.A., 1998 (95). – P. 340 – 345.
4. Provencio, I. A novel human opsin in the inner retina, J. Neurosci / I. Provencio, I.R. Rodriguez, G. Jiang, W.P. Hayes, E.F. Moreira & M.D. Rollag. – 2000 (20). – P. 600 – 605.
5. Дехофф, П. Воздействие изменяющегося света на здоровье людей во время работы / П. Дехофф // Светотехника. – 2006. – № 3. – С. 54 – 56.
6. CIE Processings «Light and Health – non-visual effects» CIE x027: 2004.
7. Скобарева, З.А. О биологических аспектах освещения / З.А. Скобарева // Светотехника. – 2006. – № 1. – С. 52 – 55.
8. Brainard, G.C. The effects of light on human physiology and behaviour / G.C. Brainard, C.A. Bernecker. – CIE Conference New Delhi, 1995.
9. Биске, К. Определение и измерение циркадометрических величин / К. Биске, К. Ванда / Светотехника. – 2006. – № 1. – С. 49 – 51.
10. Естественное и искусственное освещение. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь: СНБ 2.04.05-98. – Минск, 1998. – 58 с.
11. LAM RW. Beyond Seasonal Affective Disorder: Light Treatment for SAD and Non-SAD Disorders, American Psychiatric Press, Inc. – Washington DC, 1996.
12. International Commission on non-ionizing radiation protection. Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 microM), Health Phys 73, 1997. – P. 539 – 554.
13. Commission Internationale de L'eclairage. Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems, CIE Publication No. S 009/E:2002. – Austria, Vienna, 2002. – P. 1 – 38.
14. American national standards institute and illuminating engineering society of North America. Recommended Practice for Photobiological Safety for Lamps and Lamp Systems – General Requirements American National Standards Institute and Illuminating Engineering Society of North America, New York, 2005. – P. 1 – 28.
15. American conference of governmental industrial hygienists. Nonionizing radiation and fields, In Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, Ohio 2006. – P. 34 – 46.
16. Миллер, Н. Влияние освещения на самочувствие людей пожилого возраста / Н. Миллер // Светотехника. – 2007. – № 1. – С. 24 – 26.
17. Figueiro, M. Lighting for Alzheimer's Disease Patient Care / M. Figueiro. Proceedings of the 2nd Expert Symposium on Lighting and Health, 2006. Commission Internationale de l'Eclairage, Vienne, Austria.
18. Вернер, А. Возрастные изменения пропускания хрусталиком глаза излучений натриевых и металлогалогенных ламп высокого давления / А. Вернер // Светотехника. – 2007. – № 2. – С. 15 – 16.

Поступила 22.09.2008