

*Егорченков В.А., к.т.н., доцент
Национальный авиационный университет, г. Киев
Дроздов Л.Н., технический директор
Донецкий институт по проектированию организации шахтного строительства
и предприятий строительной индустрии ПАО «ДИОС», г. Красный Лиман*

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ

С целью повышения производительности труда и улучшения самочувствия рабочих на производстве предложена методика формирования световой среды в промышленных зданиях с использованием благоприятных качественных и количественных параметров освещения, полученных по результатам проведения психофизических исследований. Описан реальный пример использования этой методики в цехе спирализации электроламповой промышленности. В результате на опытном участке в два раза сокращено количество ламп и во столько же раз уменьшена их мощность, улучшилась световая обстановка, на всех рабочих местах отсутствовало явление искрящейся спирал и производительность труда увеличилась на 12%.

Ключевые слова: *световая среда, производственные здания, количественные и качественные показатели, средняя сферическая освещенность, световой вектор, контрастность освещения, методика, оптимальная система освещения.*

*Егорченков В.О., к.т.н., доцент
Національний авіаційний університет, м. Київ
Дроздов Л.М., технічний директор
Донецкий институт з проектування організації шахтного будівництва
і підприємств індустрії ПАТ «ДІОС», м. Красний Лиман*

МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ У ВИРОБНИЧИХ БУДІВЛЯХ

З метою підвищення продуктивності праці й поліпшення самопочуття робочих на виробництві запропоновано методику формування світлового середовища у виробничих будівлях з використанням сприятливих якісних та кількісних параметрів освітлення, отриманих за результатами проведення психофізичних досліджень. Описано реальний приклад використання цієї методики в цеху спіралізації електролампової промисловості. У результаті на дослідній ділянці вдвічі скорочено кількість ламп та в стільки ж разів зменшено їх потужність, поліпшилась світлова обстановка, на всіх робочих місцях відсутнє явище спіралі, яка іскрить, і продуктивність праці збільшилася на 12%.

Ключові слова: *світлове середовище, виробничі будівлі, кількісні та якісні показники, середня сферична освітленість, світловий вектор, контрастність освітлення, методика, оптимальна система освітлення.*

Yegorchenkov V., PhD, Associate Professor
National Aviation University, Kiev
Drozdov L., Technical Director

Donetsk Institute for Design and Construction management PSC «DIOS», Krasny Liman

METHOD OF LIGHTING SYSTEM OPTIMIZATION IN INDUSTRIAL BUILDINGS

Light environment in industrial premises, as you know, has a great influence on labor productivity, health and human appearance of occupational diseases.

Using high levels of illumination mitigates fatigue, enables stay awake for a long time. This proves that bright light has a positive effect on the central nervous system. However, on the other hand, too much bright light may adversely affect the operation of the visual system as a so-called phenomenon of glare appears. In this regard the lighting system optimization must be provided.

The aim of this work is to develop the method of forming the optimal light environment in workplaces, taking into account the combined effect of quantitative and qualitative characteristics of the light field. It is offered to use the average spherical illumination, light vector unit, its angular height and azimuth as well as the lighting contrast for industrial buildings among all characteristics. Instead of the average spherical illumination may be use any of the above pointed characteristics, depending on the characteristics of the process.

The evaluation by means of the characteristics of the complex, as shown by many studies, let design the most efficient (optimal) lighting system for this process.

Methods of determining of optimal lighting system in the workshop is as follows:

- *carefully studying and analyzing the manufacturing process;*
- *selecting the specific observation object for the production process;*
- *determining the necessary range of lighting options;*
- *determining the favorable values of these parameters;*
- *selecting a kind of lighting system which the light environment settings would be as close as possible to their favorable values at each workplace.*

The basis of this technique is a favorable method of determining the values of the parameters of lighting. It is as follows.

First develop the test object, which should be as close to the real object of observation. Then select the appropriate psycho-physical method. If objects are moving you need to use the method of constant stimuli.

Determine the required number of subjects. Organize the pilot workplace with the installation of the lamp with the possibility of changing its power and position in space. The relative visual performance was used to study the effect of light on the characteristics of the visual sensations.

Control and adjustment of the measurement results were carried out using a subjective evaluation test. Methods of experimental research was tested on Miley-Say (Kyrgyzstan) Lamp Factory in the electrode spiral shop. As a result of the experimental plot twice reduced the number of lamps and the same factor reduced their capacity, light situation was improved, sparkling spiral phenomenon was absent in all workplaces, and labor productivity was increased by 12%.

Keywords: *light environment, industrial buildings, quantitative and qualitative indicators, average spherical illumination, light vector, contrast, lighting, method, optimal lighting system.*

Введение. Световая среда в производственных помещениях, как известно, оказывает большое влияние на производительность труда, самочувствие человека. При высокой напряженности зрительного труда и плохих условиях освещения не только снижается производительность труда, но и проявляются профессиональные заболевания как органов зрения, так и других систем организма (снижение эффективности работы зрительного анализатора, частичная потеря зрения, головные боли и др.). Следовательно, здоровье человека, работающего на производстве, во многом будет зависеть от того, каким образом будут выполнены системы освещения в цехах. Эта взаимосвязь особенно остро проявляется при точных зрительных работах (I – IV разряды зрительных работ) [1].

Анализ последних источников исследований и публикаций. Промышленное освещение используется для обширного числа зрительных работ и интерьеров в маленьких мастерских и громадных заводских цехах для высокоточной работы и решения масштабных производственных задач. Помимо зрительных задач освещение в промышленных зданиях играет значительную роль в качестве фактора настроения, высокой работоспособности и предотвращения несчастных случаев. Существует ряд исследований [2 – 4], которые показывают, что использование более высоких уровней освещенности для того, чтобы справиться с усталостью, дают возможность оставаться бодрыми в течение длительного времени. Это доказывает, что яркий свет оказывает воздействие на бодрствование через центральную нервную систему. Однако, с другой стороны, слишком яркий свет может отрицательно сказываться на работе зрительной системы, поскольку возникает так называемое явление блескости. Где же золотая середина? А золотую середину поможет выявить использование комплекса интегральных характеристик светового поля, который учитывает как количественные, так и качественные показатели световой среды. Это подчеркивали многие исследователи: А.А. Гершун [5], В.В. Мешков [6], Н.М. Гусев [7] и другие.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. По мнению специалистов [8], все еще нет общей методике, которая могла бы служить практическим руководством для проектировщиков-светотехников и исследователей при формировании оптимальной световой среды в производственных зданиях с использованием нескольких критериев оценки. Наряду с этим существует множество публикаций, как уже отмечалось, в которых авторы подтверждают необходимость пересмотра существующих норм и правил проектирования осветительных установок разного назначения.

Постановка задачи. Целью данной работы является предоставление работникам производственной сферы информации о методике формирования оптимальной световой среды на рабочих местах с учетом комплексного влияния количественных и качественных характеристик светового поля.

Основной материал и результаты. Свет обладает как количественными, так и качественными характеристиками. В практике проектирования систем освещения основное значение, как правило, придают учету количественных характеристик, а качественные представляются лишь общими рекомендациями. Хотя именно они могут играть существенную роль в приемлемости той или иной системы освещения помещений.

К количественным характеристикам относятся:

– горизонтальная освещенность (E) – средняя плотность светового потока на горизонтальной плоскости – основная нормируемая величина, которая хорошо характеризует условия зрительного восприятия плоских объектов, расположенных в освещаемой плоскости. Является функцией точки и направления;

– средняя сферическая освещенность ($E_{4\pi}$) – средняя плотность светового потока

на поверхности сферы, радиус которой стремится к нулю. Эта величина является функцией точки, т.е. как сферу ни поворачивай вокруг своего центра, значение освещенности будет оставаться одним и тем же. Такая величина хорошо оценивает условия зрительного восприятия при световых потоках из различных направлений. В этом заключается преимущество средней сферической освещенности. Такую характеристику лучше всего использовать при оценке условий освещения объемных объектов наблюдения, расположенных над плоскостью (в пространстве), что наблюдается в большинстве промышленных предприятий;

– средняя полусферическая освещенность ($E_{2\pi}$) – средняя плотность светового потока на поверхности полусферы, радиус которой стремится к нулю. Эта величина является функцией точки и направления, т.е. при вращении полусферы значение освещенности будет меняться. Среднюю полусферическую освещенность лучше всего использовать при оценке условий освещения объемных объектов наблюдения с рельефной поверхностью, расположенных на плоскости;

– средняя цилиндрическая освещенность ($E_{\text{ц}}$) – средняя плотность светового потока на боковой поверхности вертикально расположенного цилиндра, диаметр которого и высота стремятся к нулю. Эта величина также является функцией точки и направления, т.к. при отклонении оси цилиндра от вертикального ее положения значение освещенности будет меняться. Среднюю цилиндрическую освещенность лучше всего использовать в тех помещениях, где зрительные операции осуществляются при горизонтальной линии зрения, а объекты наблюдения располагаются на вертикальной плоскости (выставочные павильоны, музеи, картинные галереи и т.п.). Следует отметить то, что средняя цилиндрическая освещенность для некоторых помещений нормируется в действующем в настоящее время в Украине ДБН [1];

– световой вектор – определяет в любой точке поля модуль и направление вектора переноса световой энергии в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной направлению переноса. Световой вектор характеризуется прежде всего модулем, который определяется следующим образом (рис. 1):

$$|\vec{\epsilon}| = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2}, \quad (1)$$

где ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z – составляющие светового вектора, соответственно по осям X, Y, Z, которые определяются разностью освещенностей противоположных сторон площадок, перпендикулярных данным осям.

Модуль светового вектора – это количественная характеристика.

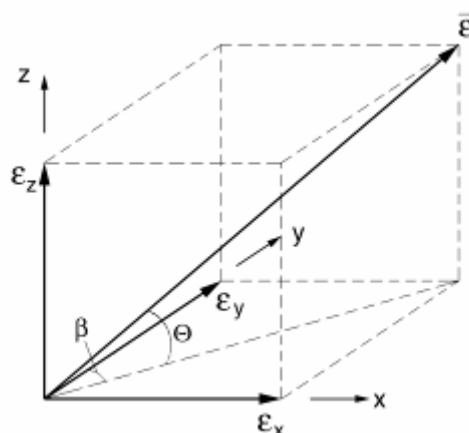


Рисунок 1 – Схема к определению параметров светового вектора

Качественной характеристикой является направление светового вектора, которое определяет преобладающее направление световых потоков в помещении. Эта величина характеризует условия тенеобразования объемных объектов, что в значительной степени определяет условия зрительного восприятия.

Направление светового вектора лучше всего определять двумя параметрами: угловой высотой θ и азимутом β от какой-либо оси (например, оси Y). Из тригонометрических функций нетрудно определить

$$\theta = \arcsin \frac{\varepsilon_z}{|\vec{\varepsilon}|}; \quad \beta = \arctg \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \text{ (от оси } Y\text{);} \quad (2)$$

– контрастность освещения – качественная характеристика, оценивающая тенеобразующие свойства светового поля, в результате которых выявляется форма объекта и структура его поверхности. Контрастность освещения определяется отношением величины модуля светового вектора к средней сферической освещенности

$$K_o = \frac{|\vec{\varepsilon}|}{E_{4\pi}}. \quad (3)$$

Контрастность может принимать значения от 0 до 4. Первое значение может иметь место, например, в сферическом помещении, внутренняя поверхность которого равномерно излучает (отражает) свет во всех направлениях. В таком случае модуль светового вектора равен нулю. Второе значение имеет место, например, темной ночью на улице при одиноком фонаре. В этой ситуации тени черные и резкие, а величина средней сферической освещенности приобретает минимальное значение.

Из всех перечисленных характеристик наиболее универсальными для промышленных зданий являются следующие: средняя сферическая освещенность, модуль светового вектора, его угловая высота и азимут, а также контрастность освещения [6]. Хотя вместо средней сферической освещенности может быть и любая из вышеперечисленных характеристик в зависимости от особенностей технологического процесса. Оценка при помощи этого комплекса характеристик, как показали многие исследования, позволяет спроектировать наиболее эффективную (оптимальную) систему освещения для данного технологического процесса.

Методика определения оптимальной системы освещения в цехе следующая:

- тщательно изучается и анализируется технологический процесс;
- выбирается характерный для данного производства объект наблюдения;
- определяется необходимый комплекс параметров освещения;
- определяются благоприятные значения этих параметров;
- подбирается такая система освещения, при которой значения параметров световой среды были бы максимально приближены к благоприятным их значениям на каждом рабочем месте.

Методика определения благоприятных значений параметров освещения заключается в следующем.

На основе выбранного объекта наблюдения разрабатывается тест-объект, который должен быть максимально приближен к реальному объекту наблюдения.

Выбирается соответствующий психофизический метод [9]. Например, при восприятии движущихся объектов следует использовать метод постоянных раздражителей.

Определяется необходимое количество испытуемых для проведения психофизического эксперимента. Это, как правило, рабочие данного производства.

Организовывается опытное рабочее место, отличающееся тем, что рабочий осуществляет операции с тест-объектом, а также установкой светильника с возможностью изменения его мощности и положения в пространстве.

Для изучения влияния световых характеристик на зрительные ощущения используется зрительная работоспособность η [10]. Этот критерий наиболее универсален и чувствителен к качественным показателям освещения. Применение его также целесообразно при рассматривании как стационарных, так и движущихся объектов.

Зрительная работоспособность определяется по формуле

$$\eta = \frac{N}{T} \cdot \frac{n'}{n}, \quad (4)$$

где N – общее количество элементов тест-объекта, просмотренных наблюдателем, шт.;

T – полное время определения зрительной работоспособности, с;

n – количество бракованных элементов в тест-объекте, шт.;

n' – количество правильно опознанных элементов, шт.

Для сравнения влияния на зрительную работоспособность различных параметров световой среды используем относительную зрительную работоспособность $\eta_{отн}$

$$\eta_{отн} = \frac{\eta}{\eta_{max}} \cdot 100, \%, \quad (5)$$

где η_{max} – максимальное значение зрительной работоспособности, определяемое наиболее благоприятным значением того или иного параметра освещения для заданного тест-объекта.

Контроль и корректировка результатов измерений осуществляются при помощи субъективной оценки испытуемых, т.е. у испытуемого спрашивают его мнение о данной световой обстановке, например, по трехступенчатой шкале: плохо, нейтрально, хорошо.

Методика экспериментальных исследований была апробирована на Майли-Сайском (Киргизия) электроламповом заводе в электродно-спиральном цехе [11].

На электроламповых заводах одним из наиболее ответственных с точки зрения качества выпускаемой продукции (электрических ламп накаливания) и условий освещения является участок спирализации (первый разряд зрительных работ [1]).

На этом участке дважды проводилась реконструкция системы искусственного освещения, однако это не дало положительного результата. При осмотре цеха наладчики навивочных машин указали на ряд рабочих мест, где на спираль вообще невозможно было смотреть, т.к. наблюдателю она представлялась в виде искрящегося тела. Рабочие жаловались на неприятные зрительные ощущения во время работы, а после нее некоторое время в глазах ощущались темные пятна. Понятно, что администрация завода была обеспокоена этим негативным фактором, устранение которого важно прежде всего с точки зрения предотвращения профессионального заболевания.

При анализе данной ситуации было выдвинуто предположение о недостаточном учете качественных характеристик светового поля.

Для исследования влияния параметров освещения на состояние органов зрения был разработан тест-объект, который представлял собой 12 серий по 24 спирали определенного типа. Причем в каждой серии соотношение годных и бракованных спиралей 1:1, а их чередование, во избежание угадывания, осуществлялось в случайном порядке. Тип брака, включенного в тест-объект, – сечка – наиболее характерный для данной продукции.

После создания различных параметров световой обстановки на опытном рабочем месте, которое максимально приближено к реальному производству, испытуемому (было отобрано 12 человек из рабочих данного производства) предъявлялся тест-

объект. Параметры световой обстановки и ответы испытуемых (годная или брак) заносились в специальную карту психофизических исследований.

Относительная зрительная работоспособность определялась в зависимости от средней сферической освещенности, азимута и угловой высоты светового вектора и контрастности освещения.

В результате исследования было выявлено, что наиболее благоприятными необходимо считать следующие значения:

- контрастность освещения $m = 2,6 \pm 0,15$;
- средняя сферическая освещенность $E_{4\pi} = 380 \pm 20$ лк;
- модуль светового вектора $|\vec{\varepsilon}| = 988 \pm 77$ лк.

Следует отметить, что в процессе поиска благоприятных значений параметров светового поля было найдено объяснение появлению искрящейся спирали, о чем было сказано выше. Дело в том, что kern (основа, на которую навивается спираль) представляет собой блестящую молибденовую проволоку, а сама спираль – темные вольфрамовые витки. При определенном неблагоприятном сочетании световых параметров отраженные от kernа и проходящие через витки спирали световые потоки создают множество мельчайших бликов в глазах наблюдателей, которые и воспринимают спираль как искрящееся тело. Но если систему освещения выполнить таким образом, чтобы соблюдались найденные благоприятные параметры светового поля или близкие к ним, то такого неблагоприятного явления наблюдаться не будет.

По результатам исследования определено также усредненное значение степени влияния параметров друг на друга:

- по средней сферической освещенности..... $k_e = 0,2$;
- по контрастности освещения..... $k_m = 1,0$;
- по угловой высоте светового вектора..... $k_\theta = 9,7$;
- по азимуту светового вектора..... $k_\beta = 6,4$.

Это значит, что при отклонении параметра от его нормативного значения относительная зрительная работоспособность снижается в k раз по отношению к контрастности освещения.

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие **выводы**:

1. Как видно из полученных результатов, для данной производственной операции на эффективность зрительных ощущений существенно влияют не абсолютные уровни, а угловые параметры светового вектора.

2. Использование результатов эксперимента позволит определить наиболее эффективную систему освещения, при которой не только будет наблюдаться высокая производительность труда, но и будут сведены к минимуму профессиональные заболевания органов зрения.

3. С использованием полученных результатов можно осуществлять светотехническую оценку различных вариантов систем освещения при проектировании зданий [11].

4. По результатам данных исследований при создании системы искусственного освещения на опытном участке было в два раза сокращено количество ламп и во столько же раз уменьшена их мощность. При этом изменено расположение светильников, и параметры освещения доведены до найденных благоприятных диапазонов. В результате улучшилась световая обстановка, на всех рабочих местах отсутствовало явление искрящейся спирали, и производительность труда увеличилась на 12%.

Литература

1. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. Інженерне обладнання будівель і споруд. – К. : Мінрегіонбуд України, ДП «Укрархбудінформ», 2006. – 76 с.
2. Daurat A. Bright light affects alertness and performance rhythms during a 24-hour constant routine / A. Daurat et al. // *Physics and behavior*. – 1993.
3. Crunberger J. The effects of biologically active light on the noo-and thymopsyche on psychophysiological variables in healthy volunteers / J. Crunberger et al. // *Int. J. of Psychophysiology*. – 1993.
4. Tops M. The effect of the length of continuous presence on the preferred illuminances in offices / M. Tops et al. // *Proc. CIBSE Conf.* – 1998.
5. Гершун А. А. Световое поле / А. А. Гершун // *Избранные труды по фотометрии и светотехнике*. – М. : Физматгиз, 1958. – С. 223 – 397.
6. Мешков В. В. Основы светотехники: учеб. пособие для вузов. Ч. 1. / В. В. Мешков. – М. : Энергия, 1979. – 368 с.
7. Гусев Н. М. Пространственные характеристики световой среды / Н. М. Гусев // *Научные труды НИИ строительной физики Государственного комитета СССР по делам строительства*. – М., 1978. – Вып. 20(XXXIV). – С. 4 – 12.
8. Ронки Л. Р. Зрительный баланс как одна из компонент пространственного восприятия / Л.Р. Ронки // *Светотехника*. – 2003. – № 3. – С. 25 – 29.
9. Бардин К. В. Проблема порогов чувствительности и психофизические методы / К. В. Бардин. – М.: Наука, 1976. – 395 с.
10. Weston H. The relation between illumination and visual performance / H. Weston. – London, 1953.
11. Разработка способов улучшения совмещенного освещения в цехах Майли-Сайского электролампового завода: отчет по хоздоговорной научной теме №. 80007643, шифр 106 / Московский инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. – М., 1981. – 90 с.

© Егорченков В.А., Дроздов Л.Н.
Надійшла до редакції 09.03.2016