

Е.Н. САВКОВА,

к. т. н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы» БНТУ

О.С. ЗАЯЦ,

студентка кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы» БНТУ

Е.И. ФЕДОРОВА,

студентка кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы» БНТУ

РЕКОМЕНДАЦИИ К РАСЧЕТАМ АДАПТИВНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При проектировании освещения необходимо обеспечивать выполнение двух основных требований — максимальный комфорт световой среды и экономию энергоресурсов. Оптимальным решением является разработка адаптивных осветительных систем, которые бы учитывали особенности организма человека, управляя естественной и искусственной компонентами в течение дня с максимальной энергоэффективностью. Современный уровень развития технических и программных средств позволяет проектировать и реализовывать такие системы.

При этом встраиваемые алгоритмы управления должны основываться на знаниях законов и принципов физической оптики, фотометрии, фотобиологических принципов зрительных и незрительных восприятий.

Однако, как показывает опыт сотрудничества с отечественными светотехническими компаниями, при выполнении заказов на разработку систем освещения в настоящее время учитываются лишь энергосберегающие и фотометрические аспекты. Между тем последние научные открытия в области фотобиологии и медицины,

касающиеся влияния света на незрительные (нейроповеденческие) функции организма человека — смену состояний бодрости и утомляемости в течение суток, подтверждаемые результатами межлабораторных сравнительных экспериментов, дают основание говорить не просто о комбинированном управлении освещением и светозащитой, а о разработке «светотехнических сценариев», уже практикуемых ведущими мировыми проектировщиками [1, 2].

РАЗВИТИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ

В документах, регламентирующих требования к освещению, — ТКП 45-2.04-153 [3], ГОСТ 12.1.046, ГОСТ 21.608, ГОСТ 7721, ГОСТ 8045, ГОСТ 8607, ГОСТ ИСО 8995 [4], ГОСТ 24940 [5], СТБ 306, СТБ 1779, СТБ 1782, СТБ 1944, СТБ ИЕС 60432, СТБ МЭК 60598, МУ РБ 11.11.12 и др. — нормируются показатели, учитывающие зрительное восприятие объектов при выполнении персоналом заданий в рабочих зонах, требований энергоэффективности и эргономики. Колориметрические аспекты представлены индексом цветопередачи и красного отношения, что не в полной мере отвечает современным тенденциям в области светотехники. В то же время Международная комиссия по освещению (МКО) опубликовала ряд документов, учитывающих «незрительные» влияния света:

- CIE Processings «Light and Health — non-visual effects» CIE x 027: 2004;
- Commission Internationale de L'éclairage. Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems, CIE Publication No. S 009/E:2002 Austria,

Vienna pp. 1–38, 2002;

- 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, pp. 539–554, 1997;
- Commission Internationale de L'éclairage. Testing of supplementary systems of photometry. CIE Central Bureau CIE 141, 2001.

В данных документах отражены фотометрические и колориметрические критерии первичных и вторичных излучателей, обеспечивающих наиболее комфортное восприятие цветоцветовой среды. В соответствии с новой концепцией освещение в рабочем помещении должно быть спроектировано таким образом, чтобы в течение рабочего дня находящиеся в нем люди не ощущали дискомфорта, связанного с повышенной или пониженной яркостью, блескостью и т. д. Для этой цели необходимо предусмотреть возможность регулирования яркостной и цветовой составляющих светильников — внедрением адаптивной осветительной системы.

СУЩНОСТЬ СВОТТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

На основе анализа ТНПА и НД, касающихся светотехнических расчетов, — ТКП 45-2.04-153, ГОСТ ИСО 8995, ГОСТ 24940, СанПиН 9-29.8 и др. — можно сделать вывод о том, что основными используемыми в них понятиями являются минимальная освещенность (E_{\min} , лк), средняя освещенность ($E_{\text{ср}}$, лк), цилиндрическая освещенность ($E_{\text{ц}}$, лк), коэффициент естественной освещенности КЕО (e , %), коэффициент запаса (K_z , отн. ед.). Расчетные формулы данных показателей приведены в таблице 1.

Минимальная освещенность — наименьшее значение освещенности в помещении, на освещаемом участке, в рабочей зоне.

Средняя освещенность — освещенность, усредненная по площади освещаемых помещений, участка, рабочей зоны.

Цилиндрическая освещенность — характеристика насыщен-

ности помещения светом, определяемая как средняя плотность светового потока на поверхности вертикально расположенного в помещении цилиндра, радиус и высота которого стремятся к нулю.

Коэффициент естественной освещенности КЕО — отношение естественной освещенности, создаваемой в некоторой точке заданной плоскости внутри помещения светом неба (непосредственным или после отражения), к одновременному значению наружной горизонтальной освещенности, создаваемой светом полностью открытого небосвода.

Коэффициент запаса — расчетный коэффициент, учитывающий снижение КЕО и освещенности в процессе эксплуатации вследствие загрязнения и старения светопрозрачных заполнений в световых проемах, источников света (ламп) и светильников, а также снижение отражающих свойств поверхностей помещения.

Таблица 1 — Расчетные формулы основных световых показателей

Показатель	Математическое выражение
Световой поток Φ , лм	$\Phi = K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda,$ <p>где $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$</p>
Сила света J , кд	$J = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \int_A L \cos \theta dA,$ <p>где L — яркость; $d\Phi$ — световой поток, распространяющийся внутри элементарного телесного угла $d\Omega$; dA — элементарный участок поверхности содержащий рассматриваемую точку; θ — угол между нормалью к dA и световым пучком</p>
Освещенность E , лк	$E = \frac{d\Phi}{dA}; E = \frac{J}{l^2},$ <p>где l — расстояние от центра источника излучения до поверхности</p>
Светимость M , лм/м ²	$M = \frac{d\Phi}{dA} = \int_{2\pi} L \cos \theta d\Omega$
Яркость L , кд/м ²	$L = \frac{d^2\Phi}{d^2G} = \frac{d^2\Phi}{dA \cos \theta d\Omega} = \frac{J}{A \cos \alpha},$ <p>d^2G — геометрический фактор светового пучка</p>
Коэффициенты отражения ρ , пропускания τ и поглощения α	$\rho = \frac{\Phi_{отр}}{\Phi_{пад}}; \tau = \frac{\Phi_{пр}}{\Phi_{пад}}; \alpha = \frac{\Phi_{погл}}{\Phi_{пад}}; \rho + \tau + \alpha = 1,$ <p>где $\Phi_{отр}$, $\Phi_{пр}$, $\Phi_{погл}$, $\Phi_{пад}$ — отраженный, проходящий, поглощенный, падающий световые потоки</p>
Коэффициент естественной освещенности КЕО	$КЕО = \frac{E_{вн}}{E_{нар}},$ <p>где $E_{вн}$ — естественной освещенности, создаваемой в некоторой точке заданной плоскости внутри помещения светом неба (непосредственным или после отражения); $E_{нар}$ — наружная горизонтальная освещенность, создаваемая светом полностью открытого небосвода</p>
Коэффициент запаса k	$k = \frac{E_э}{E}; k = \frac{\rho_э}{\rho},$ <p>где $E_э$, $\rho_э$ — значения показателей в процессе эксплуатации</p>

Фотометрические показатели нормируются по установленным шкалам в зависимости от вида и назначения помещения, характеристик зрительной работы. Тип светильника выбирается по световому распределению и наибольшему световому потоку.

Для описания световых свойств поверхностей используют понятия коэффициентов отражения, пропускания и поглощения. «Если на поверхность падает световой поток $\Phi_{пад}$, то поверхность разделит этот поток на три части: поток $\Phi_{отр}$, отраженный от поверхности и направленный в ту полусферу, из которой пришел падающий поток; поток $\Phi_{прош}$, прошедший через поверхность и вышедший в другую полусферу, и поглощенный $\Phi_{погл}$ поток, который превратился в веществе слоя поверхности в тепло или другую форму энергии. Из закона сохранения энергии следует, что:

$$\frac{\Phi_{отр}}{\Phi_{пад}} + \frac{\Phi_{прош}}{\Phi_{пад}} + \frac{\Phi_{погл}}{\Phi_{пад}} = \frac{\Phi_{пад}}{\Phi_{пад}} = 1. \quad (1)$$

Отношение светового потока, отраженного от поверхности, к свето-

вому потоку, падающему на нее, называется коэффициентом отражения ρ . Отношение светового потока, прошедшего через поверхность к световому потоку, падающему на нее, называется коэффициентом пропускания τ . Отношение светового потока, поглощенного поверхностью, к потоку, падающему на поверхность, называется коэффициентом поглощения α . Следовательно, $\rho + \tau + \alpha = 1$ [6].

Различные материалы в зависимости от их свойств, отражая, пропускающая и поглощая световые потоки, упавшие на их поверхности, перераспределяют эти потоки в пространстве. По способу перераспределения отражающие и прозрачные поверхности делятся на три основные группы: направленного отражения (пропускания), рассеянного отражения (пропускания) и направленного рассеянного отражения (пропускания). Направленное (зеркальное) отражение (рисунок 1 а) или пропускание (рисунок 1 б) имеют гладко отполированные поверхности, металлические поверхности, прозрачные материалы. При идеальном отражении угол падения α , светового луча равен углу α отражения (пропускания) его, а падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстано-

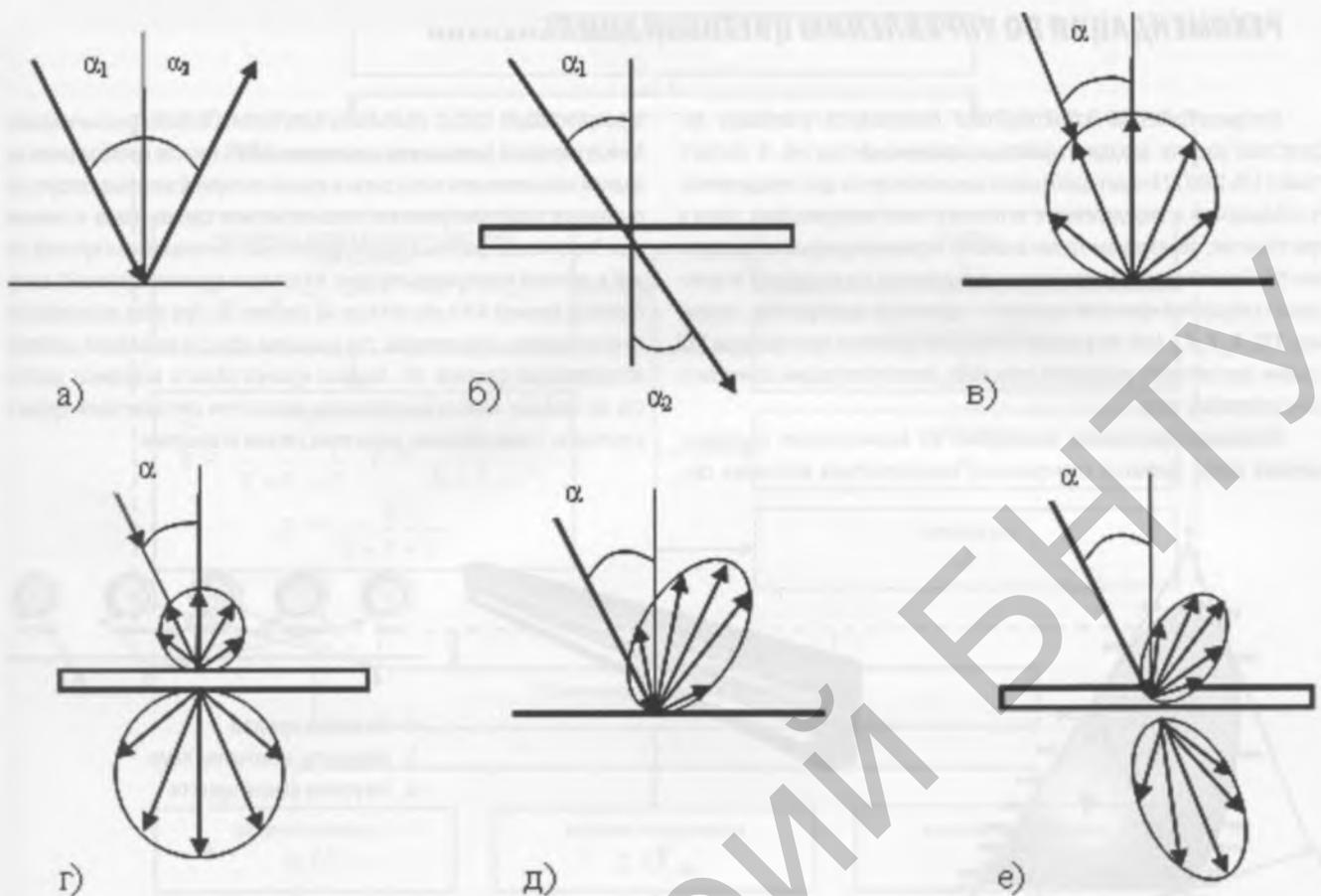


Рисунок 1 — Световые характеристики материалов

ленным к поверхности в точке падения луча. Поверхность обладает яркостью только в одном направлении — направлении отраженного луча [7]:

$$L_p = \rho * L, \quad (2)$$

где L — яркость источника света;

L_p — яркость изображения в направлении зеркального отражения.

Рассеянным (диффузным) отражением обладают материалы, на поверхности которых имеются неоднородности, соизмеримые с длиной волны рассеиваемого света. При рассеянном отражении (рисунок 1в) световой поток, падающий в малом телесном угле, перераспределяется, и телесный угол, в пределах которого равномерно распределяется этот световой поток, равен 2π . Яркость таких поверхностей одинакова для всех направлений и не зависит от направления падения светового луча, если угол падения $\alpha \leq 60^\circ$ [6]. Яркость диффузной поверхности можно определить как:

$$L_p = \frac{M}{\pi} = \frac{\rho E}{\pi}. \quad (3)$$

При рассеянном (диффузном) пропускании (рисунок 1г) рассеяние света происходит в толще материала и не зависит от того, в пределах какого телесного угла и под каким углом световой пучок падает на поверхность. Световой поток выходит из такого слоя равномерно распределенным в пределах телесного угла 2π . Яркость поверхности, из которой выходит световой поток, постоянна по всем направлениям пространства:

$$L_\tau = \frac{\tau E}{\pi}. \quad (4)$$

Фотометрическое тело (распределение силы света в пространстве), диффузно отражающей или пропускающей поверхности, представляет собой шар, распределение силы света которого подчиняется закону Ламберта:

$$I_\alpha = I_0 * \cos \alpha. \quad (5)$$

Яркость поверхностей, направленно отражающих свет, различна. При направленно рассеянном отражении (рисунок 1д) большую часть упавшего потока поверхность отражает в каком-то одном направлении, то есть ось отраженного пучка направлена в соответствии с законом зеркального отражения, однако телесный угол пучка увеличен за счет рассеяния отражающей поверхности в различных направлениях и имеет наибольшее значение L_α в направлении зеркального отражения.

При проектировании освещения необходимо в максимальной степени использовать естественную компоненту, нормируемую коэффициентом естественной освещенности КЕО, его расчетным e_p и средним e_{cp} значениями, коэффициентом запаса K_z . Так, среднее значение КЕО e_{cp} определяется по формуле [3]:

$$e_{cp} = \frac{1}{N-1} \cdot \left(\frac{e_1 + e_N}{2} + \sum_{i=2}^{N-1} e_i \right), \quad (6)$$

где e_1 и e_N — значения КЕО при верхнем или комбинированном освещении в первой и последней точках характерного разреза помещения;

e_i — значения КЕО в остальных точках характерного разреза помещения ($i = 2, 3, \dots, N-1$);

N — количество расчетных точек.

Для расчета естественной компоненты применяют инсоляционные графики и графики солнцестояния, учитывающие также плотность застройки. Показатель КЕО может быть улучшен путем транспортировки освещения световодными системами, применением управляемых средств направленного отражения и пропускания.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УПРАВЛЕНИЮ ЦВЕТОВОЙ КОМПОНЕНТОЙ

Колориметрические характеристики предлагается учитывать посредством расчета координат цвета из графика цветностей. В соответствии с СТБ ISO 7724 «цвет однозначно характеризуется для определенного наблюдателя и определенного источника света координатами точки в пространстве, образуемом тремя взаимно перпендикулярными векторами» [8]. Оценка цвета заключается в определении его координат в некоторой стандартной цветовой системе — цветовом пространстве, например, XYZ , $X_{10}Y_{10}Z_{10}$, Lab . На рисунке 2 показано цветовое пространство XYZ (график цветностей) с указанием длин волн, соответствующим определенному цветовому тону.

Основными факторами, влияющими на формирование воспринимаемого цвета, являются спектральные характеристики источника све-

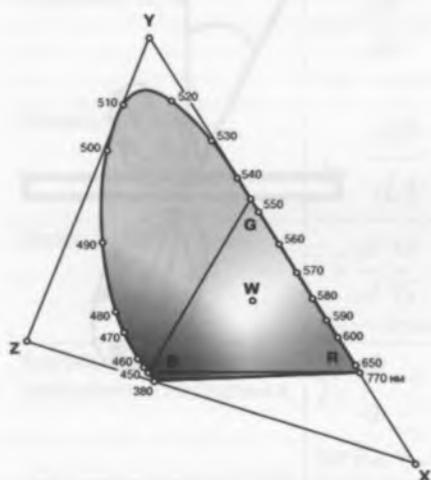


Рисунок 2 — График цветностей

Измерение цвета сводится к определению показателей, показанных на рисунке 4. Координаты цвета в системе XYZ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} X &= 0,4184R - 0,0912G + 0,0009B; \\ Y &= -0,1587R + 0,2524G - 0,0025B; \\ Z &= -0,828R + 0,0157G + 0,1786B. \end{aligned}$$

Эргономическими критериями системы могут быть следующие показатели.

Контраст объекта различения с фоном K — отношение абсолютной величины разности между яркостью фона и объекта к яркости фона, определяется по формуле:

$$K = \frac{|L_{\text{фона}} - L_{\text{объекта}}|}{L_{\text{фона}}}, \quad (7)$$

где $L_{\text{фона}}$ — яркость фона, $\text{кд}/\text{м}^2$;

$L_{\text{объекта}}$ — яркость объекта различения, $\text{кд}/\text{м}^2$.

Контраст объекта различения с фоном считается:

- большим — при K более 0,5 (объект и фон резко отличаются по яркости);
- средним — при K от 0,2 до 0,5 (объект и фон заметно отличаются по яркости);
- малым — при K менее 0,2 (объект и фон мало отличаются по яркости).

та, окружающей среды, приемника излучения. Согласно рекомендациям Международной Комиссии по освещению (МКО) в части преобладания холодной составляющей света днем и красно-янтарной вечером следует варьировать колориметрические характеристики светильников в течение дня. Этого можно добиться путем применения светильников с красной, синей и зеленой компонентами, один из которых (люминесцентный), выпускаемый фирмой Art-Lyte, показан на рисунке 3а. При этом предполагается возможность обеспечения 256 градаций яркости по каждой цветовой составляющей (рисунок 3б). Задавая нужную область координат цветности на графике, можно рассчитывать показатели светового цвета и управлять, таким образом, характеристиками освещения.



Рисунок 3 — Светильник полноцветовой люминесцентный Art-Lyte 4 DMX: а — внешний вид; б — панель режимов управления

Коэффициент светового климата — коэффициент, учитывающий особенности светового климата.

Показатель дискомфорта M , определяемый по формуле согласно ТКП 45-2.04-153-2009:

$$M = \frac{L_c \Omega^{0,5}}{\Phi_\theta L_{\text{ад}}^{0,5}}, \quad (8)$$

где L_c — яркость блеского источника, $\text{кд}/\text{м}^2$;

Ω — угловой размер блеского источника, стер;

Φ_θ — индекс позиции блеского источника относительно линии зрения;

$L_{\text{ад}}$ — яркость адаптации, $\text{кд}/\text{м}^2$.

Красное отношение r_k — отношение красного светового потока к общему световому потоку источника света, %, определяется по формуле:

$$r_k = \frac{\int_{380}^{700} \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{700} \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \cdot 100, \quad (9)$$

где $\varphi(\lambda)$ — спектральная плотность потока;

$V(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность глаза человека;

λ — длина волны, м.

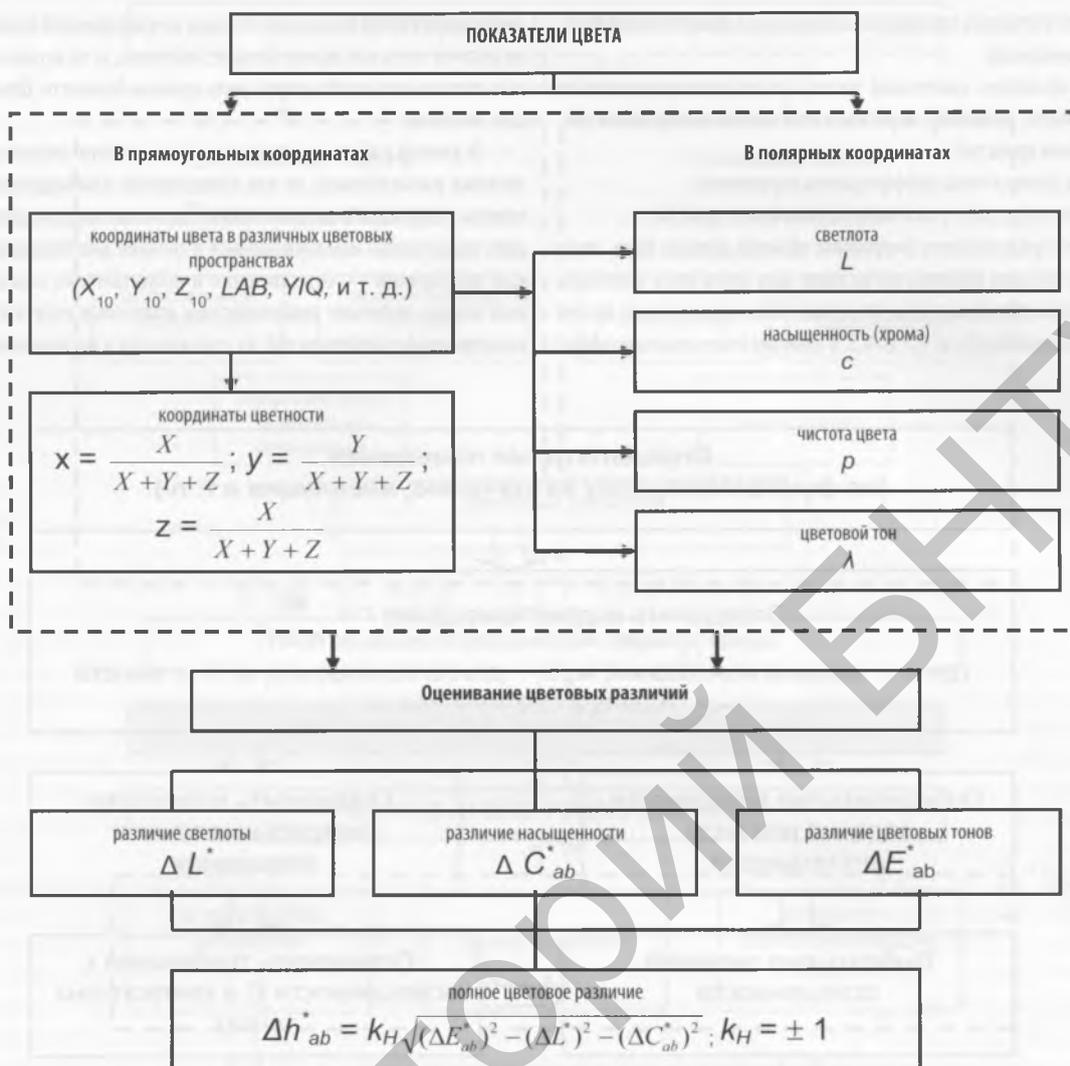


Рисунок 4 — Показатели цвета

РЕКОМЕНДАЦИИ К РАСЧЕТАМ ОСВЕЩЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ

Разработанный алгоритм расчета освещения в помещении и рекомендации по созданию адаптивной осветительной системы кратко представлен на рисунке 5. Отправной точкой является функциональное назначение помещения (жилое, производственное, офисное и т. д.) и его линейные размеры, по которым рассчитывается индекс помещения. Затем согласно классификации заданий (ГОСТ ИСО 8995) либо зрительных работ, выполняемых в производственном помещении, приведенной в ТКП 45-2.04-153-2009, устанавливается шкала освещенности. В таблице 2

приведены ряды освещенности для различных типов поверхностей, заданий и видов деятельности. Значения освещенности зависят от визуальных требований для выполнения задания, практического опыта и необходимости оптимального использования энергии с наименьшими затратами. Они должны обеспечить удовлетворительную зрительную работоспособность и комфортное состояние работников. Для каждого типа поверхности, задания или для вида деятельности указан ряд трех уровней освещенности.

Таблица 2 — Ряды освещенности для различных типов поверхностей, заданий и видов деятельности

Ряды освещенности, лк	Тип поверхности, задания или вида деятельности
20; 30; 50	Наружные рабочие площадки и улицы
100; 150; 200	Рабочие помещения, не используемые постоянно для работы
200; 300; 500	Задания с низкими требованиями к условиям зрительного восприятия
300; 500; 750	Задания со средними требованиями к условиям зрительного восприятия
500; 750; 1000	Задания с требованиями к зрительному восприятию
750; 1000; 1500	Задания с трудными условиями зрительной работы
1000; 1500; 2000	Задания с особыми требованиями к условиям зрительной работы
Св. 2000	Задания с чрезвычайно высокими требованиями к условиям зрительной работы

Необходимо учитывать следующие соотношения яркостей поверхностей рабочих помещений:

- между объектом зрительной работы и его непосредственным окружением, например, верстаком или письменным столом (соотношения яркости);
- потолка, стены и пола (коэффициенты отражения);
- осветительных приборов и окна (ограничения яркости).

Яркость непосредственного окружения объекта должна быть, если возможно, ниже яркости объекта, но не ниже чем треть этого значения. Если коэффициенты отражения объекта неизвестны заранее, то во время разработки они принимаются от 0,3 до 0,5. В рабочих помещениях коэффи-

циент диффузного отражения потолка или внутренней поверхности кровли должен быть как можно больше, особенно, если используют углубленные светильники, чтобы уменьшить прямую блескость, блеск и вуалирующие отблески.

В данной работе при проектировании осветительной системы предлагается рассматривать ее как совокупность взаимодействующих переменных, входящих в динамичный и статичный модули. Динамичный модуль представлен изменяющимися в течение дня показателями первичных излучателей — естественного и искусственного освещения, статичный модуль включает характеристики вторичных излучателей — цвета, микрорельефа, поверхностей, их отражающих и поглощающих свойств.



Рисунок 5 — Алгоритм светотехнического расчета

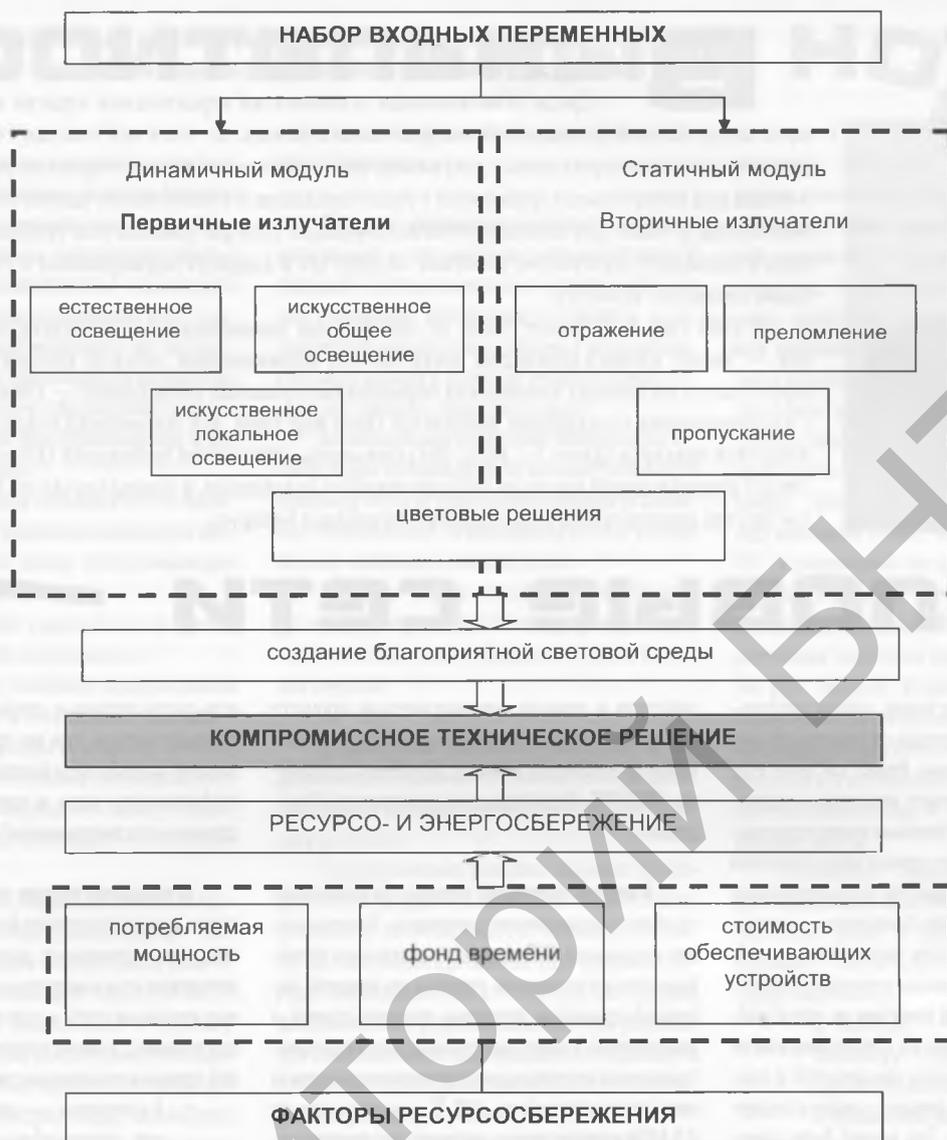


Рисунок 6 — Модель осветительной адаптивной системы как компромиссное техническое решение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный уровень развития технических и программных средств позволяет создавать эффективные системы освещения с точки зрения формирования здоровой световой среды и энергосбережения. Перспективным техническим решением являются адаптивные осветительные системы с автоматизированным управлением, которые изменяют свои фотометрические и колориметрические характеристики в течение дня с уче-

том нейроповеденческих, зрительных и энергосберегающих аспектов. Особенно актуально данное направление для помещений с длительным пребыванием людей. Так как в основе проектирования таких систем лежат принципы фотобиологии и физической оптики, приведенные рекомендации к светотехническим расчетам будут являться полезными.

Библиография

1. Восприятие света как стимула незрительных реакций человека. Г.К. Брейнард, И. Провенсио. Светотехника, 2008. — № 1. — С. 6–12.
2. Воздействие изменяющегося света на здоровье людей во время работы. П.Дехофф. Светотехника, 2006. — № 3. — С. 54–56.
3. ТКП 45-2.04-153-2009. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования
4. ГОСТ ИСО 8995-2002. Принципы зрительной эргономики. Освещение рабочих систем внутри помещений.
5. ГОСТ 24940-96. Здания и сооружения. Методы измерения освещенности.
6. Шишковский А.А. Прикладная физическая оптика. — М.: Изд-во физ.-мат. лит.-ры. 1961. — 811 с.
7. Справочная книга по светотехнике / Под ред. докт.техн.наук, проф. Ю.Б. Айзенберга / 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 528 с.
8. СТБ ISO 7724-1-2008. Краски и лаки. Колориметрия. Часть 1. Основные положения.