МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет
имени К. И. Сатпаева

Ж. Е. Егинбаев

ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

Рекомендовано научно-методическим советом Университетом
в качестве учебного пособия

Алматы 2015

УДК 628.9(075)
ББК
Е

Рецензенты:
Джумадилов Т. К., д-р хим. наук, проф. Химического института имени А. Б. Бектурова, зав. лаборатории физической химии

Тураев И. И., генеральный директор ТОО AZ PRINT CENTRE, проф.

Сурашов Н. Т., д-р техн. наук, проф. КазНТУ имени К. И. Сатпаева, академик НАЕН РК, зав. каф. ПТМиГ

Егинбаев Ж. Е. Основы светотехники: Учеб. пособие. – Алматы: КазНТУ имени К. И. Сатпаева, 2015. – 153 с.
Ил. 72. Табл.4. Библиогр. – 17 назв.
ISBN 978-601-228-782-0

В учебном пособии представлены основные понятия, история развития и сведения о светотехники, её методах, приборах и их практических применениях.

Предлагаемое учебное пособие «Основы светотехники» рассчитано на специалистов в области светотехники и смежных с нею научно-технических дисциплин, а также на преподавателей и студентов соответствующих специальностей.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 5В072200 «Полиграфия», а также может быть полезно инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием и эксплуатацией систем светотехники и светотехнических установок.

УДК 628.9(075)
ББК

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2015 год.

© Егинбаев Ж. Е., 2015 г.
©КазНТУ, 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

Светотехника, область науки и техники, предмет которой – исследование принципов и разработка способов генерирования, пространственного перераспределения, измерения характеристик оптического излучения и преобразования энергии света в другие виды энергии. Светотехника охватывает также вопросы конструкторской и технологической разработки источников света, осветительных, облучательных и светосигнальных приборов и устройств, систем управления источниками света, вопросы нормирования, проектирования, устройства и эксплуатации светотехнических установок. Кроме того, светотехника связана с изучением воздействия естественного и искусственного света на вещество и живые организмы. Термин светотехника в современном широком понимании стал употребляться в научной и технической литературе с 20-х гг. XX в.

Курс «Основы светотехники» знакомит с методами и способами измерений и оценки качества полиграфической продукции, основанными на таких дисциплинах, как физическая и геометрическая оптика, фотометрия, фотографическая метрология, структурометрия, физиология и психология зрительного восприятия, стандартизация измерений, психофизика.

Полиграфия – это совокупность различных технических и технологических средств, используемых для печатного размножения текстовой и изобразительной продукции в виде книг, журналов, газет, упаковки и другой печатной продукции. Полиграфия тесно связана со светотехникой, поскольку практически в любой репродукционной технологии, используемой полиграфическим производством, производится запись изображения с помощью оптического излучения (света).

Дисциплина «Основы светотехники» изучает также приемники излучения, предназначенные для измерения характеристик излучения либо фотографической их регистрации. Большое место современной светотехнике занимают проблемы, связанные с синтезом, измерением и регистрацией цвета.
Знакомство с основами светотехники важно для специалистов полиграфической технологии, особенно занимающихся оптической регистрацией информации – изготовлением фотоформ, печатных форм, цифровой печатью. Они должны знать, какие факторы определяют качество оптической записи, как рассчитываются оптимальные режимы, какие свойства светочувствительных материалов важны для конкретного производственного процесса. Для этого им необходимо иметь представление о физических и физико-химических закономерностях, лежащих в основе преобразования и записи оптической информации.

В настоящее время в связи с повсеместным внедрением компьютерной обработки изображений стало возможным недоступное ранее качество цветных изображений, их корректирование и редактирование. Результаты можно видеть на экранах телевизоров и компьютеров. От полиграфии также требуется высококачественная цветная репродукция. Однако при воспроизведении на твердых носителях (бумаге, упаковочных материалах)

точная передача цветов связана с дополнительными проблемами, рассматриваемыми в специальных дисциплинах. Для успешного решения этих проблем необходимо знание закономерностей синтеза цвета и закономерностей их зрительного восприятия. Важно также знакомство с колориметрическими методами измерения цветов, факторами, влияющими на точность воспроизведения цветов, и методами оценки качества цветных изображений.

Природа и свойства излучений. Излучение, которое видит человек, называют *светом.* Понятие «свет» лежит в основе данного курса, оно же включено в название учебника. Согласно современным представлениям, которые излагаются в курсе физики, электромагнитное излучение – это сложное явление, характеризующееся волновыми и корпускулярными свойствами.

По теории Д.К. Максвелла, излучение, распространяемое в пространстве в виде электромагнитной волны, представляет собой периодические колебания напряженности электрического и магнитного полей. Электрический вектор *E* и магнитный вектор *H,* выражающие относительные напряженности полей, находятся во взаимно перпендикулярных плоскостях и оба перпендикулярны направлению распространения волны.

В квантовой теории всякое электромагнитное излучение рассматривается как поток частиц – так называемых *фотонов*. Фотон (квант электромагнитного поля, нейтральная элементарная частица с нулевой массой и спином 1; существует только в движении и обладает энергией, массой и волновыми свойствами, которые характеризуются частотой $\nu_Ф$ или длиной волны $\lambda_ф$. В светотехнике в основном используется понятие «длина волны».

Планк показал, что энергия фотона (ε – квант энергии излучения, Дж) определяется по формуле

$$\varepsilon = h\nu_ф = \frac{hc}{\lambda} \text{ или } \varepsilon = \hbar\omega,$$

где *h* – постоянная Планка (квант действия, основная постоянная квантовой теории, названная в честь Макса Планка (1858–1947) (немецкий физик, основоположник квантовой теории) ($h = 6{,}626\cdot10^{-34}$ Дж·с. Часто применяется величина $\hbar = h/2\pi = 1{,}0546\cdot10^{-34}$ Дж·с, также называется постоянной Планка); с – скорость света в вакууме; $\nu_ф$ – частота излучения, ω – круговая частота соответствующего электромагнитного излучения.

Массу фотона можно определить по формуле

$$m_ф = h\nu_ф/c^2,$$

где *c* – скорость распространения излучения.

1 моль вещества это есть эйнштейн (специальная единица энергии, принимаемая в фотохимии). Назван в честь Альберта Эйнштейна (1879–1955, физик-теоретик, один из основателей современной физики). Энергия одного

моля кванта (одного эйнштейна) Э = εN = hνN = hcN/λ, число Авогадро N = $6{,}0225 \cdot 10^{23}$ молекул/моль.

Движение фотона сопровождается волновым процессом; длина волны

$$\lambda_{\Phi} = c/\nu_{\phi}.$$

Диапазон длин волн электромагнитных колебаний, существующих в природе, достаточно широк и простирается от долей ангстрема до километра (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Излучение	Диапазон спектра излучения, мкм
Гамма-лучи	Менее 0,0001
Рентгеновские лучи	0,01 ...0,0001
Ультрафиолетовые лучи	0,3...0,01
Видимый свет	0,78...038
Инфракрасные лучи	1000...0,78
Радиоволны	Более 1000

Для светотехники наиболее важной частью спектра является оптическая. К оптической области спектра относится лишь часть электромагнитного излучения с интервалом длин волн от $\lambda_{min} = 0{,}01$ мкм до $\lambda_{max} = 1000$ мкм. В этом интервале спектра можно выделить три области: ультрафиолетовую (УФ), видимую и инфракрасную (ИК).

Ультрафиолетовое излучение (УИ), не видимое глазом электромагнитное излучение, занимающее интервал 0,01...0,38 мкм (400–10 нм) в оптической области спектра, характеризуется мощными фотонами – потоком частиц, обладающих сильным фотохимическим воздействием. Различают ближнее УИ – 400–200 нм и дальнее, или вакуумное, –200–10 нм. С уменьшением λ коэффициента поглощения УИ большинства прозрачных тел растёт и при λ < 105 нм прозрачных тел практически нет, в то время как коэффициент отражения материалов падает. Источники – высокотемпературная плазма, ускорительные электроны, некоторые лазеры, Солнце, звёзды и другие. Приёмники УИ – фотоматериалы, различные детекторы ионизирующих излучений. Биологическое действие УИ обусловлено химическими изменениями поглощающих их молекул живых клеток, главным образом нуклеиновых кислот (ДНК и РНК) и белков, и выражается в нарушениях деления возникновении мутаций и в гибели клеток. Малые дозы УИ оказывают благотворное действие на человека и животных.

Ультрафиолетовое излучение космическое (УИК), электромагнитное излучение космических тел в диапазоне длин волн λ от 400 до 10 нм, которое полностью поглощается в земной атмосфере и доступно для наблюдений лишь со спутников и ракет. Главный вклад в УИК дают горячие звёзды спектр классов О и В. УИК с λ < 912 Å эффективно поглощается атомами водорода межзвёздной среды и недоступно для прямых наблюдений из Солнечной

системы.

Ультрафиолетовое излучение Солнца (УИС), коротковолновое электромагнитное излучение (400–10 нм), на долю которого приходится около 9 % всей энергии излучения Солнца. УИС ионизирует газы верхних слоёв земной атмосферы, что приводит к образованию ионосферы.

Излучения видимого света 0,38…0,78 мкм **(**380...780 нм) являются наиболее важными для человека. Несмотря на свою довольно узкую область излучений, именно в этом диапазоне человеческий глаз воспринимает информацию. Это излучение оказывает значительные фотофизическое и фотохимическое действия, но меньшие, чем ультрафиолетовое.

Инфракрасное излучение (ИИ), не видимое глазом электромагнитное излучение в пределах длин волн λ от 1 – 2 мм до 0,74 мкм. Оптические свойства веществ в ИИ значительно отличаются от их свойств в видимом излучении. Например, слой воды в нескольких сантиметрах непрозрачен для ИИ с $\lambda > 1$ мкм. ИИ составляет значительную долю излучения ламп накаливания, газоразрядных ламп, около 50 % излучения Солнца; ИИ испускают некоторые лазеры. Для его регистрации пользуются тепловыми и фотоэлектрическими приёмниками, а также специальными фотоматериалами. Инфракрасное излучение космическое (ИИК), инфракрасное излучение, фиксируемое у ряда космических тел. К галактическим источникам ИИК относятся холодные красные карлики (звёзды с температурой поверхности $T \sim 1000 – 1500$ К), ряд планетарных туманностей, пылевые облака, переизлучающие ультрафиолетовое и видимое излучение находящихся в них горячих звёзд, к внегалактическим источникам – ядра галактик (в том числе и нашей) и квазары.

Минимальной энергией обладают фотоны инфракрасного излучения **(**0,78...1000 мкм), которое характеризуется в большей степени тепловым действием.

В основном изучается видимый диапазон спектра и его воздействие на ощущения человека. Необходимо отметить, что УФ- и ИК-диапазоны чрезвычайно важны также для полиграфии.

Контрольные вопросы

1. Определение термина «Светотехника». Что изучает дисциплина «Основы светотехники»?
2. Полиграфия и полиграфическая технология.
3. Природа и свойства излучений.
4. Что такое фотон и квант?
5. Раскажите о диапазоне длин волн электромагнитных колебаний, существующих в природе.

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОТОПРИЕМНИКОВ И ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

1.1. Взаимодействие фотоприемников с излучением

Общие сведения. Тела, в которых поглощенная энергия преобразуется в оптическое излучение, в светотехнике называют *приемниками излучения*, или *фотоприемниками*. Взаимодействие оптического излучения с фотоприемниками приводит как к изменению свойств среды, на которую падает излучение, так и к явлениям, связанным с преобразованиями энергии. Например, измерительная головка люксметра преобразует световой поток в электрический ток. Эти явления и соответственно фотоприемники можно классифицировать как фотобиологические, фотофизические и фотохимические. В полиграфии нашли применение все три вида фотоприемников.

Естественным и главным фотобиологическим приемником для полиграфиста является человеческий глаз, который помогает оценивать качество получаемой продукции, контролировать визуально производственный процесс.

Поскольку зрение и зрительное восприятие субъективны, визуальную оценку на производстве стараются заменить приборами с фотофизическими приемниками. Фотофизические явления – основа большинства измерительных приборов и устройств. Фотоприемники по типу фотофизических явлений можно разделить на следующие виды:

а) фотонные – в фотоприемнике под действием света возникает электродвижущая сила (ЭДС), которая затем регистрируется тем или иным способом; б) тепловые – в фотоприемниках сначала поглощенный свет нагревает измеряющий элемент, затем возникает ЭДС (термоэлектрический эффект), при этом изменяются сопротивление измеряющего элемента (болометр), объем газа в элементе (оптоакустический приемник) или появляются электрические заряды (пироэлектрические приемники).

Фотофизические приемники работают многократно, фотохимические приемники являются обычно одноразовыми. Фотохимические приемники очень важны для полиграфии. Энергия излучения переходит в химическую энергию. Происходит фотохимическое превращение поглотившего свет вещества. Такое преобразование происходит в большинстве светочувствительных материалов и фотополимеризуемых композиций, красок, лаков.

Все фотоприемники можно оценивать по различным параметрам. Перечислим важнейшие для нас свойства приемников:

а) общая чувствительность;

б) спектральная чувствительность;

в) вид реакции приемника на упавшее излучение;

г) линейность или нелинейность реакции приемника;

д) диапазон реакции приемника.

1.2. Светочувствительность

Под действием оптического излучения в приемнике происходят фотобиологические, фотофизические или фотохимические превращения, заданным образом изменяющие свойства приемника. Это изменение называют *полезной реакцией* фотоприемника. Следует обратить внимание на то, что реакцию фотоприемника могут вызвать только те фотоны, которые поглощаются веществом фотоприемника.

Не вся энергия упавшего излучения расходуется на полезную реакцию. Часть энергии приемником не поглощается, и поэтому реакции вызвать не может. Но даже поглощенная энергия может не полностью преобразоваться приемником. Например, она может быть потрачена на нагревание. Практически используемая часть энергии называется *полезной*. Если рассматривать мощности потока излучения Φ_0, то практически используемая часть потока называется *эффективным потоком* $P_{эф}$.

Отношение эффективного потока $P_{эф}$ к упавшему на приемник потоку излучения Φ_0 называют *светочувствительностью приемника*. Формула светочувствительности, раскрывающая ее физический смысл, имеет вид

$$S = C\frac{P_{эф}}{\Phi_0}, \qquad (1.1)$$

где $P_{эф}$ и Φ_0 имеют одинаковые размерности, например Вт; С – коэффициент пропорциональности, который может быть равен 1,0 или иметь другое значение.

Мощность и эффективность излучения зависят от длины волны, поэтому обычно находят спектральную чувствительность фотоприемника по формуле

$$S_\lambda = C\frac{P_{эф\lambda}}{\Phi_\lambda}, \qquad (1.2)$$

где S_λ – монохроматическая спектральная чувствительность; Φ_λ – монохроматический поток излучения; $P_{\lambda эф}$ – монохроматический эффективный поток.

По спектральной чувствительности все фотоприемники условно делят на *неселективные* (неизбирательные) и *селективные*. Неселективные приемники не изменяют величины спектральной чувствительности с изменением длины волны излучения. Это обычно тепловые приемники. Неизбирательность тепловых приемников зависит только от качества чернения приемной поверхности.

Спектральная чувствительность селективных приемников изменяется в зависимости от длины волны падающего излучения и находится в определенной зоне спектра. Обычно определяется относительная спектральная чувствительность. Чувствительность в максимуме принимается за 100 %,

остальные значения пропорционально уменьшаются. Поэтому такие приемники подбираются в зависимости от поставленной задачи.

Интегральную чувствительность фотоприемника обычно определяют практически, по конкретным методикам. Например, критерием чувствительности фотоприемников для измерения светового потока является количество микроампер, вырабатываемых фотоприемником на 1 лм упавшего светового потока. Для селеновых фотоэлементов это 200...600 мкА/лм. Интегральная чувствительность для потока излучения определяется в [А/Вт].

1.3. Виды эффективных потоков

Из формулы (1.2) следует, что, зная распределение S_λ и Φ_λ по спектру, можно рассчитать величину интегрального эффективного потока по отношению к данному приемнику:

$$P_э = k\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda)S(\lambda)d\lambda. \qquad (1.3)$$

Большая часть используемых в светотехнике и полиграфии приемников имеет ограниченную область спектральной чувствительности. Например, человеческий глаз чувствителен к видимой зоне спектра (от 380 до 780 нм, часто эту область сокращают до 400... 700 нм); фототехнические пленки чувствительны к ближней ультрафиолетовой и видимой зонам спектра; копировальные слои – к ультрафиолетовой и синей зонам спектра.

В полиграфии используются два вида эффективных потоков: световой *F* и фотоактиничный *A*. Для светочувствительных материалов и фотоприемников измерительных приборов используют *фотоактиничный поток* А. Это поток, эффективный по отношению к данному фотоприемнику. Интервал длин волн, в котором определяется фотоактиничный поток, обычно ограничен светочувствительностью фотоприемника или диапазоном излучения источника света. Например, если между фотоприемником и источником света находится стеклянная пластинка, то излучение коротких волн ограничено 400 нм, если кронстекло или кварцевое – то 190 нм (это так называемая граница вакуумного УФ-излучения).

Формула фотоактиничного потока имеет вид

$$A = K\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda)S(\lambda)d\lambda. \qquad (1.4)$$

где $\Phi(\lambda)$ – распределение мощности излучения по спектру, $S(\lambda)$ – кривая относительной спектральной чувствительности фотоприемника, К – коэффициент пропорциональности. В данном случае фотоактиничный поток измеряется в ваттах [Вт].

Поверхностная плотность фотоактиничного потока на освещаемой поверхности называется *актиничностью* излучения и обозначается буквой *а*:

$$a = \frac{dA}{dQ}. \qquad (1.5)$$

В нашем случае актиничность – аналог освещенности, измеряется в [Вт/м^2]. Чем больше актиничность излучения, тем эффективней используется энергия излучения и тем больше, при прочих равных условиях, будет полезная реакция приемника излучения. Для достижения максимальной актиничности желательно, чтобы максимальная мощность излучения и максимальная чувствительность приходились на одну и ту же зону спектра. Этим соображением руководствуются при подборе источника света для получения изображений на конкретном типе светочувствительного материала. Те же соображения касаются выбора источника излучения для фотополимеризующихся лаков и красок.

1.4. Фотофизические приемники

Фотофизические приемники многие десятилетия используются в полиграфии. В основном это фотонные приемники, принцип действия которых основан на внутреннем или внешнем фотоэффекте. Внешний фотоэффект возникает, когда фотоны света вырывают с поверхности фоточувствительного слоя электроны (образующие ЭДС), и называется *фотоэмиссией*.

Самыми распространенными приемниками такого типа были полупроводниковые селеновые фотоэлементы. Их распространенность в первую очередь связана со спектральной характеристикой, которая достаточно хорошо соответствует кривой видимости светлоадаптированного глаза. Сейчас люксметры – приборы для измерения освещенности – в основном (рис. 1.1) оснащены селеновыми фотоэлементами (рис. 1.1).

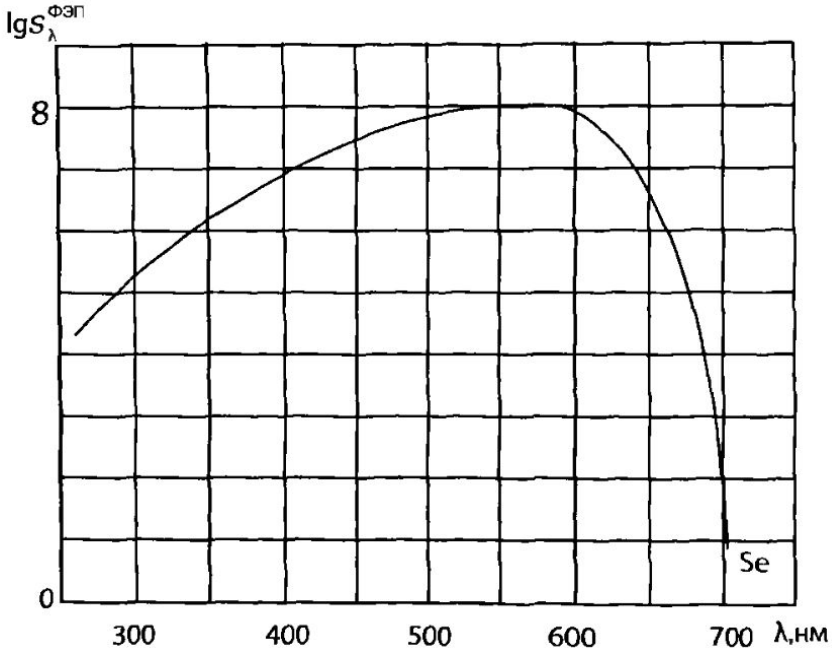


Рис. 1.1. Спектральная чувствительность селенового фотоэлемента

Другой распространенный фотоприемник – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Это сложный оптоэлектронный прибор, который каскадно усиливает сигнал от светового пучка (рис. 1.2). В XX в. он использовался в измерительных приборах – денситометрах, а сегодня в основном – в барабанных сканерах. Недостаток прибора – необходимость стабилизированного питания в диапазоне от 300 до 2000 В. Достоинством ФЭУ является возможность измерения больших световых потоков; приемник также обладает большим динамическим диапазоном.

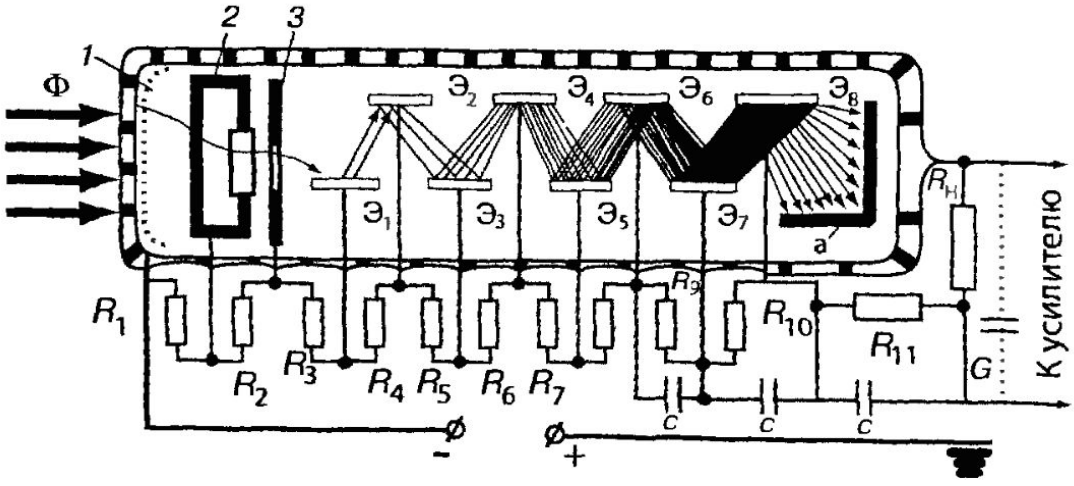


Рис. 1.2. Строение фотоэлектрического умножителя:
1 – металлическая сетка за входным окном; 2 – полупроводниковый катод, нанесенный на полый металлический цилиндр; 3 – анод; Э – вторичные катоды (эмиттеры), усиливающие сигнал; R – резисторы, регулирующие напряжение на эмиттерах; С – конденсаторы

При внутреннем фотоэффекте фотоны света поглощаются светочувствительным веществом, и свободные электроны появляются внутри

твердого тела. В фотоприемниках используются две формы внутреннего фотоэффекта: а) эффект фотопроводимости и б) фотогальванический эффект.

Эффект фотопроводимости состоит в создании фотоносителей в полупроводнике, результатом изменения концентрации которых становится увеличение проводимости полупроводника.

Такой эффект используется при создании фоторезисторов и фоторецепторов. Фоторезисторы используются в различных измеряющих и управляющих приборах, фоторецепторы – в электрографии.

Фотогальванический эффект возникает в полупроводниках с внутренним потенциальным барьером (*p*–*n*-переходом, переходом «металл–полупроводник», гетеропереходом). В этих приемниках излучения внутреннее электрическое поле перехода разделяет фотоносители, возникшие под действием оптического излучения. Пространственно разделенные фотоносители разных знаков (дырки и электроны) создают фотоЭДС. На этом эффекте работают фотодиоды, фототранзисторы, фототеристоры, приборы с зарядовой связью.

В последнее время широко применяются фотоприемники с зарядовой связью. Их наиболее известное название – прибор с зарядовой связью (ПЗС) (Латинская аббревиатура CCD – Charge Coupled Device). В сканерах их используют в виде линейки элементов, а в компактных спектрофотометрах в виде линейки для регистрации спектра. Наибольшее распространение ПЗС получили в цифровых фотоаппаратах и видиокамерах. В этих устройствах ПЗС применяется в виде так называемой матрицы.

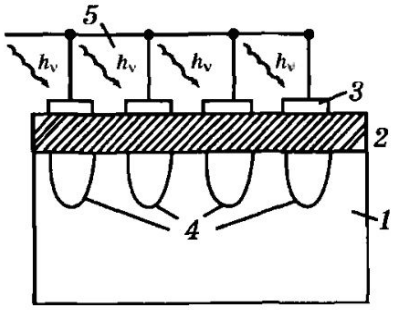


Рис. 1.3. Прибор с зарядовой связью:
1 – полупроводниковый материал; 2 – слой SiO_2; 3 – прозрачные электроды; 4 – потенциальные ямы; 5 – приложенное напряжение

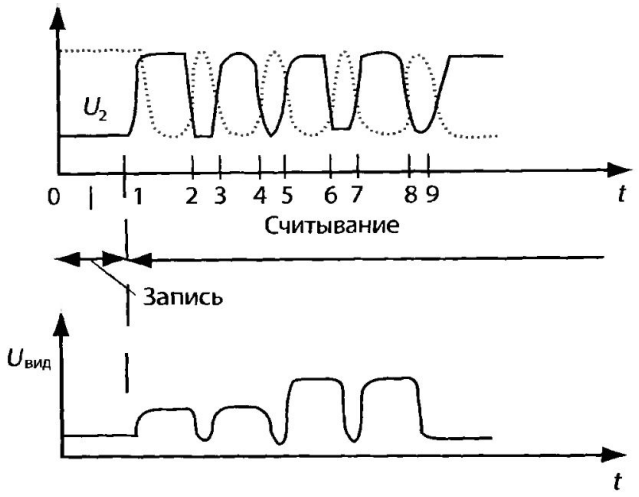


Рис. 1.4. Диаграмма управляющего напряжения и видеосигнала

Матрица – это микросхема, на которую нанесены элементы ПЗС в виде упорядоченной структуры, состоящей из рядов и столбцов. Элемент ПЗС – это структура «металл–диэлектрик–полупроводник» (МДП), приведенная на рис. 1.3. Объектив создает на поверхности матрицы оптическое изображение объекта съемки. Под действием света в элементе накапливается электрический потенциал, уровень которого пропорционален экспозиции. Затем фиксируется потенциал каждой точки матрицы. Для этого потенциалы последовательно перемещаются из строк матрицы в запоминающее устройство в виде периодического колебания потенциалов по уровню (рис. 1.4).

1.5. Глаз – фотобиологический приемник излучения

Устройство глаза. Основным приемником излучения и мерилом всего является человеческий глаз. Многие свойства восприятия зрительных образов зависят от строения глаза и его связи с мозгом. Ниже мы рассмотрим устройство глаза и его некоторые функции, связанные с восприятием светлоты. В последующих главах рассмотрим восприятие цвета нашим зрением.

Глаз работает аналогично фотокамере. На рис. 1.5 показана схема строения глаза человека. Свет попадает во внутренность глаза через отверстие в радужной оболочке – зрачок. Зрачок может менять свой диаметр от 1,5 до 8 мм в зависимости от яркости окружающего света, ослабляя попадающий в глаз свет примерно в 30 раз. Радужная оболочка пигментирована, поэтому цвет глаз индивидуален. Роговица и хрусталик как объектив фотокамеры фокусируют то, что мы видим на сетчатке, состоящей из светочувствительных элементов.

Проходя через зрачок, свет фокусируется в оптической системе глаза, состоящей из роговицы, передней камеры, зрачка, хрусталика и стекловидного тела. Рассмотрим подробнее каждый элемент глаза.



Рис. 1.5. Схема строения глаза (вертикальный разрез)

Роговица – передняя внешняя прозрачная поверхность глазного яблока, через которую проникает свет, является главным элементом, формирующим изображение. Ее изогнутая поверхность, находясь в непосредственном контакте с воздухом, обеспечивает плавный переход от показателя преломления глазных оптических сред к $n \approx 1{,}0$ (воздух). Изменение кривизны роговицы приводит к близорукости, дальнозоркости или астигматизму. Особенность роговицы в том, что она не имеет кровеносных сосудов, поэтому получает питание из окружающих тканей и жидкостей. Хрусталик представляет собой слоистую гибкую структуру с неравномерным показателем преломления: максимальным в центре и минимальным по краям. Такое строение хрусталика снижает вероятность аберраций (искажений), присущих простым оптическим системам. Фокусировка осуществляется за счет работы цилиарных глазных мышц, которые изменяют кривизну хрусталика, помещая тем самым фокус изображения рассматриваемого предмета на поверхность глазного дна. Такая работа хрусталика называется аккомодацией. То есть когда мы вглядываемся в объекты, расположенные близко, кривизна хрусталика значительно увеличивается, а если вглядываемся вдаль – значительно уменьшается.

При старении внутренняя структура хрусталика меняется, он становится менее эластичным, у наблюдателя появляется дальнозоркость. Кроме потери эластичности повышается оптическая плотность хрусталика, особенно в синей зоне спектра – он желтеет. Поскольку синие и фиолетовые лучи поглощаются сильнее, пожилым наблюдателям пурпурные цвета представляются более красными, чем молодым наблюдателям. Такие эффекты могут повлиять на

результаты коллективных оценок цвета, если молодые наблюдатели находятся совместно с пожилыми в одной группе оценки.

Пространство между роговицей и хрусталиком заполнено физиологическим водным раствором, а между хрусталиком и сетчаткой – стекловидным телом, которое является жидкостью с большой вязкостью, подобной вязкости желатина. Давление обеих жидкостей слегка превышает атмосферное, что обеспечивает постоянную форму глазного яблока и отсутствие дрожания изображения. Кроме того, упругость глазного яблока повышает сопротивляемость к механическим повреждениям.

Внутренняя поверхность глазного дна называется сетчаткой. Сетчатка – это слой клеток на задней внутренней поверхности глазного яблока. Она образована огромным количеством (10^6...10^8) очень маленьких, прилегающих друг к другу светочувствительных клеток двух видов – палочек и колбочек. Внутри клеток находится четыре вида фотопигментов: один – в палочках и три – в колбочках. Пигмент палочек позволяет «видеть» в диапазоне 380...760 нм при малом освещении. Колбочки могут быть трех видов: сине-, зелено- и красно-чувствительные; при совместной работе они видят в том же диапазоне, что и палочки. Когда колбочки возбуждаются примерно одинаково, возникает ощущение ахроматических цветов, или, по-другому, – светлоты. В остальных случаях ощущение светлоты возникает одновременно с ощущением цветности. Кривые относительной спектральной чувствительности колбочек и палочек приведены на рис. 1.6. Сетчатку можно рассматривать как периферическую часть головного мозга.

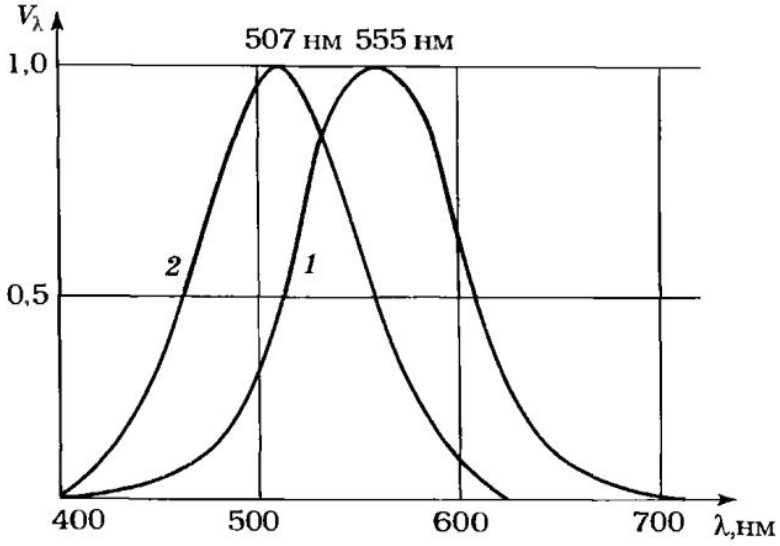


Рис. 1.6. Кривые относительной спектральной световой эффективности:
1 – для глаза, адаптированного к дневным яркостям; 2 – для глаза, адаптированного к ночным яркостям

Позади сетчатки находится пигментный эпителий – темный пигментный слой, который обеспечивает поглощение света, прошедшего через

сетчатку, т. е. не поглощенного фоторецепторами. Этим объясняется отсутствие рассеянного и отраженного света в оптической системе глаза.

Одно из самых важных образований сетчатки – ее центральная ямка. Это участок сетчатки, в котором условия рассматривания мелких деталей и цвета – наилучшие. Максимальный угловой размер рассматриваемой детали равен примерно 2°.

Центральная ямка защищена желтым фильтром – макулой (желтое пятно), который предохраняет ямку от воздействия интенсивного коротковолнового излучения. Колбочки в основном расположены в центре сетчатки – в так называемом «желтом пятне».

Строение и свойства светочувствительных клеток позволяют зрительно воспринимать светлоты и цвета. При ярком освещении колбочки обеспечивают возможность видеть мельчайшие детали. Палочки обладают очень высокой чувствительностью, позволяющей видеть в сумерках, но не дают возможности различать мелкие детали.

Световая чувствительность глаза. Под чувствительностью приемника подразумевается его свойство реагировать на упавшее на него излучение. Мера этого свойства (т. е. количественное выражение чувствительности) связана с полезной реакцией приемника на поглощенную энергию. В случае глаза – это эффективно поглощенная световая энергия. Абсолютная чувствительность глаза S определяется как

$$S = \frac{1}{P_E}, \tag{1.5}$$

где PE – эффективно поглощенная световая энергия, Вт.

Величина абсолютной чувствительности зависит от многих факторов: индивидуальных свойств зрения, продолжительности световой или темновой адаптации, эмоционального состояния и т. д. Чаще используют относительную чувствительность, которая выражается долей от абсолютной чувствительности. В общем реакции зрительной системы на излучения могут быть разными. Различают несколько типов чувствительности глаза: световую, спектральную (в зависимости от типа адаптации – темновую или световую), спектральную, контрастную, чувствительность к цветовому тону и к насыщенности.

О световой чувствительности можно сказать следующее. Способность глаза реагировать на возможно малый поток излучения называется световой чувствительностью. Она измеряется как величина, обратная пороговой яркости $B_П$. Пороговой называется наименьшая яркость объекта, при которой он может быть обнаружен с достаточной вероятностью на абсолютно черном фоне (обычно это – световое пятно). Вероятность обнаружения зависит от углового размера объекта, т. е. от угла зрения, при котором объект рассматривается. С возрастанием углового размера растет число рецепторов, участвующих в обнаружении, поэтому чувствительность растет. Этот рост продолжается до углового размера 50°, затем чувствительность перестает изменяться. Поэтому

световая чувствительность $S_п$ определяется как величина, обратная пороговой яркости $B_п$ при угле зрения $\alpha \geq 50^0$:

$$S_П = \left(\frac{1}{B_П} \right). \qquad (1.6)$$

Световая чувствительность очень велика. Согласно исследованиям физиолога Н. И. Пинегина, для отдельных наблюдателей минимум энергии, необходимой для появления зрительного эффекта, составляет 3...4 кванта, т. е. в благоприятных условиях наблюдения палочковая световая чувствительность близка к предельной. Практически это можно наблюдать при нахождении человека длительное время в абсолютной темноте, например в глубокой пещере без освещения.

Колбочковая световая чувствительность, обеспечивающая цветовые ощущения, намного ниже палочковой. По Н. И. Пинегину, для возбуждения цветового колбочкового зрения необходимо, чтобы на одну колбочку приходилось около 100 квантов, а количество колбочек в желтом пятне было порядка 50 тыс. на 1 мм^2.

Механизмы зрительного процесса. Адаптация. Инерция. Все виды чувствительностей зрительной системы, которые мы рассматривали, непостоянны. Их уровень и соотношение зависят от ряда факторов, одним из наиболее существенных является уровень освещенности.

В табл. 1.1 приведены примеры условий и уровня освещения, встречающиеся в природе.

Таблица 1.1

Условия освещения	Среднее значение освещенности, лк
Земная поверхность ночью в полнолуние	0,2
То же, в сумерках	1...500
То же, в летний день в тени	6 000...15 000
То же, в летний день на солнце	50 000... 150 000
То же, в летний день, солнце за облаками	5 000...25 000
Тротуар под уличным фонарем	1...6
Пол комнаты, освещаемый лампой накаливания 100 Вт, с расстояния 3 м	20...30
Стол, освещаемый настольной лампой 100 Вт	80... 100

Из приведенных примеров следует, что при достаточно существенном изменении освещенности (примерно в 600 тыс. раз) зрительный аппарат позволяет достаточно хорошо ориентироваться. Такой большой диапазон освещенностей, дающий возможность получить световые ощущения, объясняется способностью глаза приспосабливаться к различным уровням яркостей, настраиваясь на ее средний уровень. Процесс приспособления глаза к изменению условий освещения называется адаптацией (от латинского *adapto* – приспосабливаю).

Один из механизмов адаптации заключается в том, что в зависимости от уровня освещенности чувствительность фоторецепторов глаза изменяется, что позволяет видеть и при ярком свете, и в полутьме. Время адаптации к яркому свету или темноте различно. Например, выйдя из аудитории зимой на яркий свет (более 3000 лк), вы сначала ничего не различаете. Через некоторое время нормальное зрение к вам возвращается. Попав с улицы в плохо освещенное помещение (менее 0,1 лк), вы также теряете ориентировку, а затем привыкаете. В первом случае адаптируются колбочки, во втором – палочки. Колбочковое зрение называется дневным, палочковое – ночным или сумеречным (см. рис. 1.6).

При освещенностях больше 0,1 лк, но меньше 500 лк зрительные процессы неустоявшиеся – работают и палочки, и колбочки. Форма спектральной кривой будет промежуточной в зависимости от соотношения чувствительностей палочек и колбочек.

Приспособление к изменению средней освещенности или яркости называется яркостной адаптацией. Кинетика яркостной адаптации (изменение чувствительности глаза во времени) показана на рис. 1.7. Процесс увеличения чувствительности при переходе от большой яркости к малой называется темновой адаптацией (рис. 1.7, *а*). Приспособление глаза к большой яркости называется световой адаптацией (рис. 1.7, *б*). Судя по графикам, увеличение чувствительности глаза происходит довольно длительное время – для темновой адаптации от 40 до 60 мин. Скорость световой адаптации, т.е. уменьшение чувствительности, происходит значительно быстрее – за 4...8 мин. Причем чем больше яркость, к которой адаптируется глаз, тем выше скорость адаптации.

Адаптация – достаточно сложный процесс, в котором участвует большое число механизмов, включающих всю комплексную работу органа зрения. А. В. Луизов отмечает следующие основные процессы, влияющие на изменение чувствительности органа зрения в целом:

– изменение диаметра зрачка от наименьшего размера 2 мм до наибольшего 8 мм;

– переход от колбочкового зрения к палочковому и наоборот;

– увеличение или уменьшение инерционности рецепторов;

– увеличение или уменьшение в процессе адаптации площади рецептивных полей, что изменяет разрешающую способность глаза и соответственно его чувствительность;

– увеличение или уменьшение чувствительности вследствие изменения доли участия полей сетчатки;

– изменение концентрации фотореагентов (пигментов) в рецепторах.

Зрительный процесс в условиях изменяющейся чувствительности при адаптационных процессах называется неустановившимся. В момент окончания процессов адаптации чувствительность глаза делается постоянной, такой зрительный процесс называется установившимся. В дальнейшем все вопросы, связанные с восприятием светлоты или цветности, относятся только к установившемуся процессу.

Большое влияние на зрительное ощущение оказывает также инерционность этого ощущения. Свойство зрительной системы сохранять состояние покоя или работы в течение некоторого времени после начала или прекращения светового воздействия называется зрительной инерцией.

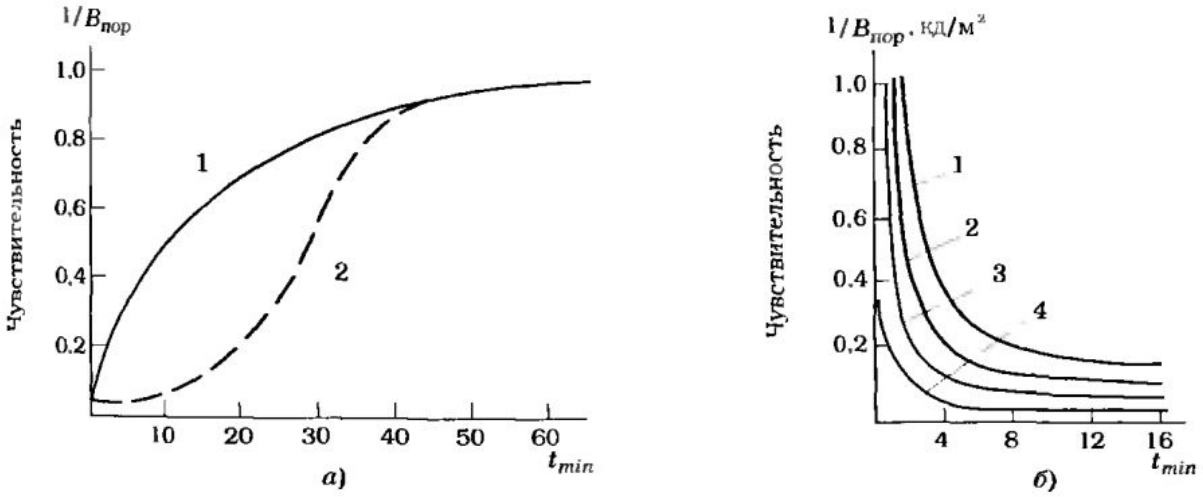


Рис. 1.7. Кинетика яркостной адаптации:
а – темновая адаптация (1 – большая предшествующая яркость, 2 – малая предадаптационная яркость); б – световая адаптация (1...4 – различные по уровню предадаптационные яркости, кд/м^2)

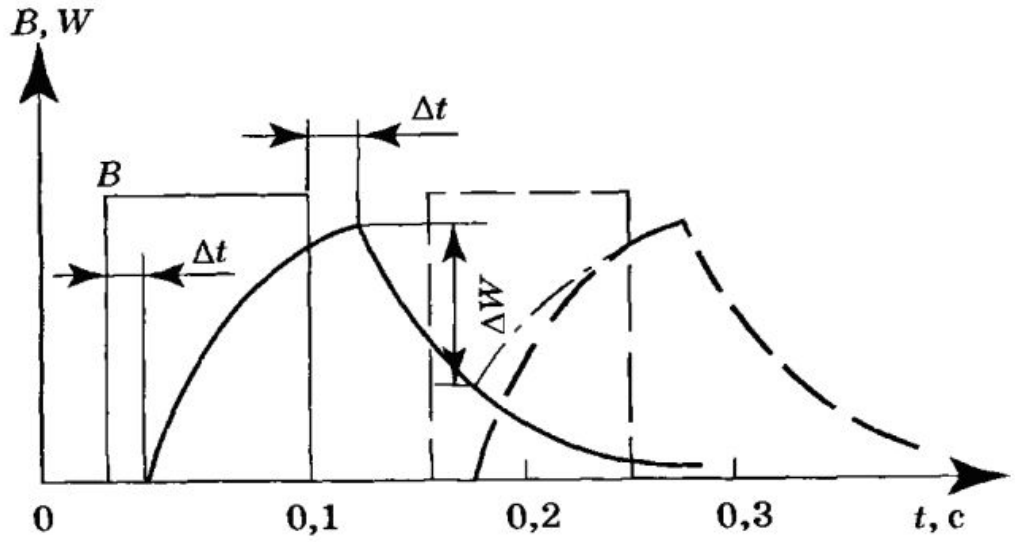


Рис. 1.8. Соотношение яркостного сигнала и светового ошущения:
тонкая линия – яркостной сигнал; жирная линия – световое ощущение; штрихпнуктирная – сумма светлот, возникающих при малых временных промежуточных яркостных сигналов

На рис. 1.8 показано соотношение между постоянными по яркости световым сигналом – стимулом (стимул – излучения различного характера, которые воздействуют на орган зрения и вызывают различные реакции – зрительные ощущения) (тонкая П-образная линия) и вызываемым им световым

ощущением, выражаемым светлотой (жирная пилообразная линия). Как видно из рисунка, ощущение светлоты запаздывает относительно начала сигнала на Δt и на такую же величину смещено начало спада.

Следствием зрительной инерции является слитное восприятие серии световых сигналов при их достаточно большой частоте, что и изображено на рис. 1.8: пунктирной линией показан второй сигнал, последовавший вслед за первым через достаточно малый промежуток времени. Ощущение светлоты возникает не с нулевого значения, а с некой средней величины. Если подобрать частоту мелькания, то можно добиться ощущения непрерывности сигнала. Такая частота называется критической частотой мелькания.

Вследствие инерции зрения зрительный образ сохраняется в сознании некоторое время после того, как прекратилось действие раздражителя (стимула). Этот образ называется последовательным. Его возникновение связано с тем, что продукты фотораспада зрительного пигмента восстанавливаются не сразу после прекращения действия стимула.

На зрительной инерции основаны кинематография, телевидение, действие мониторов компьютера, визуальные измерения в колориметрии и светотехнике. Во всех этих случаях частота мелькания изображения (кадров) равна или превышает критическую частоту мелькания. Последовательные образы каждого из кадров сливаются в единое впечатление живого движения. Зрительная инерция связана с восприятием не только светлоты, но и цвета.+

Психофизика восприятия. Закон Вебера–Фехнера. Психофизика изучает взаимоотношения между физически измеряемыми стимулами и ощущениями, вызываемыми этими стимулами. По отношению ко всем органам чувств стимул есть физическое воздействие на орган чувств, вызывающее реакцию. В нашем случае это световое воздействие, а реакцией является ощущение светлоты.

Таким образом, методами психофизики было установлено соотношение визуального восприятия с измеренными физическими величинами: оптическими плотностями, световыми коэффициентами, яркостями. Психофизическими приемами пользуются для выполнения количественных измерений, связанных с восприятием (в нашем случае зрительным), а восприятие, как известно, – субъективно. Полиграфическая продукция принимается заказчиком не только по физическим параметрам, но и по ощущениям, которые измерить достаточно сложно. Например, как физически определить «красиво – некрасиво», «вы сделали не так, как я хотел». Поэтому задача психофизики – найти критерии и методы физического измерения, не зависящие от индивидуума.

Хотя ученые столетиями экспериментально пытались найти связь ощущений со стимулами, чтобы создать какие-то закономерности, считается, что психофизике как науке примерно 150 лет. Эпохальными считаются работы Э. Г. Вебера, Г. Т. Фехнера и С. С. Стивенса.

В начале XIX в. Э. Г. Вебер исследовал ощущения от приращения массы. Он пытался найти формулу, выражающую ощущение от минимального приращения массы, т. е. тот порог, который позволяет одну массу отличить от

другой. Формула, которую предложил Вебер, в общем, верна для всех ощущений. Если начальную массу обозначить как L, а ее изменение, необходимое для достижения порога, как ΔL, то закон Вебера выглядит как некий постоянный коэффициент $\Psi = \Delta L/L$.

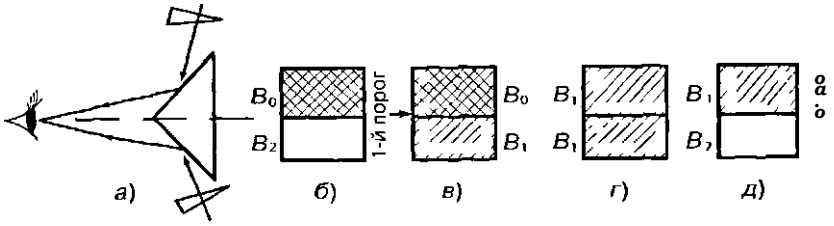


Рис. 1.9. Схема определения числа порогов:
а – установка, состоящая из белой призмы и двух регулируемых клиньями потоков; б – два поля призмы (вид сверху), имеющие разные яркости; в – яркость поля B_2 уменьшена так, чтобы составить один порог с B_0; г – яркость поля B_0 уравнена с полем B_1; д – яркость поля B_1 составляет один порог с полем B_2

Как отмечалось ранее, ощущение светлоты связано с такой физической величиной, как яркость.

Если по аналогии с массой рассматривать два фотометрических поля (рис. 1.9), яркость (В) которых можно регулировать, добиваясь едва заметного различия по светлоте, то можно увидеть, что $\Delta B/B = \Psi$ – величина также постоянная в достаточно большом диапазоне яркостей и зависит только от начальной яркости.

Чуть позже Г. Т. Фехнер предложил другой подход. Во-первых, он повторил опыты Вебера с разными видами восприятия и подтвердил его правоту. Во-вторых, Фехнер предложил считать едва заметное отличие (ЕЗО) единицей восприятия. И главное – пытаться не измерять сами чувства, а сравнивать приращение восприятия с приращением физической величины, вызывающим восприятие. Г. Фехнер попытался получить линейную зависимость между приращениями светлоты и яркости, пользуясь дифференциальными зависимостями. После ряда преобразований это логарифмическое уравнение получило следующий вид:

$$W = klgB + c, \qquad (1.7)$$

где W – светлота, выраженная числом порогов; k и с – коэффициенты линейного уравнения, lg – десятичный логарифм; B – яркость. Это уравнение носит название закона Вебера – Фехнера.

Еще лет 100 различные исследователи, особенно работающие в области зрительного восприятия, находили различные условия несоблюдения этого закона, пока С. С. Стивенс в 1961 г. не предложил заменить логарифмическую зависимость степенной. Формула для светлоты, составленная по этому принципу Г. Вышецким в 1964 г., имеет вид:

$$W = 25\,B^{1/3} - 17. \qquad (1.8)$$

1.6. Виды светочувствительных материалов

Светочувствительные материалы используют для оптической записи изображения. Это изображение может быть конечным продуктом (фотография) или промежуточным. В последнем случае изображение переносится на другой материал и его получение является одной из стадий репродукционного процесса. Пример материала такого рода – копировальный слой, служащий для изготовления печатных форм.

Светочувствительные материалы обычно состоят из тонкой светочувствительной пленки, нанесенной на подложку. Подложка удерживает на себе и светочувствительный слой, и полученное в результате оптической записи изображение.

Как правило, процесс получения изображения на светочувствительном материале содержит две необходимые стадии:

– собственно оптическую запись (экспонирование), в результате которой в материале происходит фотохимическое или фотофизическое превращение в соответствии с получаемым изображением. Эти превращения на глаз могут быть незаметны, поэтому полученное изображение называют скрытым;

– проявление изображения, после которого изображение становится отчетливо видимым;

– далее может следовать завершающая операция (или несколько операций), придающая изображению окончательный вид, т. е. превращающая его в готовый продукт (фотоотпечаток, негатив, копию). К таким операциям относят фиксирование, промывку, термообработку и др. Характер завершающей операции зависит от типа светочувствительного материала и назначения изображения. Она может отсутствовать, если в ней нет необходимости.

По характеру фотопревращений и типу получаемого изображения светочувствительные материалы можно разбить на три группы.

1. Материалы, предназначенные для получения видимого изображения. В них под действием экспонирования и проявления образуются новые химические соединения, имеющие оптическую плотность или цвет, отличный от фона, на который свет не действовал. Получается черно-белое или цветное изображение. Типичными представителями этой группы являются галогенидосеребряные фотографические материалы.

2. Материалы, предназначенные для получения пленочного изображения, в пробелах которого светочувствительный материал вымывается проявителем до подложки. Таковы копировальные слои. Их наносят на соответствующую подложку, например формную основу (материал, из которого изготавливают печатную форму). При экспонировании (записи изображения) оптическое излучение вызывает в копировальном слое химическую реакцию, приводящую к изменению растворимости слоя.

3. Материалы, предназначенные для получения многократного изображения. В них под действием света происходят физические превращения,

имеющие обратимый характер. Это позволяет попеременно записывать и стирать изображение.

1.7. Фотографическое действие оптического излучения

Характер фотопревращений при оптической записи изображения зависит от природы светочувствительного материала. Однако существуют закономерности фотографического действия излучений, общие для всех светочувствительных материалов.

– Прежде всего, у всех светочувствительных материалов полезная реакция, например оптическая плотность изображения, зависит от количества энергии излучения W, упавшего на экспонируемый участок материала площадью Q. Удобнее вместо W и Q использовать поверхностную плотность энергии называемую экспозицией $H=W/Q$. Световую экспозицию H, просто называют «экспозицией» или «количеством освещения». Единица измерения световой экспозиции понятна из формулы $H=E\cdot t$, где E – освещенность в люксах, t – время экспонирования в секундах. Отсюда единица измерения – люкс·секунда (лк·с).

– Полезная реакция, например оптическая плотность изображения, формируется, как правило, в двухступенчатом процессе «экспонирование-проявление», поэтому зависит от проявителя и условий проявления.

– Эффективность экспозиции для данного материала зависит от чувствительности S материала к излучению, называемой интегральной светочувствительностью. Она определяется для всех материалов по формуле $S=k/H_{кр}$, где k – коэффициент пропорциональности; $H_{кр}$ – критериальная экспозиция – экспозиция, необходимая для получения на светочувствительном материале величины полезной реакции, принятой за критерий.

Если экспозиция энергетическая и выражается в Дж/м^2, то S выражается в м^2/Дж.

1.8. Характеристические кривые светочувствительных материалов

Зависимость величины полезной реакции от экспозиции [(от латинского *expositio* – выставление на показ, изложение) в музеях и на выставках – размещение экспонатов в определенной системе (хронологической, типологической и пр.)] называют характеристической кривой. Следует отметить, что полезная реакция оценивается после проявления и что при построении характеристической кривой используют логарифмы экспозиций.

Для определения светочувствительности материала задаются критерием – какой-либо оптической плотностью изображения. Как правило, критерий для каждого рода материалов нормируется или стандартизируется.

Фотоактиничная экспозиция. Так как экспозиция равна произведению $E_э$ на время экспонирования, то формула записывается в виде

$$H_A = t \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_э(\lambda) S(\lambda) d\lambda = t \cdot a,$$

где a – актиничность излучения; λ_1 и λ_2 – длины волны, ограничивающие спектральный диапазон используемого излучения.

Спектральная чувствительность, как и интегральная, определяется по формуле $S_\lambda = 1/H_{э\lambda кр}$. Разница заключается в том, что для интегральной чувствительности используют и энергетическую, и световую экспозицию, а для спектральной – только энергетическую.

Размерность λ – м^2/Дж, а размерность $H_{э\lambda}$ – Дж/м^2, поэтому фотоактиничная экспозиция – величина безразмерная, а актиничность для светочувствительных материалов, равная $a = H_a/t$, имеет размерность с$^{-1}$.

Фотоактиничная экспозиция, требуемая для получения критериальной полезной реакции ($D_{кр}$), принимается за 1,0. Понятно, что для других оптических плотностей, не равных критериальным, она будет отличаться от 1,0.

1.9. Общие сведения

Измерения являются одним из путей, объединяющих теорию с практической деятельностью человека. Основоположник английской метрологии У. Томсон говорил: «Каждая вещь известна лишь в той степени, в которой ее можно измерить». Главная задача метрологии состоит в том, чтобы результаты измерений одинаковых величин, полученные в разных местах и с помощью различных измерительных средств, были бы сопоставимы на уровне требуемой точности.

Рассмотрим методы испытаний, которые применимы к фотоматериалам и имеют метрологическое обеспечение.

Фотографический галогенсеребряный материал обладает двумя важными свойствами: он меняет свою оптическую плотность под действием света и обладает возможностью усиливать этот эффект в миллион раз за счет реакций химико-фотографической обработки. Благодаря уникальности своих свойств фотоматериалы прочно вошли в быт и многие отрасли науки и техники.

Каковы же свойства фотоматериала, и какими методами эти свойства можно определить? Наука, изучающая эти методы, называется фотографической метрологией. Часто используется название «сенситометрия». Основы этой науки заложены в 1890 г. Хертером и Дриффельдом. Они предложили первый прибор для испытания светочувствительности фотоматериала – сенситометр – и научную систему определения светочувствительности.

Наиболее совершенного уровня достигла метрология галогенсеребряных материалов. Объясняется это тем, что до расцвета цифровых методов получения изображений фотоматериалы играли очень важную роль в полиграфии и других отраслях науки и техники. Разработанные метрологической наукой принципы, методы и системы испытаний фотографи-

ческих материалов легли в основу метрологии других светочувствительных материалов и систем. Поэтому изучение метрологии рационально проводить на примере фотографических материалов. Здесь будут рассмотрены основные представления и методы фотографической метрологии, а также стандарты на испытания черно-белых фотографических материалов, используемых в полиграфии.

Фотографическая метрология делится на три раздела: интегральную сенситометрию, спектральную сенситометрию и структурометрию (микросенситометрию).

Интегральная сенситометрия занимается фотографическими свойствами материалов и методами измерения их характеристик, обнаруживаемых при воздействии интегрального (белого) излучения на фотоматериал. В качестве источников излучения используются так называемые сенситометрические источники света с цветовой температурой 3200 и 5500 К. К основным характеристикам, определяемым методом интегральной сенситометрии, относятся сенситометрические параметры, рассчитываемые по характеристической кривой фотоматериала, а именно: градиент (g), коэффициент контрастности (y); светочувствительность (S); широта (L).

Спектральная сенситометрия занимается исследованием спектральных характеристик светочувствительных фотоматериалов. В основном это спектральная чувствительность и спектральный коэффициент контрастности. Для определения этих величин сначала получают монохроматические характеристические кривые, по которым эти характеристики и определяют. Результатом испытания является кривая зависимости спектральной чувствительности от длины волны упавшего излучения. К спектральной сенситометрии также относятся цветовые испытания, которые заключаются в получении характеристических кривых за зональными светофильтрами с дальнейшей интерпретацией результатов испытания.

Структурометрия изучает способность фотоматериала воспроизводить раздельно мелкие детали изображения. Основными структурометрическими характеристиками являются разрешающая способность, зернистость, функция передачи модуляции.

1.10. Строение черно-белого фотографического материала

Светочувствительным галогенсеребряным фотографическим материалом называют такой материал, на котором получают видимое фотографическое изображение. Любой черно-белый фотоматериал содержит ряд тонких полимерных слоев, нанесенных на основу, которая называется подложкой. Подложка определяет род фотографического материала. В зависимости от вида подложки различают фотографические пластинки, фотографическую бумагу или фотографическую пленку.

Общая схема строения черно-белого фотографического материала приведена на рис. 1.10. Защитный слой *1*, представляющий собой пленку

хорошо задубленной желатины, предохраняет эмульсионный слой *2* от механических повреждений, а также препятствует проникновению эмульсии в подложку при поливе на фотографическую бумагу. Эмульсионный слой – это также пленка желатины, в которой диспергированы малые по размерам светочувствительные микрокристаллы галогенида серебра (AgHal; Hal-Br, CI, I). В эмульсионном слое в результате действия света и последующей химической обработки образуется фотографическое изображение.

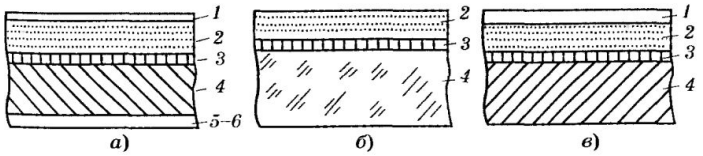


Рис. 1.10. Строение черно-белых фотоматериалов:
а – фотографическая пленка; б – фотографическая пластинка; в – фотографическая бумага;
1 – защитный слой; 2 – эмульсионный слой; 3 – адгезионный подслой;
4 – подложка; 5,6 – противослой и противоориольный слой

Подслой *3* является желатиновой пленкой с включенным в нее дубителем. Он предназначен для того, чтобы эмульсионный слой крепче удерживался на пленке или пластинке, а также препятствует проникновению эмульсии в подложку при поливе.

На прозрачную подложку *4* со стороны, обратной эмульсионному слою, наносят противослой *5*, который препятствует скручиванию фотопленки. Если этот противослой окрашен соответствующими красителями, то он выполняет также функции противоореольного слоя *6*, препятствующего образованию ореолов отражения.

1.11. Фотографическая эмульсия

Светочувствительной субстанцией для регистрации изображения служит фотографическая эмульсия. «Эмульсия» – это историческое название. Оно не совсем правильное, так как дисперсия твердых частиц в жидкой фазе называется суспензией. В общем случае фотографическая эмульсия, нанесенная на покрытую подслоем подложку, представляет собой взвесь микрокристаллов галогенида серебра в полярной полимерной матрице связующего – в желатине. Связующее является не только носителем изображения и защитным коллоидом для сохранения нужной дисперсности зерен галогенида серебра, но и влияет на эффективность всего фотографического процесса.



Рис. 1.11. Типичная форма эмульсионных микрокристаллов

Форма микрокристаллов AgHal довольно разнообразная (рис. 1.11). Это могут быть треугольники, шестиугольники и т. д. Как правило, в желатине они ориентированы плоскостью параллельно основе.

Светочувствительность (S) микрокристаллов галогенида серебра связана с природой галогенида и степенью дисперсности AgHal.

Установлено, что

$$S_{AgBr} > S_{AgCl} > S_{AgI}. \qquad (1.9)$$

Размер микрокристаллов AgHal в поперечнике колеблется от 0,03 до 3 мкм. Размер микрокристаллов влияет на светочувствительность эмульсии. С увеличением размеров повышается светочувствительность фотографической эмульсии.

Изготовление фотографической эмульсии – довольно сложный физико-химический процесс, состоящий из нескольких стадий, приводящих к получению светочувствительной композиции. Для достижения определенных свойств в состав фотографической эмульсии в процессе ее изготовления вводят ряд добавок. Так, в состав фотографической эмульсии вводят: антисептики – вещества, препятствующие порче эмульсии; стабилизаторы, предотвращающие ухудшение фотографических свойств материала; дубители, улучшающие физико-механические свойства эмульсионного слоя; смачиватели, улучшающие равномерность полива. Важной добавкой в составе эмульсионного слоя являются спектральные сенсибилизаторы – органические красители, обеспечивающие расширение зоны спектральной чувствительности фотоматериала. Всего в эмульсии при изготовлении черно-белых фотоматериалов содержится около 40 различных веществ и соединений.

1.12. Образование скрытого изображения

Микрокристаллы AgHal фотографических эмульсий не только сильно различаются по размерам, но имеют также различную форму. Общим для всех них является кубическая решетка ионного типа. Кристалл с идеальной структурой (рис. 1.12) не имеет светочувствительности.

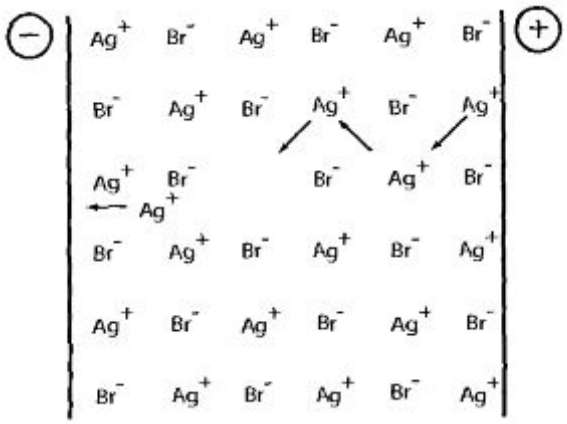


Рис. 1.12. Схема дефекта кристаллической решетки

Светочувствительность микрокристаллам AgHal придают нарушения в периодичности расположения ионов внутри решетки. В этих местах энергия решетки снижена по сравнению с другими участками кристалла. Такие места называют дефектами решетки. Дефектами могут быть трещины, вкрапления Ag или Ag2S (сульфида серебра), дислокации, образующиеся при синтезе эмульсии. Эти дефекты строения решетки являются центрами светочувствительности. Именно благодаря им микрокристалл AgHal становится чувствительным к свету.

Весь процесс образования скрытого изображения можно схематически представить в виде двух стадий. На первой стадии квант света (hν) поглощается ионом галогенида серебра. При этом электрон отрывается от аниона кристаллической решетки галогенида ($Hal + h\nu \rightarrow Hal + \bar{e}$l). Электрон движется внутри кристаллической решетки до тех пор, пока не попадет на центр светочувствительности, который является «ловушкой» электронов. На второй стадии электрон передает центру отрицательный заряд, нейтрализуемый положительно заряженным ионом серебра ($Ag^+ + \bar{e}\,Ag°$). В центре светочувствительности образуется атом серебра, увеличивающий степень несовершенства этого участка кристалла. Поэтому при поглощении кристаллом следующего кванта света вероятность захвата электрона ловушкой возрастает. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не образуется достаточно устойчивый центр скрытого изображения, способный к проявлению. Возбуждающий квант света образует в кристалле AgHal только один электрон, поэтому процесс образования скрытого изображения является многоступенчатым.

Обе описанные выше стадии разделены как по времени, так и в пространстве. Поглощение кванта света *(hν)* может происходить как на поверхности кристалла, так и внутри него. Вторая же стадия проходит в основном на поверхности кристалла в центрах светочувствительности.

Светочувствительные слои на основе AgHal обладают чувствительностью к действию УФ-излучения и коротковолновой части видимой зоны спектра (до

500 нм). В связи с этим эти слои можно использовать лишь для съемки черно-белых объектов.

Для расширения зоны спектральной чувствительности фотографического материала проводят его спектральную сенсибилизацию. Суть этого процесса состоит во введении в фотографическую эмульсию в процессе ее изготовления определенных красителей, которые, адсорбируясь на AgHal, придают материалу дополнительную чувствительность к той области спектра, в которой данное излучение поглощает краситель. Такие красители получили название спектральных (или оптических) сенсибилизаторов, а сам процесс очувствления эмульсии такими красителями – спектральной сенсибилизации.

Спектральная сенсибилизация заключается в следующем. Краситель-сенсибилизатор ($К_с$), адсорбированный на поверхности микрокристалла эмульсии, поглощает квант лучистой энергии и переходит в возбужденное состояние (K_c^*). Энергия возбуждения красителя передается микрокристаллу, где за ее счет происходит фотолиз галогенида серебра (AgHal) с выделением атомарного серебра (Ag°), которое осаждается в центре светочувствительности, превращая его в центр скрытого изображения. Схематически это можно представить в виде двух стадий:

$$K_c + h\nu = K_c^*, \qquad (1.10)$$

$$K_c^* + AgHal = K_c + Ag + Hal. \qquad (1.11)$$

Как видно из схемы, сенсибилизатор по окончании процесса остается в исходном состоянии и снова может участвовать в процессе сенсибилизации. Практически выяснено, что одна молекула сенсибилизатора может участвовать в процессе 40...50 раз за время экспонирования.

В зависимости от строения красителя и его физико-химических свойств он может сенсибилизировать светочувствительный слой к различным участкам спектра.

Фотографические слои на основе AgHal, чувствительные к ультрафиолетовой и синей зонам спектра, называются несенсибилизированными. Фотослои, очувствленные добавочно к зеленой зоне спектра, называются ортохроматическими, а очувствленные ко всей видимой зоне спектра, – панхроматическими (изопанхроматическими).

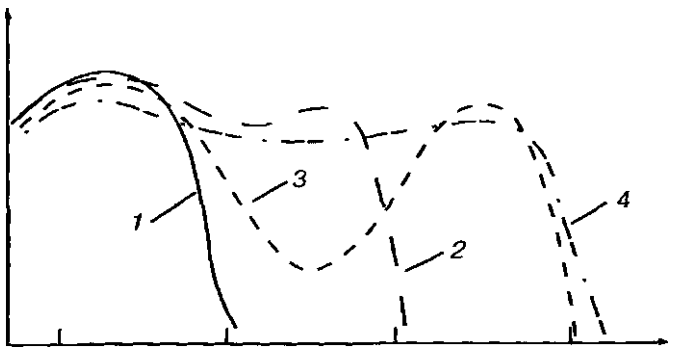




Рис. 1.13. Кривые спектральной чувствительности галогенсеребряных фотоматериалов:
1 – несенсибилизированного; 2 – ортохроматического;
3 – панхроматического; 4 – изопанхроматического

На рис. 1.13 приведены спектральные кривые чувствительности фотоматериалов, отличающихся по сенсибилизации.

1.13. Химико-фотографическая обработка галогенсеребряных материалов

Действие света на фотографический материал приводит к образованию в нем скрытого изображения, не видимого для глаза. Визуализация скрытого изображения происходит в результате химико-фотографической обработки светочувствительных материалов на основе галогенида серебра. К основным процессам химико-фотографической обработки относят проявление и фиксирование проявленного изображения.

Проявление – это процесс избирательного восстановления экспонированных микрокристаллов AgHal в эмульсионном слое фотоматериала, приводящий к превращению скрытого изображения в видимое. Процесс проявления представляет собой восстановление ионов серебра (Ag+) до атомарного (Ag°). Восстановление серебра в центрах скрытого изображения может осуществляться двумя способами.

В первом способе используется раствор, содержащий ионы серебра или имеющий в своем составе ионы галогенида серебра. Такое проявление называется *физическим*. В его основе лежат реакции, заключающиеся в восстановлении Ag° из Ag^+. Образовавшиеся атомы серебра (Ag°) осаждаются из раствора на центрах скрытого изображения и делают его видимым.

При втором способе восстановление ионов серебра происходит непосредственно из микрокристаллов *AgHal*, подвергшихся воздействию света. Такое проявление называется *химическим*. В полиграфии оно является главным. Реакцию процесса проявления в общем виде можно представить следующим образом:

$$nAgHal + mHRed \rightarrow nAg° + mOx + nHal- + mH^+, \qquad (1.12)$$

где *Hal – Cl*, *Br*, *I*; *Red* – проявляющее вещество; *Ox* – окисленная форма проявляющего вещества.

Однако не любой восстановитель может быть проявляющим веществом. Основное требование к этим веществам следующее: они должны восстанавливать серебро экспонированных микрокристаллов *AgHal* со значительно большей скоростью, чем недоэкспонированных. Такое проявление и называется *избирательным*. Избирательность заключается в способности

восстанавливать проявляющим веществом только те микрокристаллы, на которых имеется центр скрытого изображения.

Применяемые на практике проявители представляют собой водные растворы, состоящие из проявляющих, ускоряющих, консервирующих и противовуалирующих веществ.

Проявляющие вещества – химические соединения, легко отдающие электрон и избирательно восстанавливающие ионы серебра до металлического:

$$AgHal + \bar{e} \rightarrow Ag° + Hal^{-}. \qquad (1.13)$$

В качестве проявляющих веществ чаще всего используют органические соединения ароматического ряда, содержащие не менее двух активных окси- или аминогрупп, или их сочетание: метол, гидрохинон, парааминофенол и др.

Ускоряющие вещества – вещества, убыстряющие процесс проявления. В качестве таких веществ используются щелочи (NaOH, KOH), а также соли слабых и сильных оснований (Na_2C0_3, K_2C0_3), создающие щелочную реакцию в результате их гидролиза. Выбор конкретного ускоряющего вещества зависит от типа проявителя.

Консервирующее вещество — соединение, предохраняющее проявитель от быстрого окисления воздухом. Обычно в качестве консервирующего вещества в состав проявителя вводят сульфит натрия (Na_2S0_3). Ввод этого вещества связан с тем, что все органические проявляющие вещества являются сильными восстановителями и легко окисляются не только в процессе проявления, но и кислородом воздуха.

Противовуалирующие вещества. Несмотря на высокую избирательность проявляющих веществ, в процессе химико-фотографической обработки фотоматериала на участках, не подвергшихся воздействию света, может образовываться равномерное почернение – вуаль. Ее образование связано с тем, что в процессе изготовления эмульсии или хранения фотоматериала центр светочувствительности может увеличиться до критических размеров и превратиться в центр вуали. Центр вуали способен к самостоятельному проявлению, т. е. может восстанавливать микрокристаллы AgHal без действия света.

Вуаль отрицательно сказывается на фотографических и структурометрических свойствах изображения. Для торможения ее роста в проявитель вводят противовуалирующее вещество: бромистый калий (КВг) или органическое вещество, например бензотриазол.

Для получения высококачественного и устойчивого фотографического изображения, не изменяющегося при хранении, проявленный фотоматериал после проявления промывают и подвергают фиксированию. Фиксирование представляет собой процесс растворения оставшегося в фотоматериале не восстановленного при проявлении галогенида серебра и последующее удаление образовавшихся растворимых комплексных солей серебра путем промывки. Наиболее часто для фиксирования используют раствор серноватистокислого натрия (тиосульфата натрия) – $Na_2S_20_3$. Растворяющее действие тиосульфата

натрия заключается в понижении концентрации ионов серебра в растворе путем связывания их в комплексный ион.

Реакция фиксирования протекает, как правило, в две стадии. На первой стадии образуется плохо растворимая комплексная соль $Na[Ag(S_20_3)]$, и лишь затем – хорошо растворимая комплексная соль $Na_3[Ag(S_20_3)]$:

$$AgBr + Na_2S_20_3 \rightarrow NaBr + Na[Ag(S_20_3)],$$
$$Na[Ag(S_20_3)l + Na_2S_20_3 \rightarrow Na_3[Ag(S_20_3)] \quad (1.14)$$

или суммарно

$$AgBr + 2Na_2S_20_3 \rightarrow NaBr + Na_3[Ag(S_20_3)].$$

В целом процесс фиксирования позволяет выполнить следующие задачи:

а) остановить процесс проявления, поэтому в отличие от проявителей фиксажи в полиграфии обычно кислые (pH= 4,7 – 6);

б) сделать прозрачным не участвовавший в проявлении галогенид серебра – перевести его в комплексное соединение;

в) легко удалить прозрачное комплексное соединение из слоя.

Помимо проявления и фиксирования важной стадией является промывка и условия, в которых она проводится. Например, следует хорошо промыть в проточной воде фотоматериал после фиксирования для предотвращения появления бурых пятен при длительном хранении фотоизображения.

Контрольные вопросы

1. Какие типы фотоприемников вы знаете? В чем суть их взаимодействия с излучением?
2. Что такое светочувствительность?
3. Что такое спектральная светочувствительность?
4. Какие виды эффективных потоков вы знаете?
5. Расскажите о строении глаза.
6. Какие виды зрительной адаптации вы знаете?
7. Что такое «психофизика»?
8. Напишите формулу, выражающую закон Вебера–Фехнера
9. Какие типы светочувствительных материалов вы знаете?
10. Экспозиция или количество освещения.
11. Характеристические кривые светочувствительных материалов.
12. Фотоактиничная экспозиция.
13. Каково строение черно-белых галогенсеребряных материалов?
14. Что такое спектральная сенсибилизация?
15. Как происходит образование скрытого фотографического изображения?
16. Что такое проявление, фиксирование, кинетика проявления?

2. ЗРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР (ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ)

Широкое внедрение цвета в различные отрасли техники (кино, телевидение, полиграфия и др.) и необходимость технического контроля качества воспроизведения цвета заставляют светотехников сосредоточить внимание на изучении основ физиологической оптики (в частности, зрительный анализатор).

Источником знаний об окружающем нас мире являются те ощущения, которые возникают в результате воздействия материи внешнего мира на наши органы чувств.

Передовая физиологическая школа русских ученых И. М. Сеченова (1829–1905) и И. П. Павлова (1849–1936), создавшая материалистическую рефлекторную теорию ощущения, утверждают, что ощущения отражают объективно существующий мир.

Наиболее распространенной является классификация по содержанию ощущений: зрительные, слуховые, вкусовые, обонятельные, осязательные, температурные, а также ощущения, возникающие в результате процессов внутри организма (голод, жажда и др.).

Специализированные органы чувств, возникшие в процессе эволюционного совершенствования их формы и свойств специализированных чувствительных клеток организма, называемых *рецепторами*, обладают очень высокой чувствительностью. Так, например, орган зрения в наиболее благоприятных условиях способен реагировать на несколько десятков фотонов видимого излучения, упавшего на зрачок глаза, что соответствует возможности увидеть в ночное время источник с силой света в одну свечу на расстоянии 10–12 км.

Сложный специализированный орган чувств обладает способностью не только оценивать количественный уровень сигналов, поступающих извне, но также судить о качестве этих сигналов. Так, например, орган зрения позволяет судить не только об уровне зрительного ощущения – *светлоте*, но также обеспечивает возможность дифференцировать цветовые оттенки излучения, определяемые их спектральным составом.

Сигналы, воспринимаемые органами чувств извне, принято называть *раздражителями*, а их воздействие – *раздражениями*. Раздражение любого органа чувств вызывается внешним по отношению к рецептору воздействием движущейся материи, например световым излучением, вызывающим раздражение органа зрения.

Для обеспечения качественной оценки поступающих извне раздражителей орган чувств должен обладать способностью качественного анализа рецептора. Способность органов чувств анализировать поступающие извне раздражения позволила И. П. Павлову присвоить им название *анализаторов*. Анализатором является такой орган, в котором энергия раздражителя трансформируется в энергию биологических процессов высшей нервной деятельности, определяющих возникновение ощущения. Необходимо не только анализировать сигналы, поступающие от рецепторов в центральное

звено анализатора, но также и синтезировать эти сигналы, в ощущения, а отдельные ощущения в восприятие. Таким образом, деятельность каждого анализатора, в том числе и зрительного, представляет собой единство анализа и синтеза поступающих извне раздражений.

Зрительный, так же как и любой, анализатор состоит из трех звеньев: периферического, проводникового и центрального. Периферическим звеном зрительного анализатора является глаз, представляющий совокупность оптической и световоспринимающей систем. Оптическая система глаза состоит из оптики, предназначенной для создания изображения внешнего пространства на сетчатой оболочке, а также из мышц, управляющих движением глаза, фокусировкой изображения и регулированием его яркости. Световоспринимающей системой глаза является его сетчатая оболочка, заполненная светочувствительными клетками – *зрительными рецепторами*. Проводниковым звеном служит зрительный нерв, соединяющий отдельными волокнами рецепторы с клетками затылочной части коры головного мозга, являющейся центральным звеном зрительного анализатора.

Световая чувствительность изменяется при сильном раздражении слухового или обонятельного анализатора. Это взаимодействие, подтверждающее целостность живого организма и взаимосвязь его частей, следует объяснять наличием центральных индуктивных связей, существующих между всеми анализаторами. Это заставило внести понятие об *адекватном раздражении*, являющемся таким сигналом внешнего мира, на который специализирован исследуемый орган чувств. Так, например, видимое излучение есть адекватное раздражение для зрительного анализатора.

Увеличение преломляющей силы оптики глаза для обеспечения четкого изображения на сетчатой оболочке близко расположенных предметов принято назвать *аккомодацией*. Вследствие того, что расстояния между главными, а также узловыми точками сложной систем глаза очень невелики, при расчетах изображения принято схематизировать оптику глаза, заменяя ее одной преломляющей поверхностью, разделяющей внешнее пространство от стекловидного тела. Такой глаз названный *редуцированным*, имеет одну узловую точку, расположенную 7 мм сзади от роговицы, и одну главную, расположенную примерно в середине передней камеры глаза на расстоянии 2 мм от внутренней поверхности роговой оболочки.

Границы аккомодации глаза определяются ближней и дальней точками ясного видения. *Ближняя точка ясного видения* характеризуется наименьшим расстоянием от глаза наблюдателя до предмета, отчетливо различаемого при максимальной аккомодации. *Дальняя точка ясного видения* характеризуется расстоянием от глаза до наблюдаемого предмета, отчетливо при полном покое аккомодационной мышцы. Расстояние между ближней и дальней точками ясного видения, выраженное для глаза в единицах оптической силы, принять называть *глубиной (длиной) аккомодации*:

$$A = \frac{1}{l_б} - \frac{1}{l_д},$$

где А – глубина аккомодации глаза, *дптр*; $l_б$ – расстояние ближной точки от глаза, *м*; $l_д$ – расстояние дальней точки от глаза, *м*.

Для глаза с нормальной рефракцией – дальная точка ясного видения расположена в бесконечности $l_д = \infty$, следовательно, глубина аккомодации определяется: $A = \frac{1}{l_б}$.

Длительная аккомодация на ближнюю точку приводит к утомлению. Без излишнего утомления нормальный глаз может наблюдать предметы, находящиеся на расстоянии 0,25–0,3 м. Это расстояние принято называть оптимальным расстоянием.

Наибольший интерес представляют движения, обеспечивающие сведение и разведение осей двух глаз, называемые конвергенцией и дивергенцией. Конвергенция и дивергенция необходимы для обеспечения согласованной работы правого и левого глаз при наблюдении предметов, удаленных на различные расстояния.

При бинокулярном наблюдении соответствие состояний аккомодации и конвергенции, называемое *мышечным балансом глаза*, обязательно, так как нарушение баланса вызывает двоение зрительного ощущения. Изучение динамики мышечного баланса глаза, позволяет контролировать утомление организма, возникающее в результате напряженной зрительной работы.

Для предотвращения чрезмерного раздражения сетчатой оболочки по мере увеличения яркости поля зрения происходит уменьшение диаметра глазного зрачка. Эту реакцию, протекающую без участия воли человека, принято называть *зрачковым рефлексом*.

Имея выражение эффективных значений площади зрачка, можно определить эффективное значение освещенности на сетчатой оболочке как произведение яркости на эффективное значение площади зрачка. Это произведение Ле Гран рекомендует назвать *световым уровнем* (*niveau lumineux*): $\varepsilon_{с.э.} = Bq_э$.

Оптические дефекты глаза. В результате неодинакового преломления параллельных лучей, падающих на центральную и периферическую зоны линзы, они фокусируются не в одной точке. Это явление носит название *сферической абберации*. При отклонении преломляющих поверхностей от сферического профиля, а также при комбинации нескольких линз с радиусами кривизны и различными показателями преломления возможно возникновение *отрицательной сферической абберации* (сферической абберации «против правила»), когда центральные лучи пересекаются в более близкой точке. Продольное сечение пучка параллельных лучей после его преломления носит название *каустики* оптической системы.

Мерой сферической абберации может служить также наибольшая разность расстояний по оптической оси между фокусами отдельных зон оптики. Это расстояние между наиболее удаленными друг от друга фокусами, называемое *продольной абберацией*, принято измерять оптической силой линзы, обеспечивающей коррекцию наблюдаемого расхождения фокусных расстояний.

Второй причиной несовершенства оптического изображений на сетчатой оболочке глаза является *хроматическая абберация*, определяемая дисперсией света в глазных средах.

Третьей причиной недостаточного оптического изображения является *дифракция на зрачке*.

Слой пигментного эпителя содержит в себе темный пигмент – фусцин, перемещающийся по направлению к светочувствительным клеткам по мере увеличения освещенности сетчатки в зоне изображения. Фусцин, заполняя пространство между светочувствительными клетками, поглощает часть потока, падающего на сетчатку, и этим предохраняет палочки и колбочки от чрезмерного возбуждения излучением большой яркости.

Участки сетчатки, обслуживаемые одним волокном зрительного нерва, в общем случае содержащие несколько светочувствительных клеток, принято называть *рецепторным полем*. Размеры рецепторных полей минимальны в центральной части сетчатой оболочки и растут к ее периферии.

Пространство, в пределах которого наблюдатель может видеть при фиксированной оси зрения, принято называть *полем зрения*.

Явления зрительного преувеличения размеров ярких предметов на темном фоне и преуменьшения размеров темных предметов на светлом фоне принято называть *иррадиацией*.

Биотоки. Возникновение электрических процессов в живых тканях было первые обнаружено итальянским ученым Л. Гальвани (1737–1798), изучавшим электрические явления в организме животных. Опыты Гальвани показали наличие в живых тканях разности потенциалов, определяющей реакцию мышечных и нервных волокон.

Работами русского физиолога В. Ю. Чаговца (1873–1941), американского физиолога Д. Лёбба (1864–1924) и немецкого физика В. Нернста (1864–1941) было установлено, что причиной возникновения биоэлектрических потенциалов является концентрация ионов, обусловленная процессами обмена веществ в живом организме. Ионная теория возбуждения получила свое завершение в работах академика П. П. Лазерова (1878–1942), впервые применившего ее к анализу процессов, протекающих в органах чувств, в частности к анализу зрительных процессов.

Величина, обратная пороговому значению тока, при котором наблюдатель впервые (с определенной вероятностью) обнаружит вспышку, называемую *электрическим фосфеном*, определяет *электрическую чувствительность зрительного анализатора*. Исследование электрического фосфена в условиях темновой и световой адаптации показывает снижение электрической чувствительности в темноте и повышение на свету.

Контрольные вопросы

1. Аккомодация
2. Редуцированный глаз
3. Ближняя точка ясного видения

4. Дальняя точка ясного видения
5. Глубина (длина) аккомодации
6. Оптимальное расстояние
7. Конвергенция
8. Дивергенция
9. Мышечный баланс
10. Зрачковый рефлекс
11. Световой уровень
12. Абберация (сферическая, продольная и хроматическая)
13. Каустики
14. Фусцин
15. Рецепторное поле
16. Поле зрения
17. Иррадиация
18. Биотоки
19. Электрический фосфен

3. УСТАНОВИВШИЕСЯ И НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ЗРИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

3.1. Характеристики зрительного процесса

Чувствительность зрительного анализатора. Зрительные ощущения, возникающие у человека в результате действия видимого излучения на его зрительный анализатор, позволяют судить о яркости и цветности излучения, о форме тел, излучающих и отражающих свет, об их движении и взаимном расположении. Большое количество функций зрительного анализатора заставляет подходить в оценке его работы с различных точек зрения. Для суждения о способности человека видеть излучения различного спектрального состава необходимо оценить чувствительность зрительного анализатора к однородным излучениям различных длин волн. Как известно, спектральная чувствительность любого приемника, в том числе и такого сложного, как зрительный анализатор человека, определяется отношением однородных потоков: эффективного и лучистого. Величина этого отношения зависит от выбора единиц эффективного потока. Принимая в соответствии с ГОСТ 7932-56 в качестве единицы светового потока люмен (лм), получим спектральную чувствительность для однородного излучения с длиной волны λ=0,555 мк, равную 683 лм·вт$^{-1}$. Это условное значение спектральной чувствительности зрительного анализатора является максимальным потому, что участок спектра равноинтенсивного излучения в зоне длины волны λ=0,555 мк имеет максимальную светлоту.

Вследствие условности численного значения $g_{\lambda=0,555}$ наибольший интерес представляет относительная спектральная чувствительность зрительного анализатора, определяемая отношением лучистых яркостей двух однородных излучений, обеспечивающих одинаковую светлоту:

$$K(\lambda) = \frac{B_{\lambda=0,555}}{B_{\lambda}}. \qquad (3.1)$$

Это условие, определяемое (3.1), положено в основу всех методов измерения спектральной чувствительности зрительного анализатора.

Пороговой яркостью (световым порогом) принято считать минимальную яркость светового пятна, обеспечивающую возможность впервые обнаружить с достаточной вероятностью это пятно на фоне с яркостью практически равной нулю. Измерение абсолютной световой чувствительности зрительного анализатора сводится к измерению пороговой яркости пятна с угловым размером $\alpha \geq 50^0$, называемой *абсолютным световым порогом*. Световой порог точечных излучателей с угловым размером $\alpha \leq 15'$ принято характеризовать *пороговой освещенностью зрачка* наблюдателя, создаваемой точечным источником света, впервые обнаруживаем с достаточной вероятностью на фоне

с яркостью, близкой к нулю. Пороговую освещенность зрачка наблюдателя принято называть *пороговым блеском* точечного источника света.

Для характеристики способности зрительного анализатора различать два участка поля зрения по яркости вводят понятие о *пороговой разности яркости*, определяемой минимальной разностью яркости двух смежных участков поля зрения наблюдателя, обеспечивающей в условиях оптического контакта обнаружение неравенства яркостей с достаточной (заданной) вероятностью. Отношение пороговой разности яркости к яркости фона называют *пороговым контрастом яркости* объекта наблюдения с фоном.

Величину, обратную минимальному пороговому контрасту яркости, численно равному пороговому контрасту пятна с угловым размером 50^0, принято называть *контрастной чувствительностью*. Контрастная чувствительность, характеризующая способность зрительного анализатора обнаруживать малые различия яркости, определяется

$$S_к = \frac{1}{\xi},$$

где ξ – минимальный для заданной яркости пороговый контраст.

Способность зрительного анализатора различать форму предмета или его деталей, называемая *остротой различения*.

Способность зрительного опознавания цветности в пороговых условиях принято характеризовать *порогом цветоощущения*.

Способность зрительного различения цветовых оттенков двух смежных участков поля зрения характеризуется *цветоразличительной чувствительностью* зрительного анализатора, определяемой величиной, обратной *порогу цветоразличения* (*цветовому порогу*).

Для характеристики точности зрительного обнаружения равноудаленности двух предметов, наблюдаемых бинокулярно, пользуются понятием *порога глубинного (стереоскопического) зрения*.

Для оценки скорости реакции зрительного анализатора вводят понятие о *быстроте различения*, определяемой величиной, обратной минимальному времени различения формы предмета или его деталей.

Все перечисленные характеристики предназначены для оценки основных функций деятельности зрительного анализатора, вследствие чего их часто называют *основные функциями зрения*.

Конечная длительность элементарных актов преобразования излучения в ощущение определяет *инерционность зрительного анализатора*. Длительность промежутка времени от начала действия излучения до момента возникновения зрительного ощущения – *латентный период* – зависит от уровня возбуждения зрительного анализатора, следовательно, от яркости действующего на глаз излучения.

Изменение чувствительности периферии и центра зрительного анализатора в процессе перехода от одного уровня его возбуждения на другой принято называть *адаптацией*.

Стабильное соотношение между уровнями возбуждения и ощущения, определяемое однозначным соответствием яркости B_a и вызываемой ею светлоты S_a, устанавливается лишь после стабилизации зрительного процесса. Из этого следует, что *установившийся зрительный процесс*, характеризуемый соответствием яркости адаптации B_a и вызываемого ею ощущения светлоты S_a определяется полным завершением всех трех разновидностей переходных процессов.

Методы измерения зрительных порогов. Дискретная вариация измеряемого параметра допустима лишь при применении *статистических методов определения* порога. Кроме статистических методов измерения зрительных порогов, определяющих вероятность обнаружения или различения *тест-объектов*, существует группа методов непосредственного измерения.

Вероятностью зрительного обнаружения или различения принято считать числовую характеристику, определяющую степень возможности обнаружить предъявляемый наблюдателю тест-объект или различить его форму. Вероятность p равна отношению n – числа случаев обнаружения или различения объекта к общему N – числу попыток различить или обнаружить предъявляемый наблюдателю объект: $p = \frac{n}{N}$.

3.2. Спектральная чувствительность

Измерение спектральной чувствительности зрительного анализатора. В соответствии с (5.1) спектральная чувствительность определяется сравнением светлоты. Измерение спектральной чувствительности колбочкового аппарата (дневное зрение) должно проводиться в условиях достаточно высокой яркости адаптации наблюдения В≥10 *н*т и размера поле зрения, не превышающего 2^0.

Спектральная чувствительность палочкового аппарата (ночное зрение) следует измерять в условиях темновой адаптации В≤10 нт и большого размера поля зрения $\alpha=30^0$, или периферического расположения тест-объекта. Непосредственное сравнение значение светлоты двух смежных участков поля зрения наблюдателя (полей сравнения) возможно производить следующими тремя способами:

а) *Способом постоянного поля сравнения*, осуществляемым в условиях постоянства яркости и спектрального состава одного из двух полей сравнения;

б) *Способом малых ступеней*, при котором длины волн сравниваемых однородных излучений подбираются достаточно близкими друг к другу;

в) *Способом мелькания*, при котором наблюдатель видит поочередно два сравниваемых по светлоте поля сравнения.

Кроме метода непосредственного сравнения светлоты двух излучений, для измерения спектральной чувствительности возможно применение косвенных методов. К числу таких косвенных методов измерения спектральной чувствительности относится:

а) метод светового порога:

б) метод зрительных функций.

Колбочковая и палочковая спектральная чувствительность. Относительные значения колбочковой спектральной чувствительности, называемые *относительной видностью однородного излучения*, были приняты Международной комиссией по освещению (МКО) в 1924 г.

Спектральная чувствительность зрительного анализатора в условиях совместной работы палочкового и колбочкового световоспринимающих аппаратов (0,01 нт≤ В≤10 нт) определяется совокупностью чувствительностей каждого аппарата, следовательно, зависит от доли участия в зрительном процессе палочек и колбочек.

3.3. Абсолютная световая чувствительность

Световая чувствительность зрительного анализатора зависит от уровня его возбуждения. Максимальной световой чувствительностью, называемой *абсолютной*, обладает зрительный анализатор после длительного пребывания в темноте. Во время пребывания на свету чувствительность уменьшается, главным образом в результате снижения концентрации молекул фотореагентов в светочувствительных клетках сетчатки, уменьшения зрачка глаза, увеличения поглощения фотонов молекулами фусцина, содержащегося в клетках пигментного эпителия, и связанного с этим снижения квантового выхода первой фазы зрительного процесса.

Измерение пороговой яркости. Пороговую яркость можно измерить с помощью *адаптометра* – прибора позволяющего в широких пределах варьировать яркость и угловой размер светового пятна.

Определение световой чувствительности осуществляется, как правило, непосредственным измерением порога на появление. Наблюдатель, плавно вращая верньер диафрагмы, подает сигнал в момент обнаружения на периферии поле зрения впервые заметного светового пятна неопределенной формы. Возможно также измерение пороговой яркости на исчезновение. Порог на исчезновение обычно несколько ниже порога на появление. При статистическом методе измерение пороговой яркости наблюдателю многократно показывают пятна с яркостью, большей или меньшей предлагаемого порога. Наблюдатель должен лишь отвечать, видит ли он светлое пятно или не видит.

3.4. Контрастная чувствительность

Отношение разности яркости пятна (объекта) и фона к яркости фона принято называть *яркостным контрастом*:

$$k = \frac{B_0 - B_\phi}{B} = \frac{\Delta B}{B_\phi}, \qquad (3.2)$$

где B_0 и B_ϕ – яркости объекта и фона; ΔB – разность яркости объекта и фона.

Из (4.2) следует, что положительным контрастом обладают объекты светлее фона, а отрицательным – темнее фона. Условия обнаружения объекта, одноцветного с фоном, можно записать следующим неравенствами:

$$\Delta B \geq \Delta B_{\text{пор}} \text{ или } k_{\text{пор}},$$

где $\Delta B_{\text{пор}}$ и $k_{\text{пор}}$ – пороговые значения разности яркости и яркостного контраста.

Методика измерения $\Delta B_{\text{пор}}$. Во избежание больших ошибок измерение величины ΔB осуществляется косвенными методами. Измерению подлежит некоторая величина, чаще всего механическая, однозначно определяющая переменную яркость одного из полей сравнения (тест-объект).

Поляризационный способ изменения яркости тест-объекта основан на оптическом совмещении его с фоном при наблюдении через двухпреломляющую призму и поляроид.

Изменение контраста тест-объекта с фоном методом регулирования средней яркости тест-объекта обычно осуществляется с помощью вращающегося диска, в плоскости которого имеется сектор с коэффициентом отражения, иным, чем у диска.

В *методе пороговых приращений* реакцию любого приемника излучения, неподдающуюся прямому измерению, принято оценивать числом пороговых приращений измеряемой эффективной величины от нуля до заданного ее значения. Согласно этому методу светлота определяется эффективной яркостью. Имеется метод Р. Гопкинсона, основанный на непосредственном сопоставлении светлот двух разноярких излучений.

3.5. Различимость формы и расстояния

Острота различения и ее измерение. При зрительном опознавании предмета наблюдатель не только выделяет предмет относительно фона, но также различает его форму. Определение формы объекта связано с различением его деталей. Способность зрительного анализатора различать мелкие детали характеризуется разрешаемым углом и величиной, обратной этому углу, – *остротой различения*. Наибольшей остротой различения зрительный анализатор обладает в центральной ямке сетчатки.

Бинокулярное зрение, иначе называемое *стереоскопическим зрением*, позволяет судить не только о контуре наблюдаемого предмета, но и о его рельефе, что обеспечивает более полное его восприятие. Способность различить форму предмета не только по контурам, но также и по рельефу его деталей является характерным свойством стереоскопического зрения. Стереоскопическое зрение позволяет производить оценку расстояний и размеров объектов наблюдения, следовательно, оно трехмерно.

3.6. Цветовая чувствительность

В соответствии с трехкомпонентной теорией цветового зрения колбочки световоспринимающего аппарата зрительного анализатора бывают трех разновидностей: красноощущающие (к-рецепторы), зеленоощущающие (з-рецепторы) и синеощущающие (с-рецепторы).

Ощущения, возникающие в результате различия соотношения частот импульсов в *кзс*-волокнах зрительного нерва, будем называть *ощущениями цветности*. Количественный уровень зрительного ощущения – светлота, однозначно определяемый в условиях дневного зрения яркостью зрительно оцениваемого излучения, характеризуется суммарной частотой токов действия всех трех *кзс*-рецепторов. Комплекс зрительного ощущения, определяемый общим уровнем возбуждения зрительного анализатора и соотношением уровней возбуждения трех его *кзс*-рецепторов, принято называть *ощущением цвета*. Ощущение цвета возможно условно делить на две составляющие: количественную – светлоту и качественную – ощущение цветности. Количественную характеристику излучения, определяемую различием соотношения уровней реакции трех приемников среднего глаза, возникающим в результате различия спектрального состава, принять называть *цветностью*.

Деление на качественную и количественную составляющие ощущения цвета лежат в основе современной *колориметрии* – науки о количественных выражениях цветов и их измерении.

3.7. Зрительная адаптация

Адаптационный процесс. Зависимость световой чувствительности от уровня возбуждения зрительного анализатора вызывает возникновение переходных адаптационных процессов при изменении уровня его возбуждения или соотношения уровней возбуждения его *кзс*-рецепторов.

Зрительная адаптация принято называть приспособление организма человека к различным уровням яркости и к различной цветности поля зрения.

Понятие зрительной адаптации часто относят к заключительной фазе адаптационного процесса, говоря о состоянии зрительного анализатора в условиях установившегося соответствия между светлотой и яркостью, а также между ощущением цветности и ее колориметрическим значением. В этом понимании адаптации принято говорить о *яркости адаптации,* которой соответствует вполне определенное установившееся значение светлоты, а также о *цветности адаптации,* однозначно определяющей установившиеся значения ощущения цветности поля зрения. Рассматривая адаптацию как процесс, вызванный изменением яркости или цветности поля зрения наблюдателя, принято его характеризовать функцией изменения во времени количественного критерия ощущения, определяемого чувствительностью зрительного анализатора, или качественного критерия ощущения, определяемого его цветовой насыщенностью или тональностью.

В зависимости от характеристики изменения условий возбуждения зрительного анализатора его адаптация может быть яркостной или цветовой.

Яркостная адаптация возникает в результате быстрого изменения яркости поля зрения, следовательно, и освещенности сетчатки в зоне изображения. Частными случаями яркостной адаптации являются:

а) *темновая адаптация,* возникающая при мгновенном уменьшении яркости поля зрения некоторого значения $B_{\text{п.а.}}$ называемого я*ркостью предадаптации,* до нулевого значения яркости адаптации $B_{\text{а}} = 0$.

б) *световая адаптация* – при увеличении яркости от $B_{\text{п.а.}} = 0$ до некоторого конечного значения $B_{\text{а}}$.

Цветовая адаптация возникает в результате изменения цветности поля зрения при неизменной его яркости. В то время как яркостная адаптация характеризуется несоответствием светлоты и яркости, для цветовой адаптации характерно несоответствие между ощущением цветности и ее колориметрическим значением. Цветовая адаптация к насыщенным цветам любого цветового тона после предадаптации к белому приводит к постепенному снижению цветовой насыщенности ощущения.

Темновая адаптация является процессом, возникающим в результате изменения чувствительности как периферического, так и центрального звеньев зрительного анализатора. Завершение процесса темновой адаптации, соответствующие практическому установлению абсолютной световой чувствительности зрительного анализатора, измеряется 1,5–2 *ч*.

Световая адаптация характеризуется изменением световой чувствительности зрительного анализатора в процессе его приспособления к заданной яркости $B_{\text{а}}$ после длительного пребывания в темноте. В противоположность темновой адаптации световая характеризуется понижением световой чувствительности в результате снижения концентрации молекул фотореагентов, уменьшения диаметра зрачка и увеличением доли поглощенного излучения молекулами фусцина.

3.8. Зрительная инерция

Инерционность зрительного анализатора. Инерцией любой системы принято считать свойство сохранять то состояние, в котором она находится, следовательно, свойство реагировать на изменения внешней среды с некоторым опозданием. В соответствии с этим *зрительная инерция* определяется реакцией зрительного анализатора не только на излучения, действующие в исследуемый момент времени, но и на предшествующие. Зрительная инерция в отличие от адаптации определяется постепенным ростом светлоты излучения постоянной яркости в результате конечной длительности всех этапов зрительного процесса, а также последействием ионов распада предшествующего возбуждения. Постепенное использование ионов распада вызывает постепенное уменьшение светлоты после прекращения действия излучения.

Ход затухания светлоты во времени после прекращения действия излучения на зрительный анализатор принято называть *функцией зрительной инерции*, а продолжительность процесса затухания светлоты – *временем зрительной инерции*. Наличие у зрительного анализатора инерционности

биологически целесообразно, так как она способствует сглаживанию флуктуаций действующего на глаз излучения и этим обеспечивает устойчивость зрительного процесса.

Эффективная яркость, однозначно определяя мгновенное значение светлоты какой-либо фазы неустановившегося зрительного процесса, отличается от светлоты.

Введены понятие *эффективного блеска точечного излучателя* Q_τ и *эффективного контраста объекта наблюдения с фоном* W_τ. Эти величины являются мгновенными, так же как и эффективная яркость в условиях неустановившегося зрительного процесса. Эффективным блеском точечного излучателя с переменной по времени освещенностью зрачка глаза принято считать в каждый исследуемый момент времени такую постоянную по времени освещенность на зрачке, которая создает зрительное ощущение, тождественное с исследуемым мгновенным значением ощущения. Понятие эффективного блеска приемлемо также для оценки кратковременных вспышек. Приемлемость этого понятия в данном случае определяется тем, что малая продолжительность вспышки τ не сможет обеспечить полного формирования зрительного ощущения $Q_\tau < Q_\infty$.

Эффективный контраст объекта наблюдения с фоном можно определить как относительную эффективных яркостей объекта наблюдения и фона в каждый данный момент неустановившегося зрительного процесса:

$$W(\tau) = \frac{N_o(\tau) - N_\phi(\tau)}{N_\phi(\tau)},$$

где $W(\tau)$ – функция эффективного контраста; $N_o(\tau)$ и $N_\phi(\tau)$ – функции эффективной яркости объекта наблюдения и фона.

Проблесками или *проблесковыми огнями* принято называть кратковременные вспышки, повторяющиеся периодически с заданным интервалом времени. Интенсивность проблеска определяется блеском для точечных огней и яркостью для огней конечных размеров. В простейшем случае освещенность на зрачке наблюдателя, создаваемая проблеском в течение всего времени действия τ, постоянна. В практических условиях интенсивность проблеска может изменяться во времени. Время полного периода проблеска определяется суммой длительностей вспышки τ и затемнения t. Частота вспышек определяется величиной, обратной времени полного периода проблеска. Отношение длительности затемнения к времени полного периода принято называть *скважностью проблесков*.

Минимальную частоту проблесков, обеспечивающую впервые с достаточной достоверностью их слитное восприятие, принято называть *критической частотой мелькания*. Следовательно, критическая частота мелькания является граничной частотой между раздельным и слитным восприятием проблесков.

Величину, обратную времени наблюдения, обеспечивающего при заданных трех остальных параметрах необходимую вероятность обнаружения или различения, принято называть быстротой обнаружения или быстротой различения.

3.9. Зрительная индукция

Индуктивные зрительные процессы. Возбуждения какого-либо участка зрительного анализатора вызывает реакцию не только возбужденного участка сетчатки, на который непосредственно проекцируется изображение действующего на глаз излучателя (прямое действие), но также и смежных с ним участков (косвенное действие). Такое косвенное действия излучения на орган зрения принято называть *зрительной инерцией*.

Излучение, вызывающее зрительную индукцию, называют *индукцирующим*, а излучение тест-объекта, зрительное ощущение которого изменяется под действием индукции, – *реагирующим*. Как показывают результаты экспериментов, индукцирующее излучение может и ослаблять и усиливать зрительное ощущение. В первом случае зрительную индукцию принято считать *отрицательной*, во втором – *положительный*.

Свойство светящих тел изменять установившийся уровень видимости в результате чрезмерной освещенности, создаваемой ими на зрачке наблюдателя, или их чрезмерной яркости по сравнению с яркостью адаптации принято называть *блескостью*.

Снижение чувствительности зрительного анализатора в результате отрицательного индуктивного действия блескости принято называть *ослепленностью*. Количественную оценку индуктивного действия блескости принято определять отношением пороговых разностей яркости при наличии и отсутствии источника блескости в поле зрения наблюдателя. Это отношение, равное или большее единицы названо *коэффициентом ослепленности*: $S = \frac{\Delta B_S}{\Delta B}$.

Снижение видимости объектов при появлении в поле зрения источника блескости происходит в результате:

а) уменьшения диаметра зрачка глаза наблюдателя, вследствие чего уменьшается освещенность сетчатки при неизменной яркости поля зрения;

б) рассеяния светового потока блеского источника в глазных средах, вследствие чего возникает вуалирующая световая пелена, снижающая эффективное значение контраста объекта с фоном;

в) индуктивного взаимодействия центрального и периферического звеньев зрительного анализатора, возникающего в результате резкого различия уровней возбуждения нервных клеток в зоне действия тест-объекта и источника блескости.

Девятая сессия МКО в 1935 г. рекомендовала метод количественной оценки слепящего действия, основанный на учете *эквивалентной вуалирующей яркости*. Этот метод, предложенный Л. Холлэдеем, основан на эквивалентном сопоставлении увеличения порового контраста тест-объекта за счет слепящего

действия исследуемого источника блескости и уменьшения контраста тест-объекта яркостью вуалирующей пелены, равномерно распределенной на фон и на объект наблюдения. Эквивалентной вуалирующей яркостью Л. Холлэдей предложил считать такую яркость, равномерно наложенную на фон и объект наблюдения, которая увеличивает пороговой яркостный контраст тест-объекта с фоном во столько же раз, как и появившаяся в поле зрения блескость.

К группе индуктивных действий света следует отнести также явления посветления серого тест-объекта на черном фоне и потемнение того же объекта на ярком белом фоне. Такое индуктивное увеличение светлотного различия смежных полей принято называть *индуктивным светлотным контрастом*.

В тех случаях, когда смежные участки поля зрения разноцветны, происходит взаимное индуктивное изменение ощущения их цветности. Это явление индуктивного изменения ощущения цветности смежных полей принято называть *индуктивным цветовым контрастом*.

3.10. Зрительный дискомфорт и утомление

Неприятные ощущения, характерзующиеся чувством неудобства и напряженности, принято называть *зрительным дискомфортом*. Зрительный дискомфорт, возникающий в основном в результате наличия в освещаемом пространстве резких различий яркости, вызывает отвлечение внимание, уменьшение сосредоточенности и приводит к повышенному утомлению при длительном пребывании человека в дискомфортных условиях освещения.

Утомление организма, возникающее в результате производственной деятельности человека, связанный со зрительной работой, принято условно называть *зрительным утомлением*. Зрительное утомление может возникать в результате понижение активности: сетчатой оболочки, глазных мышц и центрального звена зрительного анализатора. Зрительное утомление может сказываться как в повышении напряженности организма, необходимой для выполнения зрительной работы в условиях утомления.

Контрольные вопросы

1. Характеристики зрительного процесса
2. Пороговая яркость (световый порог)
3. Абсолютный световый порог
4. Пороговая освещенность зрачка
5. Пороговый блеск
6. Пороговая разность яркости
7. Пороговый контраст яркости
8. Острота различения
9. Порог цветоощущения
10. Цветоразличительная чувствительность порогу цветоразличения (цветовому порогу).
11. Порог глубинного (стереоскопического) зрения.

12. Латентный период
13. Спектральная чувствительность
14. Абсолютная световая чувствительность
15. Контрастная чувствительность
16. Яркостный контраст
17. Различимость формы и расстояния
18. Бинокулярное зрение иначе называемое стереоскопическое зрение
19. Цветовая чувствительность
20. Ощущения цветности и цвета
21. Зрительная адаптация (яркостная и цветовая)
22. Яркостная адаптация (темновая и световая)
23. Зрительная инерция
24. Функция и время зрительной инерции
25. Эффективная яркость
26. Эффективный блеск
27. Эффективный контраст объекта наблюдения с фоном
28. Проблески или проблесковые огни
29. Скважность проблесков
30. Критическая частота мелькания
31. Быстрота обнаружения или быстрота различения
32. Зрительная индукция
33. Излучение индукцирующее и реагирующее
34. Индукция отрицательная и положительная
55. Блескость
36. Ослепленность
37. Коэффициент ослепленности
38. Индуктивный светлотный контраст
39. Индуктивный цветовый контраст
40. Зрительный дискомфорт
41. Зрительное утомление

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТНАЯ ПЛОТНОСТЬ СВЕТОВОГО ПОТОКА И СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛАМПЫ

4.1. Распределение светового потока в пространстве. Сила света

Распределение светового потока реального источника излучения в окружающем пространстве обычно неравномерно. Поэтому световой поток еще не может являться исчерпывающей характеристикой источника, если одновременно не определяется распределение излучения по различным направлениям окружающего пространства.

Для характеристики распределения светового потока источников излучения пользуются понятием пространственной плотности светового потока в различных направлениях окружающего источник пространства.

Пространственную плотность светового потока, определяемую отношением светового потока $d\Phi$ к телесному углу $d\omega$ с вершиной в точке расположения источника, в пределах которого равномерно распределен этот поток, принято называть *силой света*, а под *энергетической силой света* в данном направлении понимают поток излучения, приходящийся на один стерадиан (единица телесного угла). Сила света в энергетических единицах

$$I_э = \frac{d\Phi}{d\omega} . \qquad (4.1)$$

Понятие силы света, строго говоря, относится к точечному источнику, размеры которого малы по сравнению с расстоянием, на котором определяется его действие. Направление измерения силы света определяется осью телесного угла $d\omega$, в пределах которого излучается световой поток $d\Phi$.

В большинстве случаев практики пользуются понятием средней силы света, принимая световой поток Φ_ω распределенным равномерно в пределах большого или меньшего телесного угла ω, в световых единицах:

$$I = \frac{\Phi_\omega}{\omega} . \qquad (4.2)$$

Телесный угол ω измеряется отношением площади S, которую он вырезает на поверхности сферы, описанной из его вершины, к квадрату радиуса r этой сферы:

$$\omega = \frac{S}{r^2} . \qquad (4.3)$$

За единицу телесного угла – *стерадиан* (ср) – принимается угол, который, имея вершину в центре сферы, вырезает на ее поверхности участок, равный квадрату радиуса.

Энергетическая сила света выражается в ваттах на стерадиан [Вт/ср]. Единицей силы света в соответствии с решением, принятым 13-й Генеральной конференцией по мерам и весам в 1967 г., служит кандела. Кандела (1 кд=1 $лм \cdot ср^{-1}$) определяется как сила света, излучаемая в перпендикулярном направлении элементом поверхности черного тела, площадью 1:600 000 $м^2$ при температуре затвердевания платины.

Распределение силы света источников света или светильников в различных направлениях пространства обычно представляется в виде таблиц или графиков. Лишь в частных случаях имеется возможность выразить распределение силы света математическим уравнением.

Часть пространства, ограниченная замкнутой поверхностью, представляющей геометрическое место концов радиусов-векторов, носит название *фотометрического тела* излучателя.

Обычно фотометрическое тело симметрично относительно оси источника и, следовательно, может быть принято за тело вращения. Для таких излучателей, называемых симметричными излучателями, распределение силы света может быть представлено продольной кривой распределения силы света, полученной как результат сечения фотометрического тела любой плоскостью, проходящей через ось излучателя.

Продольные кривые распределения силы света строят обычно в полярной системе координат. Сетка образуется прямыми, соответствующими серединам десятиградусных зон, т. е. составляющими углы 5, 15 и так далее до 175° с вертикалью (рисунок 5.1). Значения силы света откладываются в масштабе на каждой из прямых, после чего полученные точки соединяются плавной кривой. Для удобства пользования такими кривыми на график наносится сетка из концентрических окружностей, соответствующая выбранному масштабу силы света.

В тех случаях, когда фотометрическое тело излучателя не имеет оси симметрии, сечение его плоскостями, проходящими через ось источника, будет давать различные продольные кривые распределения силы света. Следовательно, для характеристики распределения силы света таких излучателей, называемых несимметричными излучателями, необходимо строить семейство продольных кривых распределения силы света для плоскостей, смещенных относительно друг друга на определенный угол φ.

Если световой поток излучатели концентрируется в пределах малого телесного угла (прожекторы, светосигнальные приборы), то кривые распределения силы света удобнее строить в прямоугольной системе координат. За ось ординат принимается направление оптической оси прибора и на ней откладываются значения силы света в канделах; по оси абсцисс откладываются углы α между направлением измерения силы света и оптической осью (рис. 4.2).

В практике осветительной техники нередко возникает задача расчета светового потока излучателя по заданному распределению силы света. Пусть симметричное относительно оси распределение силы света излучателя задано

продольной кривой. Обозначим через I_α силу света по различным направлениям пространства, составляющим угол α с осью симметрии.

Найдем элементарный телесный угол $d\omega$, в пределах которого сила света может рассматриваться неизменной. Проведем с этой целью из начала координат окружность с радиусом r. Элементарный плоский угол

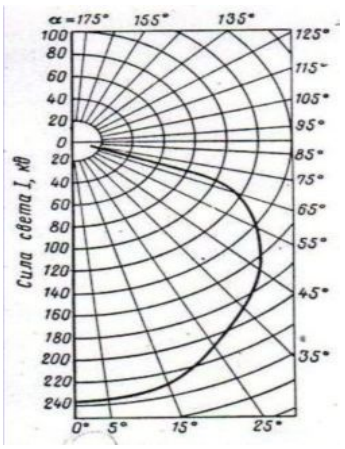


Рис. 4.1. Продольная кривая света распределения силы света симметричного излучателя

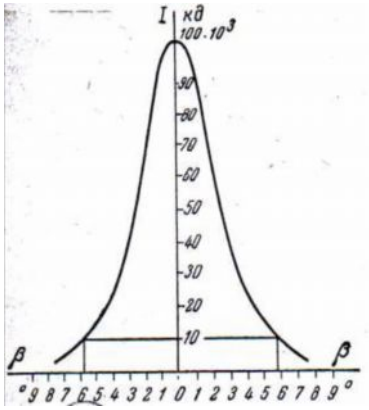


Рис. 4.2. Кривая распределения силы в прямоугольных координатах

$d\alpha$ вырежет на этой окружности дугу

$$dl = rd\alpha.$$

При вращении окружности вокруг оси симметрии $d\alpha$ вырежет в пространстве телесный угол $d\omega$, по форме напоминающей тонкостенную воронку с вершиной в начале координат. Величина телесного угла будет равна отношению площади шарового пояса, на который он опирается, к квадрату радиуса

$$d\omega = \frac{2\pi r' dl}{r^2} = \frac{2\pi r \sin\alpha r d\alpha}{r^2} = 2\pi \sin\alpha d\alpha.$$

Считая, что сила света в пределах элементарного угла $d\alpha$ постоянна и равна I_α, мы можем написать, что световой поток $d\Phi$, распространяющийся в пределах телесного угла $d\omega$, равен:

$$d\Phi = I_\alpha d\omega = 2\pi I_\alpha \sin\alpha d\alpha\ .$$

Суммарный световой поток определится интегрированием этого выражения в пределах от α=0 до $\alpha=\pi$

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\pi} I_\alpha \sin\alpha d\alpha. \qquad (4.4)$$

Обычно не представляется возможным выразить функцию $I_\alpha = f(\alpha)$ в виде математического уравнения, и поэтому интегрирование приходится заменять суммированием световых потоков, распространяющихся в конечных зонах.

Общий световой поток Ф равен сумме зональных потоков. Обычно при вычислении светового потока симметричных светильников все пространство, окружающее светильник, разбивают на 18 зон, границы которых образуют углы 0, 10, 20^0 и т. д. с осью симметрии светильника. Значения силы света берутся для середины каждой из зон, т. е. соответственно для направлений 5, 15, 25^0 и т. д.

Для облегчения определения зональных световых потоков пользуются заранее рассчитанными телесными углами для десятиградусных зон.

Если сила света не может считаться постоянной в пределах десятиградусной зоны, то при расчете светового потока источника следует брать зоны меньших размеров (например, через 5 или через $2{,}5^0$) и для них рассчитывать значения телесных углов по уравнению (4.4). Необходимость в этом может встретиться, например, при расчетах светового потока зеркальных светильников или прожекторов.

Если источник света имеет несимметричное относительно оси распределение силы света, то для определения светового потока каждой зоны следует брать среднее арифметическое из значений силы света в различных продольных плоскостях и умножать на величину соответствующего телесного угла.

4.2. Освещеность и светимость

Для количественной оценки освещения какой-либо поверхности пользуются понятием освещенности, т. е. отношением светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности.

Понятие освещенности можно относить как к реальным поверхностям (плоскость стола, поверхность обрабатываемой детали), так и к любой условной поверхности. Например, в практике расчета освещения пользуются понятием освещенности горизонтальной плоскости на высоте 0,8 м от пола (условная рабочая поверхность).

Освещенность элемента поверхности в заданной точке определяется отношением светового потока $d\Phi$, падающего на рассматриваемый элемент поверхности, к площади dS_2 этого элемента поверхности, содержащего заданную точку, это энергетическая освещенность, Вт/м^2:

$$E_э = d\Phi / dS_2. \qquad (4.5)$$

Для поверхностей конечных размеров отношение

$$E = \Phi / S_2 \tag{4.6}$$

характеризует *среднюю* или *световую освещенность* поверхности.

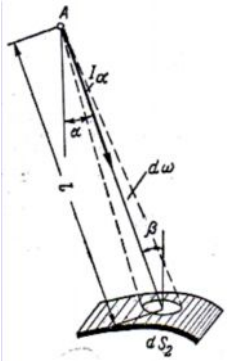


Рис. 4.4. К выводу зависимости между освещенностью и силой света

Единицей освещенности служит люкс (лк) (лат. *Lux* – свет солнца, освещение). Люкс равен освещенности поверхности площадью в 1 м^2, по которой равномерно распределен световой поток в 1 лм (1 лк =1 $лм \cdot м^{-2}$). Фот (от греческого *phos*, родительный падеж *photos* – свет), единица освещённости, обозначается ф. 1 ф = 10^4 люкс.

Освещенность в 1 лк дает лишь возможность ориентироваться в окружающей обстановке, но не позволяет выполнять работу, требующую различения мелких деталей. Для создания необходимых условий работы в административно-конторских помещениях необходима, например, освещенность 300 лк.

Рассмотрим, как связаны между собой освещенность и сила света источника, который может рассматриваться как точечный по отношению к расстоянию до освещаемой поверхности.

Выделим элемент поверхности dS_2, которая освещается источником A (рис. 4.4). Обозначим через I_α силу света источника A в направлении элемента поверхности dS_2. l – расстояние между ними; β – угол между нормалью к элементу поверхности и направлением силы света; $d\omega$ – элементарный телесный угол с вершиной в точке A, опирающийся на элемент dS_2

Величина элементарного телесного угла $d\omega$ равна:

$$d\omega = \frac{dS_2 \cos\beta}{l^2}. \tag{4.7}$$

Следовательно, световой поток, падающий на элемент поверхности dS_2, равен:

$$d\Phi = Id\omega = \frac{IdS_2 \cos\beta}{l^2}.$$

Освещенность элемента поверхности в заданной точке *A*

$$E = \frac{d\Phi}{dS_2} = \frac{I \cos\beta}{l^2}. \qquad (4.8)$$

Из полученного соотношения вытекают два вывода:

1) освещенность элемента поверхности, создаваемая точечным источником, пропорциональна силе света в направление к рассматриваемой точке и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника света до этой точки;

2) освещенность пропорциональна косинусу угла падения света на освещаемую поверхность.

Если сила света измерена в канделах, а расстояние – в метрах, то численное значение освещенности будет выражено в люксах.

Для характеристики поверхностей, светящих за счет проходящего через них или отраженного светового потока, служит отношение излучаемого элементом поверхности светового потока к площади этого элемента dS_1. Эта величина называется энергетической *светимостью* и обозначается буквой М:

$$M = \frac{d\Phi}{dS}. \qquad (4.9)$$

Светимость в отличие от освещенности, характеризующей поверхностную плотность светового потока, падающего на поверхность, оценивает плотность светового потока излучаемого светящей поверхностью. Для поверхностей конечных размеров отношение

$$M = \frac{\Phi}{S} \qquad (4.10)$$

характеризует *среднюю* или *световую светимость поверхности*.

Единицей световой светимости служит люмен на квадратный метр ($лм \cdot м^{-2}$) светящей поверхности, что соответствует плоской поверхности площадью 1м^2, равномерно излучающей (в одну сторону) световой поток в 1 лм; энергетическая светимость – Вт/м^2.

Если бы существовали поверхности, полностью отражающие или пропускающие световой поток, то для них светимость численно была бы равна освещенности. Практически все поверхности отражают или пропускают лишь часть падающего на них светового потока. Если мы обозначим буквой ρ долю отраженного потока (коэффициент отражения), то

$$M = \rho E. \qquad (4.11)$$

Обозначив долю проходящего сквозь тело светового потока буквой τ (коэффициент пропускания), будем иметь аналогично

$$M = \tau E \,. \tag{4.12}$$

4.3. Яркость

Как было указано выше уровень ощущения света зависит от плотности светового потока (освещенности) на сетчатке, которая на основании уравнения (4.6) может быть выражена через (в световых единицах кд/м^2)

$$E_c = \tau \frac{d\Phi_{зр}}{dS_2}, \tag{4.13}$$

где $d\Phi_{зр}$ – световой поток элемента поверхности, падающий на зрачок; dS_2 – площадь изображения элемента поверхности dS_1 на сетчатой оболочке глаза (рис. 4.5); τ – коэффициент учитывающий поглощение светового потока в глазных средах.

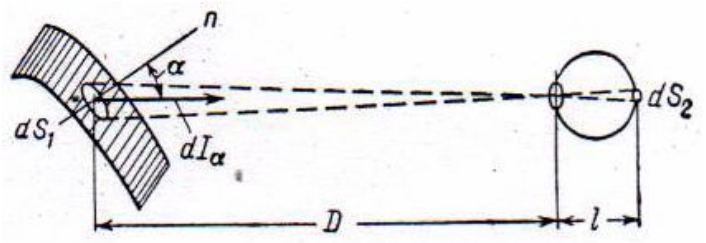


Рис. 4.5. К определению яркости поверхности

Световой поток, падающий на зрачок от элемента поверхности dS_1, содержащий точку *A*, может быть выражен через элементарную освещенность на зрачке $dE_{зр}$ и его площадь $S_{зр}$:

$$d\Phi_{зр} = dE_{зр} S_{зр} \,.$$

В свою очередь освещенность на зрачке согласно уравнению (4.8) может быть выражена через силу света под углом α к нормали светящей поверхности $dE_{зр}$ и расстояние от поверхности dS_1 до зрачка глаза. При этом выражение для светового потока, падающего на зрачок, примет вид

$$d\Phi_{зр} = \frac{d\mathrm{I}_\alpha}{D^2} S_{зр} \,.$$

Подставляя в уравнение (4.8), получаем

$$\mathrm{E}_c = \frac{\tau d\mathrm{I}_\alpha S_{зр}}{D^2 dS_2}. \qquad (4.14)$$

Учитывая, что

$$\frac{dS_1 \cos\alpha}{dS_2} = \frac{D^2}{l^2},$$

где l – расстояние от зрачка глаза до изображения светящего элемента на сетчатке, окончательно получаем

$$\mathrm{E}_c = \frac{\tau\ S_{зр}}{l^2} \frac{d\mathrm{I}_\alpha}{dS_1 \cos\alpha} = c \frac{d\mathrm{I}_\alpha}{dS_1 \cos_\alpha}\ , \qquad (4.15)$$

где $c = \frac{\tau\ S_{зр}}{l^2}$ – постоянная величина (при неизменной площади зрачка).

Таким образом, освещенность на сетчатке, определяющая уровень ощущения света, пропорциональна величине

$$L_\alpha = \frac{d\mathrm{I}_\alpha}{dS_1 \cos_\alpha}. \qquad (4.16)$$

Эту величину, равную отношению силы света dI_α, излучаемой элементом поверхности dS_1 в данном направлении, к площади проекции этой поверхности на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению $dS_1 \cos\alpha$, называются *яркостью* поверхности в точке A поверхности S_1.

Для светящей поверхности конечных размеров можно ввести понятие средней яркости

$$L_\alpha = \frac{I_\alpha}{S_l \cos_\alpha}, \qquad (4.17)$$

где I_α – сила света, излучаемая поверхностью S_1 в заданном направлении.

Единицей яркости служит кандела на квадратный метр $(кд \cdot м^{-2})$, в энергетических единицах Вт/ср·м$^{-2}$.

4.4. Световые свойства тел

Световой поток, падающий на непросвечивающее тело, частично поглощается им, а частично отражается. В случае просвечивающего тела, кроме отражения и поглощения, имеет место также пропускание светового

потока. Количественно отражение, поглощение и пропускание светового потока телом оцениваются соответствующими коэффициентами.

Коэффициент отражения ρ равен отношению светового потока Φ_ρ отраженного телом, к световому потоку Φ, падающему на него,

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi}. \tag{4.18}$$

Коэффициент поглощения α равен отношению светового потока Φ_α, поглощенного телом, к световому потоку Φ, падающему на него,

$$\alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi}. \tag{4.19}$$

Коэффициент пропускания τ равен отношению светового потока Φ_τ прошедшего сквозь тело, к световому потоку Φ, падающему на него,

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi}. \tag{4.20}$$

По закону сохранения энергии

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau. \tag{4.21}$$

Разделив все члены этого уравнения на Φ, получим

$$\rho + \tau + \alpha = 1.$$

Большинство поверхностей отражает световой поток избирательно, т. е. коэффициент отражения их для различных длин волн неодинаков.

Для характеристики коэффициента отражения поверхности при заданной длине волны пользуются понятием *спектрального коэффициента отражения*. Спектральным коэффициентом отражения ρ_λ называется отношение монохроматического светового потока $(\Phi_\lambda)_\rho$, отраженного телом, к монохроматическому потоку Φ_λ, падающему на тело

$$\rho_\lambda = (\Phi_\lambda)_\rho / \Phi_\lambda. \tag{4.22}$$

При отражении от таких поверхностей спектральный состав светового потока меняется. Поэтому цвет этих поверхностей зависит как от спектрального состава, падающего на них светового потока, так и от отражательной

способности поверхности для различных длин волн, характеризуемой функцией $\rho(\lambda)$.

На рис. 4.6 приведены кривые спектрального коэффициента отражения $\rho(\lambda)$ для некоторых красок. Как видим, все эти цветные поверхности имеют наибольший спектральный коэффициент отражения в соответствующей по цвету области спектра.

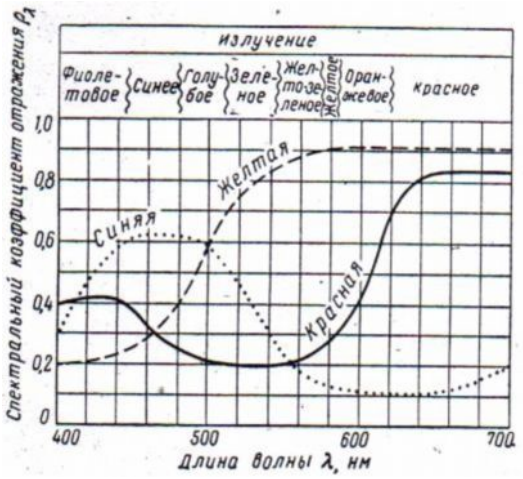


Рис. 4.6. Спектральные коэффициенты отражения некоторых красок

Зная спектральный состав падающего света и зависимость спектрального коэффициента отражения от длины волны, можно вычислить *интегральный коэффициент отражения* избирательно отражающей поверхности как отношение отраженного светового потока к падающему:

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi} = \frac{\int_0^\infty \varphi_\lambda V(\lambda)\rho_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \varphi_\lambda V(\lambda) d\lambda}. \qquad (4.23)$$

Практически интегральный коэффициент отражения вычисляется как отношение сумм ординат, взятых через 10 или 20 нм для кривых, характеризующих спектральный состав отраженного и падающего световых потоков.

Просвечивающие тела также в большинстве случаев пропускают свет избирательно. Спектральной характеристикой просвечивающих материалов служит *спектральный коэффициент пропускания* τ_λ, который представляет собой отношение монохроматического светового потока (Φ_λ), прошедшего через тело, к монохроматическому потоку Φ_λ, падающему на него

$$\tau_\lambda = \frac{(\Phi_\lambda)_\tau}{\Phi_\lambda}. \qquad (4.24)$$

Интегральный коэффициент отражения просвечивающих материалов, избирательно пропускающих излучение, определится как отношение суммарного светового потока, прошедшего сквозь тело, к падающему световому потоку

$$\tau = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi} = \frac{\int_0^\infty \varphi_\lambda V(\lambda)\tau_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \varphi_\lambda V(\lambda) d\lambda}. \qquad (4.25)$$

Из уравнений (4.23) и (4.25) следует, что коэффициенты отражения и пропускания определяют лишь количественно долю отраженного и прошедшего через тело светового потока, не характеризуя при этом распределение этих потоков в пространстве.

По характеру распределения отраженного или пропущенного световых потоков в пространстве принято различать:

1) направленное отражение или пропускание;

2) рассеянное (диффузное) отражение или пропускание;

3) направленно-рассеянное отражение или пропускание.

В случае *направленного (зеркального) отражения* от плоской поверхности величина телесного угла, в пределах которого распространяется отраженный световой поток, остается неизменной (рис. 4.7, *а*). Направленное (или зеркальное) отражение подчиняется известным законам физики:

1. Отраженный луч находится в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения.

2. Угол отражения равен углу падения.

Направленное или зеркальное отражение наблюдается от гладких поверхностей, размеры неровностей на которых малы по сравнению с длиной волны падающего излучения (полированный металл, стеклянное зеркало). Такие поверхности обладают яркостью только в направлении отраженного луча, во всех же остальных направлениях яркость поверхности равна нулю.

Также неизменной остается величина телесного угла, в пределах которого распространяется прошедший световой поток, при *направленном пропускании*. Тела, обладающие направленным пропусканием, называются прозрачными. Через прозрачное тело мы можем видеть очертания находящихся за ним предметов (прозрачное стекло).

В случае *рассеянного (диффузного)* отражения и пропускания от плоской поверхности телесный угол, в пределах которого распространяется отраженный или пропущенный телом световой поток, равен 2π. Свет распространяется равномерно по всем направлениям в пределах полусферы, в результате чего яркость поверхности во всех направлениях одинакова (рис. 4.7, *б*).

Для плоской поверхности, равно яркой во всех направлениях, справедливо соотношение

$$L_\alpha = \frac{I_\alpha}{S_1 \cos\alpha} = \frac{I_0}{S_1} = const,$$

Откуда

$$I_\alpha = I_0 \cos\alpha. \qquad (4.26)$$

Следовательно, плоская поверхность, равнояркая во всех направлениях, излучает в окружающем пространстве свет по *закону косинуса*.

Фотометрическое тело поверхности, излучающей по закону косинуса, представляет собой шар, касательный к этой поверхности. Следовательно, световой поток, излучаемый поверхностью, может быть согласно уравнению ($\Phi = 2\pi \int_0^\pi I_\alpha \sin\alpha d\alpha$) выражен:

$$\Phi = 2\pi I_0 \int_0^{\pi/2} \cos\alpha \sin\alpha d\alpha = \pi I_0, \qquad (4.27)$$

где I_0 – сила света по нормали к поверхности.

Рассеянным или диффузным отражением обладают поверхности, размеры неровностей которых значительно превышают длину волны падающего излучения (гипс, клеевая краска). К диффузно пропускающим свет материалам относятся молочные стекла, в составе которых находятся частицы вещества с иным показателем преломления, создающие объемное рассеяние света.

В природе не существует идеальных зеркально или диффузно отражающих (пропускающих) свет материалов. У реальных материалов наблюдается наличие обеих разновидностей отражения или пропускания одновременно (рис. 4.7, *в*). При *направленно-рассеянном отражении* (травленные металлические поверхности) световой поток отражается преимущественно в направлениях, примыкающих к направлению зеркального отражения; в случае *направленно-рассеянного пропускания* (матированные стекла) прошедший через тело световой поток распространяется преимущественно в направлениях, близких к направлению падающего луча.

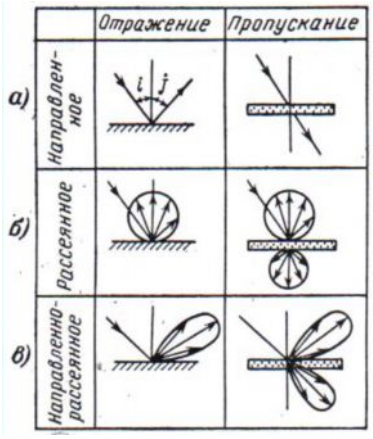


Рис. 4.7. Разновидности отражения и пропускания светового потока

Для характеристики распределения яркости поверхности в различных направлениях при отражении или пропускании принято пользоваться величиной отношения яркости в данном направлении L_α к яркости L_0 одинакового с ней освещенной диффузной поверхности, имеющей коэффициент отражения, равный единице. Эта величина называется *коэффициентом яркости* и обозначается буквой β_α:

$$\beta_\alpha = \frac{L_\alpha}{L_0}. \qquad (4.28)$$

Заменив L_0 через силу света по нормали к поверхности S уравнение (4.28) можно переписать в виде

$$L_\alpha = \beta_\alpha L_0 = \beta_\alpha \frac{I_0}{S}.$$

На основании уравнения (4.27) окончательно получим

$$L_\alpha = \beta_\alpha \frac{\Phi}{\pi S} = \frac{\beta_\alpha E}{\pi}. \qquad (4.29)$$

Очевидно, что для диффузно отражающих поверхностей $\beta = \rho$, а для диффузно пропускающих поверхностей $\beta = \tau$ и, следовательно, согласно уравнениям (4.11) и (4.12)

$$L = M / \pi, \qquad (4.30)$$

где M – светимость диффузно отражающей (пропускающей) поверхности, лм/м^2.

4.5. Теория теплового излучения

Под тепловым излучением принято понимать всякое излучение, возникающее в результате теплового движения (колебательного или вращательного) молекул и атомов излучающего тела. При этом в излучающем теле не происходит никаких изменений, кроме изменения теплового состояния, а количество излучаемой энергии изменяется соответственно количеству подводимого тепла.

При повышении температуры излучающего тела увеличивается энергия движения заряженных частиц, следствием чего является рост лучистого потока, излучаемого телом. Повышение температуры тела сопровождается также ростом средней величины кванта, а следовательно, изменением спектрального состава излучения.

Видимые излучения возникают только при больших значениях кинетической энергии движущихся частиц, т. е. лишь при высокой температуре излучающего тела.

Наиболее глубоко законы теплового излучения изучены применительно к *полному излучателю* (черному телу), обладающему способностью поглощать все падающие на него излучения независимо от длины волны.

Многочисленные исследования процессов теплового излучения, проведенные Р. Кирхгофом (Кирхгоф Густав Роберт, немецкий физик, *Кирхгофа закон излучения*, один из законов *теплового излучения*; отношение испускательных и поглощательных способностей любого тела равно испускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре; открыт в 1859 г.), В. А. Михельсоном (советский физик и геофизик, один из основоположников актинометрии), В. Вином (немецкий физик, вывел в 1893 г. законы излучения и смещения, названные его именем; лауреат Нобелевской премии 1911 г.) и М. Планком, позволили последнему, введя понятие о квантах энергии, получить хорошо согласующееся с экспериментальными данными соотношение между спектральной плотностью энергетической светимости, длиной волны и абсолютной температурой полного излучателя

$$m_e(\lambda,T)_{n.u} = \frac{c_1}{\lambda^5}\frac{1}{e^{c_2/\lambda T}-1}, \qquad (4.31)$$

где $m_e(\lambda,T)_{n.u}$ – спектральная плотность энергетической светимости, $Вт\cdot м^{-2}\cdot мкм^{-1}$; λ – длина волны, мкм; T – абсолютная температура, К; e – основание натуральных логарифмов.

Значения постоянных c_1 и c_2 в уравнении Планка равны:

$$c_1 = 2\pi hc = 3{,}74\cdot 10^8\, Вт\cdot м^{-2}\cdot мкм^4;\; c_2 = \frac{hc}{k} = 1{,}43\cdot 10^4\, мкм\cdot К,$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света; k – постоянная Больцмана.

Кривые спектральной плотности энергетической светимости полного излучателя для различных значений абсолютной температуры, построенные по уравнению Планка, представлены на рис. 4.8.

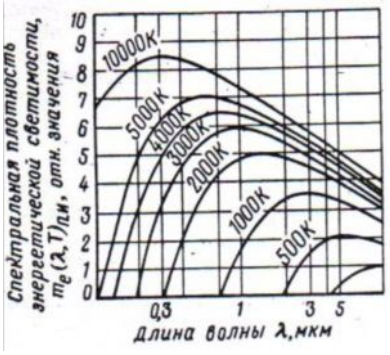


Рис. 4.8. Кривые спектральной плотности энергетической светимости полного излучателя для различных температур

Как следует из кривых, при низких температурах нагрева полного излучателя его излучение целиком лежит в инфракрасной части, по мере повышения температуры максимум излучения постепенно смещается в сторону области видимых излучений.

Положение максимума кривой спектральной плотности энергетической светимости можно определить, продифференцировав уравнение по λ, и приравняв первую производную нулю. В результате такого математического преобразования получим

$$\lambda_{макс} T = 2896\, мкм \cdot К, \qquad (4.32)$$

где $\lambda_{макс}$ – длина волны, соответствующая максимуму кривой спектральной интенсивности лучистого потока, *мкм*; T – абсолютная температура, К.

Полученное уравнение, именуемое законом смещения Вина, позволяет рассчитать положение максимума кривой спектральной плотности энергетической светимости полного излучателя для любой абсолютной температуры.

Для определения лучистого потока, излучаемого единицей поверхности полного излучателя, проинтегрируем уравнение в пределах от 0 до ∞ и получим выражение для *энергетической светимости*:

$$(M_e)_{п.и} = \int_0^\infty m_e(\lambda, T) d\lambda = c_1 \int_0^\infty \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda = \sigma T^4, \qquad (4.33)$$

где $(M_e)_{п.и}$ – энергетическая светимость (лучистый поток с 1 м^2 поверхности полного излучателя), Вт·м$^{-2}$; $\sigma = 5{,}672 \cdot 10^{-8}$ Вт$\cdot м^2 \cdot К^{-4}$.

Эта зависимость была получена экспериментально Стефаном (Й. Стефан австрийский физик, открыл закон в 1879 г.) и теоретически Больцманом ((Л. Больцман австрийский физик, обосновал закон в 1884 г.) и носит название закона Стефана – Больцмана.

Из анализа уравнений (4.31) и (4.33) мы приходим к следующим основным выводам.

1. Лучистый поток, излучаемый полным излучателем, резко возрастает с увеличением абсолютной температуры.

2. При повышении температуры полного излучателя максимум кривой спектральной плотности энергетической светимости смещается в сторону коротковолновой части спектра.

3. При изменении абсолютной температуры в пределах от 4700 до 10 000 К максимум кривой спектральной плотности энергетической светимости лежит в пределах области видимых излучений.

Для оценки теплового излучения с точки зрения вызываемого им светового ощущения пользуются понятием *световой эффективности*,

определяющим долю светового потока в общем потоке излучения. Математическое выражение световой эффективности на основе уравнений (4.32) и (4.34) можно представить в виде

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e} = \frac{\int_0^\infty \varphi\lambda V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi\lambda d\lambda} 100\%, \qquad (4.34)$$

где φ_λ – спектральная плотность лучистого потока, Вт/мкм; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность.

Световая эффективность полного излучателя зависит от температуры. Исследование показало, при повышении температуры вначале происходит рост световой эффективности, что объясняется смещением максимума кривой спектральной плотности лучистого потока в сторону области видимых излучений. Максимального значения световая эффективность достигает при температуре полного излучателя около 6 500 К; при этом ее величина составляет 14,5 %. При дальнейшем увеличении температуры максимум продолжает смещаться в сторону коротковолновой части спектра и значение световой эффективности начинает уменьшаться.

Реальные излучатели, применяемые для изготовления тела накала современных ламп, имеют температуру плавления порядка 3 600 К (вольфрам), что ограничивает их световую эффективность значениями, не превышающими 2–3 %.

Для оценки излучения металлов пользуются понятием спектрального коэффициента излучения, под которым понимается отношение спектральной плотности энергетической светимости тела (металла) к спектральной плотности энергетической светимости полного излучения при тех же температуре и длине волны:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{m_e(\lambda, T)}{m_e(\lambda, T)_{п.и.}}, \qquad (4.35)$$

где $m_e(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической светимости данного металла.

Исследования показывают, что большинство металлов обладает селективной способностью излучения, т. е. их спектральный коэффициент излучения, всегда меньший единицы, является функцией длины волны и температуры.

Для всех металлов характерно увеличение спектрального коэффициента излучения с увеличением температуры и уменьшение селективности излучения. При очень высоких значениях температуры (близких и температуре плавления) излучение приближается по спектру к излучению полного излучателя.

Получены кривые зависимости спектрального коэффициента излучения вольфрама от длины волны излучения для температур: 300, 2 000 и 3 000 К. Для всех температур спектральный коэффициент излучения уменьшается с увеличением длины волны излучения. По мере повышения температуры селективность излучения вольфрама снижается, что характеризуется более пологим ходом кривых, а самоизлучение приближается к излучению полного излучателя.

Для определения лучистого потока, излучаемого реальным телом, вводят понятие *полного коэффициента излучения*, определяемого отношением энергетических светимостей данного тела и полного излучателя при одной и той же температуре:

$$\varepsilon(T) = \frac{M_e}{(M_e)_{п.и.}}, \qquad (4.36)$$

где M_e – энергетическая светимость излучающего тела (лучистый поток с 1 м^2 поверхности излучающего тела), Вт·м$^{-2}$.

Значение полного коэффициента излучения для металлов определяется из эмпирического уравнения

$$\varepsilon(T) = (1 - e^{-\beta T}), \qquad (4.37)$$

где T – температура, К.

Коэффициент β в уравнении (4.37) зависит от рода металла. Например, для вольфрама коэффициент β равен $1{,}47 \cdot 10^{-4}$, тантала $1{,}31 \cdot 10^{-4}$, молибдена $1{,}18 \cdot 10^{-4}$ К$^{-1}$.

Понятия спектрального и полного коэффициентов излучения позволяют, пользуясь уравнениями (4.31) и (4.33), рассчитать спектральную плотность лучистого потока и полный лучистый поток, излучаемый любым тепловым излучателем.

Наибольший интерес среди металлов, пригодных для изготовления тела накала источников света, представляет вольфрам – самый тугоплавкий металл с температурой плавления 3 660 К, из которого путем протяжки можно получать нити любого необходимого диаметра.

Получены кривые спектральных плотностей энергетической светимости полного излучателя и лампы накаливания с вольфрамовой нитью для температуры T = 2 450 К. Из полученных кривых видно, излучение вольфрама при данной температуре меньше, чем излучение полного излучателя, но максимум его кривой излучения смещен в сторону области видимых излучений, что обусловливает рост кривой спектрального коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ в видимой части спектра. Эта особенность является чрезвычайно ценным свойством вольфрама, вследствие которого его световая эффективность для всех температур, меньших температуры плавления, выше световой эффективности полного излучателя.

4.6. Конструкция современных ламп накаливания

Электрические лампы накаливания нашли применение в самых различных областях техники освещения. Лампы накаливания являются одним из наиболее массовых промышленных изделий, которые различают по напряжению, мощности и исполнению.

Наибольшее распространение имеют в настоящее время электрические лампы накаливания общего назначения, предназначенные для освещения помещений и наружного освещения (ГОСТ 2239-70).

Внешний вид такой лампы представлен на рис. 4.9. Стеклянная колба лампы *1*, диаметр которой определяете мощностью лампы, укрепляется специальной мастикой в цоколе *9*, предназначенном для включения лампы в электрическую сеть. Внутри колбы расположена ножка лампы, состоящая из стеклянного штабика *5*, который посредством утолщения *7* в нижней части крепится к колбе.

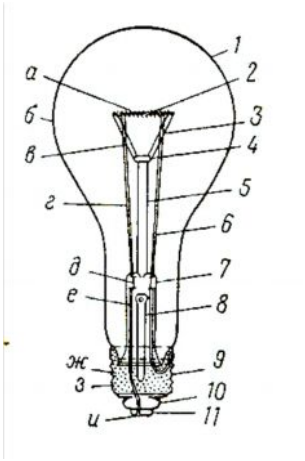


Рис. 4.9. Конструкция нормальной осветительной лампы накаливания:
1 – колба; 2 – спираль; 3 – крючки; 4 – линза; 5 – штабик; 6 – электроды; 7 – лопатка; 8 – штенгель; 9 – цоколь; 10 – изолятор; 11 – нижний контакт.
Материалы: а – вольфрам; б – стекло; в – молибден; г – никель; д – медь, сталь, никель; е – мед; ж – цокольная мастика; з – латунь или сталь; и – свинец, олово

В верхней части штабика впаяны крючки *3*, на которых укреплено тело накала лампы *2* в виде спиральной нити. От тела накала к цоколю идут электроды *6*, предназначенные для подведения тока к телу накала. Цоколь осветительной лампы накаливания снабжен винтовой нарезкой для крепления в патроне.

Для изготовления тела накала лампы применяется вольфрам в виде проволоки. С целью получения более концентрированного тела накала, уменьшения относительных потерь тепла в газе и скорости испарения вольфрама проволока спирализуется и располагается в виде незамкнутого кольца в плоскости, перпендикулярной оси лампы. Стремление к дальнейшему

повышению эффективности ламп накаливания привело к применению двойных спиралей (биспиральные лампы).

С целью уменьшения распыления вольфрама и повышения рабочей температуры тела накала лампа наполняется *инертными газами* и их смесями при возможно больших давлениях. Рассмотрена зависимость относительного распыления вольфрама от давления газа в лампе при наполнении смесью аргона с азотом при T = 2 780 К и диаметре проволоки 0,1 мм, демонстрирующая значительное уменьшение распыления вольфрама при увеличении давления газа в лампе. Нормально давление газа в лампах не превышает 0,1 МПа (600 мм рт. ст.), так как дальнейшее повышение давления вызывает технологические трудности.

Наличие газовой среды приводит к дополнительным тепловым потерям на теплопроводность и конвекцию, поэтому для наполнения ламп необходимо использовать тяжелые инертные газы или их смеси, например аргон с добавкой азота (14–16 %). Увеличение процента содержания азота в наполняющей смеси ведет к увеличению потерь на конвекцию.

В последние годы для наполнения колб ламп накаливания стали все шире применять смесь криптона с азотом, снижающую тепловые потери. Однако низкое процентное содержание криптона в воздухе и трудность его получения в больших количествах позволяют применять криптоновое наполнение лишь в лампах малой мощности, в которых такое наполнение дает наибольший эффект.

Во время работы лампы накаливания температура ее колбы достигает значительной величины, что заставляет выбирать размеры колбы с тем расчетом, чтобы не возникало размягчение стекла.

Для иллюстрации расхода электрической энергии, подводимой к лампе накаливания, рассмотрим баланс энергии в лампе накаливания мощностью 100 Вт, приведенный в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Распределение энергии	Тип лампы			
	Вакуумная	Газополная со спиральной нитью	Биспиральная газополная	Биспиральная с криптоновой смесью
Излучение в видимой части спектра	7	10	12	163
Невидимые излучения	86	68	74	76
Потери на теплопроводность	7	3	2	2
Потери на конвекцию через газ	–	19	12	9

Из приведенной таблицы следует, что наибольший световой эффект получается при наполнении колбы лампы с биспиральной нитью криптоновой смесью, что обеспечивает наименьшие тепловые потери.

Лампы мощностью до 150 Вт выпускаются *вакуумными* (в условном обозначении содержится буква В); исключение составляют биспиральные

лампы мощностью 40, 60 и 100 Вт (на напряжения 127 и 220 В), выпускаемые также и с криптоновым наполнением (К). Лампы *газополные* в условном обозначении содержат букву Г, лампы с биспиральной нитью – букву Б.

Наряду с лампами в прозрачной колбе промышленностью выпускаются лампы в матированных и молочных колбах, а также лампы с зеркальным или диффузным отражающим слоем, заполняющим часть колбы лампы у цоколя. Снижение светового потока ламп с матированной колбой не должно превышать 3 %, с молочной колбой – 20 %.

4.7. Световые и электрические характеристики ламп накаливания

Основным параметром, определяющим световые характеристики лампы накаливания при заданных размерах тела накала и конструкции лампы, является температура тела накала.

Предельной температурой тела накала является температура плавления металла, из которого оно выполнено. Фактическая температура тела накала в современных лампах выбирается более низкой из соображений обеспечения заданной продолжительности горения лампы. Обычно температура тела накала вакуумных ламп не превышает 2 400 К, а в газополных лампах доходит до 2 900 К.

Основными характеристиками лампы накаливания являются:

1) номинальное напряжение;
2) электрическая мощность;
3) световой поток;
4) световая отдача;
5) цветность излучения;
6) средняя продолжительность горения.

Номинальное напряжение – напряжение сети в вольтах, при котором лампа предназначена к работе. Лампы накалывания общего назначения выпускаются в соответствии со стандартными системами напряжения в осветительных сетях на 127 и 220 В. Часть лампы выпускается на напряжения от 127 до 135 В и от 220 до 235 В и предназначается для использования в осветительных сетях, фактические напряжения которых могут превышать 127 и 220 В.

Электрическая мощность и световой поток лампы обычно указываются как средние величины для номинального напряжения, на которое рассчитана лампа.

Действующим ГОСТ на электрические накаливания общего применения допускаются отклонения светового потока и мощности в пределах 5–10 % номинального значения.

Световой поток лампы накаливания находится в прямой зависимости от электрической мощности лампы и температуры тела накала. В процессе горения лампы происходит постепенное распыление вольфрама, что приводит к уменьшению диаметра нити и увеличению ее сопротивления, а следовательно, к уменьшению мощности и светового потока. Уменьшение светового потока

лампы в процессе горения возникает также из-за потемнения колбы в результате оседания на ее стенках распыленного вольфрама. Поэтому в ГОСТ для ламп, прогоревших 75 % своего номинального срока службы, допускается уменьшение светового потока на 15–20 % начального значения.

Световая отдача является характеристикой, определяющей экономичность лампы накаливания, и численно равна отношению излучаемого лампой светового потока к ее электрической мощности

$$H = \frac{\Phi}{P},$$

где Φ – световой поток, лм; P – мощность лампы, Вт.

Световая отдача находится в прямой зависимости с температуры тела накала лампы. На рис. 4.10 приведена такая зависимость для газополных ламп накаливания.

Как следует из приведенной кривой, лампы накаливания большой мощности, а также источники света низкого напряжения с телом накала большего диаметра, допускающим повышенную температуру нагрева, имеют более высокую световую отдачу по сравнению с источниками малой мощности и источниками с более высоким номинальным напряжением.

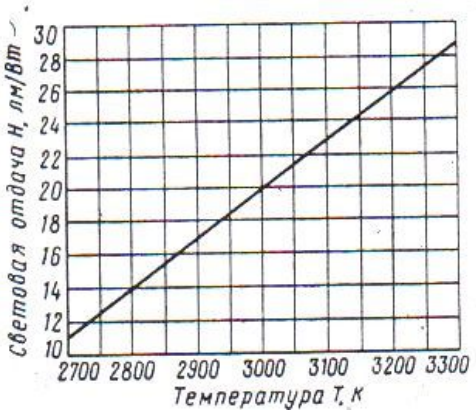


Рис. 4.10. Зависимость световой отдачи газополной лампы накаливания от температуры нити

Цветность излучения ламп накаливания, подобно цветности излучения полного излучателя, зависит от температуры тела накала. По мере увеличения температуры цветность излучения ламп накаливания приближается к цветности черного тела.

При номинальном напряжении в спектре излучения нормальных осветительных ламп накаливания преобладает видимое излучение в желтой и красной частях спектра при недостатке его в синей и фиолетовой частях по сравнению с природным дневным светом. Поэтому излучение ламп накаливания значительно отличается от дневного света, что искажает цветопередачу и не позволяет эффективно использовать лампы накаливания для освещения работ, связанных с необходимостью точного распознавания цветов.

Средняя продолжительность горения ламп определяется в первую очередь распылением вольфрама с тела накала, возникающим под действием высокой температуры.

В силу ряда технологических причин не удается изготовлять все лампы с одинаковым сроком службы.

Уменьшение напряжения в сети по сравнению с номинальным значением, принятым за 100 %, вызывает уменьшение светового потока, излучаемого лампой, а также ее мощности. Уменьшение светового потока происходит быстрее, чем мощности, что определяет уменьшение световой отдачи лампы при уменьшении напряжения. При не больших отклонениях напряжения в сети от номинального можно приближенно считать, что при изменении напряжения на ±1 % световой поток лампы изменяется на ±2,7 %, а средняя продолжительность горения ±13 %.

В процессе эксплуатации осветительных установок необходимо стремиться к тому, чтобы фактическое напряжение в сети незначительно отличалось от номинального, так как при увеличении напряжения сети уменьшается средняя продолжительность горение ламп, а при уменьшении напряжения снижается световая отдача, т. е. экономичность лампы.

Лампы накаливания с отражающим слоем. С целью перераспределения светового потока и увеличения силы света лампы накаливания в направлении ее оси (α=0) промышленностью выпускаются лампы с зеркальным и с дуффузным отражающим слоем, который наносится изнутри на верхнюю часть колбы лампы (со стороны цоколя).

Наибольшее увеличение осевой силы света достигается в лампах с зеркальным отражающим слоем. Лампы накаливания с зеркальным отражающим слоем широко используются для освещения производственных помещений с тяжелыми условиями среды. При установке зеркальных ламп без светильника необходимо предусматривать меры предохранения хрупкой стеклянной колбы лампы от механического повреждения, а также от попадания влаги.

Лампы накаливания с йодным циклом. В процессе горения лампы накаливания происходит испарение вольфрама с раскаленной нити, что приводит к постепенному уменьшению ее диаметра и, в конечном счете, к перегоранию. Распыленные частицы вольфрама, оседая на внутренней поверхности колбы лампы, образуют на ней темный налет, что является одной из причин снижения светового потока лампы.

Стремление к повышению эффективности ламп накаливания привело к разработке и освоению ламп накаливания с вольфрамово-йодным циклом (галогенных ламп накаливания). В*ольфрамово-йодный цикл* заключается в диссоциации молекул йода, вводимого в колбу лампы, образовании йодистого вольфрама (WJ_2) и его последующем распаде.

Этот процесс проходит следующим образом: пары йода за счет высоких температур в зоне, примыкающей к нити ($t \geq 1\,600\ ^0$C), перемещаются к стенкам

колбы лампы и образуют с частицами вольфрама, осевшими на колбе при распылении нити, *йодистый вольфрам*.

Если температура колбы превышает 250^0 С, то йодистый вольфрам остается в парообразном состоянии и постепенно диффундирует нити лампы. В зоне высоких температур ($t \approx 1\,200$ ^{0}С) начинается процесс разложения йодистого вольфрама, частицы вольфрама оседают на нити лампы, а атомы йода вновь возвращаются к стенкам колбы. Таким образом, создается непрерывный цикл, в результате которого происходят *регенерация* вольфрамовой нити и увеличение продолжительности горения ламп.

Конструктивно лампы накаливания с йодным циклом представляют собой цилиндр небольшого диаметра (7–12 мм) на нагревостойкого стекла (при температуре стенок колбы менее 250 ^{0}С йодистый вольфрам выходит из парообразной фазы и вольфрамово-йодный цикл нарушается), например кварца. Нить лампы располагается строго по оси цилиндра. Колба наполняется инертным газом – аргоном, ксеноном или криптоном с добавлением дозированного количества йода.

Наша промышленность выпускает лампы накаливания с йодным циклом типа КИ мощностью 1, 1,5 и 2 кВт. Разработаны лампы мощностью 5, 10 и 20 кВт.

4.8. Процесс электрического разряда в газах и парах металлов

Стремление повысить экономичность ламп и невозможность достигнуть заметного эффекта в этом направлении от источника теплового излучения заставили задуматься над вопросом создания источников света, основанных на иных принципах излучения.

Разрешение этого вопроса было найдено при использовании явления *люминесценции* – собственного излучения атомов и молекул вещества, возникающего при возбуждении их энергией какого-либо вида. Люминесценция определяется академиком С. И. Вавиловым как избыток излучения в данной области спектра по сравнению с тепловым излучением тела, характеризуемый длительностью свечения не менее 10^{-10} с.

В современных разрядных лампах используется излучение электрического разряда в газах или парах металлов (электролюминесценция).

Газовый разряд может обладать значительно более высокой световой эффективностью по сравнению с тепловым излучением. В отличие от теплового излучения твердых тел, имеющего непрерывный спектр, излучение газового разряда дает линейчатый спектр, зависящий от рода газа или паров металла, наполняющих лампу.

Рассмотрим вкратце физическую сущность процесса электрического разряда в газах и парах металлов. Если запаянную с обоих концов стеклянную трубку (колбу) наполнить инертным газом или небольшим количеством металла с высокой упругостью паров, например ртутью и по концам трубки расположить электроды, приложив к ним определенную разность потенциалов, то электрическое поле, возникающее между электродами, начнет

воздействовать на свободные электроны и ионы, всегда присутствующие в газе. В результате этого воздействия возникает перемещение электронов к аноду, а ионов – к катоду, т. е. появляется электрический ток.

По мере увеличения напряжения на электродах скорость перемещения частиц увеличивается, электроны получают достаточную кинетическую энергию для ионизации встречающихся на их пути атомов газа. В результате ионизации, возникающей при столкновении электронов с атомами газа, появляются новые электроны и ионы, процесс нарастает, и электрический ток в трубке увеличивается.

Вследствие относительно малой скорости переноса ионов последние группируются у катода, образуя объемный положительный заряд, в то время как более подвижные электроны быстро переносятся к аноду. В результате вдоль трубки возникает неравномерное распределение потенциала с большим градиентом потенциала у катода и малым у анода.

Под действием большой разности потенциалов, возникающей у катода, ионы получают значительное ускорение и ударом о катод освобождают с его поверхности новые электроны, которые в свою очередь становятся источником ионизации. Таким образом, устанавливается не зависящий от внешних ионизаторов процесс, сопровождающийся свечением. Такой разряд именуется тлеющим разрядом.

Напряжение, которое необходимо приложить к лампе для возбуждения электрического разряда, принято называть напряжением зажигания. Величина напряжения зажигания зависит от ряда причин, основными из которых являются: материал и свойства катода, род газа, наполняющего лампу, и давление газа, диаметр колбы и расстояние между электродами.

Напряжение зажигания может быть снижено путем покрытия поверхности катода пленкой щелочных щелочноземельных металлов, что уменьшает работу выхода электронов, а также предварительной ионизацией газа. Так, для лампы с железоникелевыми катодами, наполненной парами ртути, напряжение зажигания составляет 380–520 В, при наполнении лампы неоном оно снижается до 150–245 В.

Основным источником световых излучений тлеющего разряда является область положительного свечения, граница которой с ростом давления газа приближается к катоду. Область положительного свечения используется в высоковольтных газосветных трубках, широко применяемых для целей рекламного освещения.

Отрицательное свечение используется в неоновых лампах катодного свечения, применяемых в качестве сигнальных ламп и индикаторов. Для целей освещения такие источники непригодны из-за низкой световой эффективности.

Тлеющий разряд наблюдается при малых плотностях тока на катоде (10^{-5}–10^{-1} А/см^2) и низких давлениях газа или паров, наполняющих лампу (тысячи паскалей – десятки миллиметров ртутного столба). Падение потенциала у катода при тлеющем разряде составляет от 100 до 300 В.

При дальнейшем увеличении тока в цепи лампы процесс бомбардировки катода ионами усиливается. Под действием интенсивной бомбардировки катод накаляется и возникает термоэлектронная эмиссия.

Для облегчения эмиссии электронов используются вольфрамовые катоды, поверхность которых покрыта окисью бария. При возникновении термоэлектронной эмиссии катодное падение резко уменьшается и возникает дуговой разряд, характеризуемый малым катодным падением потенциала – примерно 10 В.

Дуговой разряд низкого давления в газах и парах металлов сопровождается равномерным свечением по всей длине лампы.

С повышением давления газа растет число соударений, а вместе с тем и температура нейтрального газа. Благодаря возникающему в этих условиях большому перепаду температуры от оси разряда к стенкам трубки разряд стягивается в яркий светящий шнур.

Высокие экономичность и яркость дугового разряда при сравнительно низких напряжениях на лампе обеспечивает широкие возможности использования его в различных разрядных источниках света.

Так как процесс ионизации является процессом нестабильным, имеющим постоянную тенденцию увеличения, то проводимость среды внутри лампы, а, следовательно, и ток при постоянном напряжении на лампе будут все время возрастать (падающая вольт-амперная характеристика), в связи с чем режим горения лампы становится неустойчивым. Для стабилизации тока в разрядных источниках используется балластное устройство, включаемое последовательно с лампой, падение напряжения в котором компенсирует увеличение проводимости в разрядной трубке и тем самым ограничивает ток, могущий привести к разрешению лампы.

При работе на переменном токе в качестве стабилизирующего устройства обычно применяют индуктивные сопротивления – дроссели (реакторы), включаемые последовательно с разрядной лампой. Преимуществами дросселей по сравнению с резисторами (омическими сопротивлениями) являются меньшие потери электроэнергии (от 10 до 30 % мощности лампы) и возникновение сдвига фаз между напряжением и током, облегчающего повторное зажигание лампы. К недостаткам дросселей следует отнести сравнительно большую массу и габариты, а также снижение коэффициента мощности сети до 0,5–0,6.

Применение резисторов в качестве стабилизирующих устройств при работе разрядных ламп на переменном токе, кроме больших потерь электроэнергии, неблагоприятно сказывается на сроке службы ламп.

Емкостные балласты также применяются редко, так как в таких схемах возникают длительные темновые паузы и толчки тока при повторных зажиганиях лампы.

4.9. Механизм возникновения световых излучений

Как известно, атом вещества состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого на определенных орбитах вращаются электроны. Так как заряды электронов уравновешены зарядом ядра, то в нормальном состоянии атом нейтрален.

Свободные электроны, встречая на своем пути при перемещении к аноду нейтральные атомы и соударяясь с ними, отдают последним свой запас кинетической энергии. Принято различать три возможных следствия соударений электрона с атомами: упругий удар, возбуждение атома и ионизацию, возникновение каждого из которых определяется в первую очередь величиной кинетической энергии движущегося электрона в момент соударения с атомом.

Если энергия электрона невелика, то при столкновении с атомом возникает упругий удар, отчего возрастает скорость атома и как следствие этого повышается температура газа и паров металла, в атмосфере которых происходит процесс. Таким образом, упругие удары являются источником тепловых потерь, которые заметно увеличиваются с повышением давления газа. Источниками тепловых потерь являются не только упругие удары, но и нейтрализация при соударении частиц противоположных зарядов (рекомбинация), а также удары второго рода, т. е. столкновения возбужденного атома с нейтральными атомами и молекулами.

Если энергия электрона достаточно велика, то при столкновении его с атомом может возникнуть возбуждение, либо ионизация атома.

Возбуждение атома заключается в переводе атома с базисного уровня, соответствующего его нормальному состоянию, на более высокий уровень, определяемый энергией, сообщенной атому при соударении с электроном. Достигнув более высокого уровня, атом недолго задерживается на нем (в среднем 10^{-8} с) и возвращается на ближний или базисный уровень, излучая при этом лучистую энергию.

В ряду энергетических уровней, до которых может быть возбужден атом, существуют уровни, с которых возможен возврат атома только на базисный уровень. Эти уровни принято называть резонансными, а излучение, возникающее при переходе атома с такого уровня на базисный, – резонансным излучением. Резонансное излучение характерно для разрядных ламп низкого давления, в которых основной причиной возникновения излучения является соударение быстрых электронов с атомами нейтрального газа.

Следовательно, при низком давлении газа и небольших плотностях тока излучение разрядных ламп будет линейчатым, содержащим в основном резонансные линии данного газа.

При увеличении давления газа и плотности тока большую роль начинают играть процессы ступенчатого возбуждения и ионизации, возникающие при соударении электронов с уже возбужденными атомами и сопровождающиеся переходом возбужденного атома на еще более высокие уровни.

Переход в этом случае атома в нейтральное состояние происходит также ступенями, энергия фотона уменьшается и соответственно увеличивается длина

волны излучения. При этом расширяются линии излучения, увеличивается их интенсивность и появляется сплошной фон излучения.

Таким образом, при повышении давления молекулярного газа и плотности тока повышается удельный вес длинноволнового излучения и увеличивается интенсивность непрерывного фона. Изложенное выше наглядно иллюстрируется кривыми, приведенными на графике рис. 4.11. При низких давлениях около 1 Па (10^{-2} мм рт. ст.) и малых плотностях тока (десятки миллиампер на 1 $см^2$) спектр излучения ртутной лампы носит линейчатый характер (рис. 4.11, *а*). С повышением давления до примерно 0,1 МПа (800 мм рт. ст.) и температуры газа происходит расширение линий и появляется сплошной фон излучения (рис. 4.11, *б*).

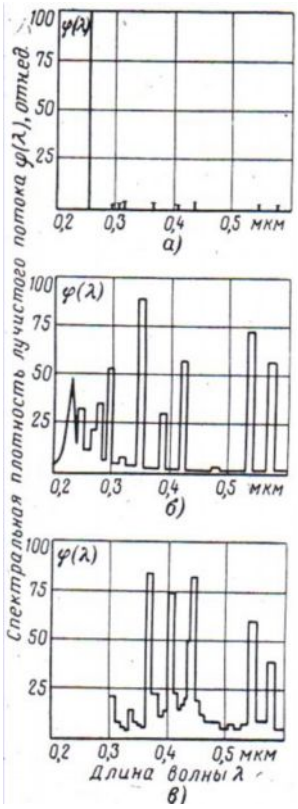


Рис. 4.11. Влияние давления паров ртути на спектральный состав излучения разрядных ламп

При повышении давления сверх 5 МПа (50 ат) наблюдается смещение большей части энергии в длинноволновую часть спектра (рисунок 4.11, *в*).

С изменением давления и плотности тока изменяется и эффективность преобразования электрической энергии в излучение.

4.10. Разрядные лампы массового применения

Люминесцентные лампы. Наиболее широкое распространение в практике осветительной техники нашли люминесцентные ртутные лампы низкого давления и ртутные дуговые лампы высокого давления с исправленной цветностью (ДРЛ).

Люминесцентная лампа низкого давления примерно 1–1,5 Па ($6 \cdot 10^{-3}$–$1 \cdot 10^{2}$ мм рт. ст.) представляет собой цилиндрическую стеклянную трубку (колбу) 1 (рис. 4.12), внутренняя поверхность которой покрыта тонким слоем люминофора твердого кристаллического порошкообразного вещества. По обоим концам трубки укреплены электроды *2* в виде вольфрамовой биспирали или триспирали, концы которых выведены к цоколям *3* со штырьками.

После откачки колба лампы наполняется дозированным количеством ртути и инертным газом, обычно аргоном, при давлении около 400 Па (3 мм рт. ст.), основным назначением которого является уменьшение распыления электродов в процессе работы и облегчение зажигания лампы.

В люминесцентных лампах преобразование электрической энергии в световые излучения имеет две фазы. Электрический ток, протекая между электродами лампы, вызывает электрический разряд в парах ртути, наполняющих колбу люминесцентной лампы, сопровождающийся излучением (электролюминесценция).



Рис. 4.12. Общий вид люминесцентной лампы

Возникающая при этом лучистая энергия, воздействуя на люминофор, нанесенный на стенках колбы лампы, преобразуется в световое излучение (фотолюминесценция).

Излучение люминесцентной лампы состоит из непрерывной полосы свечения люминофора, на которую накладываются отдельные линии излучения ртутного разряда, составляющие около 10 % полного излучения лампы.

В люминесцентных лампах низкого давления применяют люминофоры с максимумом спектральной чувствительности в области резонансного излучения ртути с длинами волн 254 и 185 нм, на которые приходится более 60 % энергии, излучаемой ртутным разрядом низкого давления. Излучение люминофоров, предназначенных для люминесцентных ламп, должно охватывать всю область видимых излучений и характеризоваться высоким квантовым выходом.

В люминесцентных лампах общего применения используется в качестве лиминофора галофосфат кальция, активированный сурьмой и марганцем.

В современной люминесцентной лампе (мощностью 40 Вт) приблизительно 63,5 % потребляемой энергии превращается в ультрафиолетовые излучения (линии 254 и 185 нм), 34,5 % энергии расходуется на тепловые потери и приблизительно 2 % энергии превращается непосредственно в видимые излучения.

Ультрафиолетовое излучение частично преобразуется люминофорами в видимое излучение (за вычетом тепловых потерь). С учетом этого вторичного

преобразования энергии можно приближенно считать, что на долю видимых излучений приходится около 20–21 % энергии, подводимой к лампе.

При этом условии максимальная световая отдача белых люминесцентных ламп составляет 60–70 лм/Вт, что значительно превышает световую отдачу ламп накаливания.

В настоящее время нашей промышленностью выпускается пять типов люминесцентных ламп, отличающихся по цветности: лампы улучшенного спектрального состава (ЛДЦ), лампы дневные (ЛД), лампы белые (ЛБ), лампы холодно-белые (ЛХБ) и лампы тепло-белые (ЛТБ).

Люминесцентные лампы каждого типа выпускаются мощностью 15, 20, 30, 40, 65 и 80 Вт. В зависимости от мощности ламп меняются их длина и диаметр. В табл. 4.2 приведены основные размеры люминесцентных ламп выпускаемых нашей промышленностью.

Таблица 4.2

Основные размеры люминесцентных ламп

Мощность лампы, Вт…	15	20	30	40	65	80
Длина лампы (без штырьков), мм	437,4	589,8	894,6	1199,4	1500	1500
Диаметр, мм	27	40	27	40	40	40

Ртутные лампы высокого давления с исправленной цветностью (ДРЛ).

Применение ртутных ламп высокого давления 0,3–1,5 МПа (3–15 ат) для целей освещения весьма заманчиво, так как такие лампы обладают высокой световой отдачей (50–60 лм/Вт), большой продолжительностью горения (10–16 тыс. ч), компактный могут изготовляться на различные мощности.

Наряду с этими преимуществами для ртутных ламп высокого давления характерно отсутствие излучений в красной части области видимых излучений (ртутный разряд), что заметно искажает цветопередачу красных и оранжевых тонов.

Лампы ДРЛ представляют собой кварцевую разрядную трубку *1*, установленную внутри стеклянной колбы *2* (рис. 4.12). В разрядную трубку вводятся дозированное количество ртути и аргон для облегчения зажигания и улучшения условий работы электродов *3*, установленных по концам разрядной трубки.

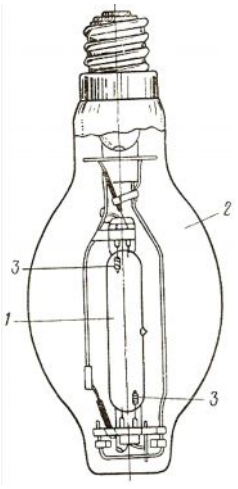


Рис. 4.13. Ртутная лампа высокого давления ДРЛ

Стеклянная колба в виде грушеобразного баллона служит для изоляции разрядной трубки от окружающей среды. На внутренней поверхности колбы нанесен люминофор, преобразующий излучение ртутного разряда в видимое.

Нашей промышленностью выпускается шесть типоразмеров ламп ДРЛ мощностью 80, 125, 250, 400, 700 и 1000 Вт. Основные размеры ламп ДРЛ приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Основные размеры ламп ДРЛ

Тип лампы	Мощность, Вт	Размеры	
		Полная длина, мм	Диаметр, мм
ДРЛ 80	80	81	165
ДРЛ 125	125	91	184
ДРЛ 250	250	91	227
ДРЛ 400	400	122	292
ДРЛ 700	700	152	368
ДРЛ 1000	1000	181	410

Световые характеристики ламп ДРЛ приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Основные электрические и световые характеристики ламп ДРЛ

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм				
		после 100 ч горения		после 2 000 ч горения		Средний после 5 250 ч горения
		номи-нальный	предель-ный	средний	каждой лампы	
ДРЛ 80	80	3 200	2 880	2 560	2 300	2 240
ДРЛ 125	125	5 600	5 040	4 480	4 030	3 920
ДРЛ 250	250	12 500	11 250	10 000	9 000	8 750
ДРЛ 400	400	22 000	19 800	17 600	15 840	15 400
ДРЛ 700	700	38 500	34 650	30 800	27 720	26 950
ДРЛ 1000	1000	55 000	49 500	44 000	39 600	38 500

П р и м е ч а н и е. Данные приведены для 1/I 1974 г. В настоящее время световые потоки ламп ниже в среднем на 15 %.

Как следует из таблицы, лампы ДРЛ обладают высокой световой отдачей, значительно превышающей световую отдачу ламп накаливания. Средняя продолжительность горения ламп ДРЛ должна быть не менее 7 500 ч, причем до 2 250 ч должно догорать не менее 70 % ламп. Продолжительность горения каждой лампы должна быть не менее 2 000 ч.

Устойчивый режим работы лампы и номинальный световой поток устанавливаются через 5–7 мин после включения лампы. Повторное зажигание погасшей лампы возможно лишь после ее остывания, т. е. через 10–15 мин.

Несмотря на наличие люминофора, компенсирующего недостаток излучения ламп ДРЛ в красной части спектра, цветопередача при освещении этими лампами не может быть признана удовлетворительной, в особенности при различении оранжевых и красных цветов.

В последние годы наметились пути существенного улучшения характеристик ламп ДРЛ за счет применения излучающих галогенидных добавок к парам ртути в виде смеси йодидов натрия, таллия и индия.

Такие лампы, получившие название металлогалоидных ламп, конструктивно не отличаются от ламп ДРЛ. Галогенидные добавки, помещенные в разрядной трубке, дополняют спектр излучения ртути желтой линией натрия, зеленой линией таллия и синими линиями индия, что не только повышает световую отдачу в 1,5–2 раза, но и существенно улучшает цветопередачу по сравнению с лампами ДРЛ.

Разработаны металлогалоидные лампы (ДРИ) мощностью 250, 500 и 700 Вт со световой отдачей 65–75 лм/Вт и сроком службы 1–3 тыс ч. Дальнейшее совершенствование ламп ДРИ ведется в направлении увеличения срока их службы, что повышает конкурентоспособность ламп ДРИ в сравнении с лампами ДРЛ.

4.11. Специальные разрядные лампы

Наряду с люминесцентными лампами массового применения в последние годы появились специальные люминесцентные лампы с отражающим слоем, а также цветные люминесцентные лампы.

К лампам с отражающим слоем относятся рефлекторные и щелевые лампы. В *рефлекторных лампах* часть внутренней цилиндрической поверхности стеклянной колбы покрывается белым порошкообразным слоем окиси титана, выполняющим роль отражателя.

Такие лампы-светильники могут эффективно использоваться для освещения пыльных помещений, в которых пыль, оседая на поверхность обычной люминесцентной лампы, приводит к заметному снижению излучаемого ею светового потока.

В рефлекторных и в особенности в щелевых лампах удается получить значительное увеличение яркости и силы света в определенных направлениях по сравнению с обычными люминесцентными лампами. Световой поток таких ламп меньше потока обычных люминесцентных ламп и зависит от отражающих свойств и угла охвата колбы отражающим слоем.

Для декоративного освещения применяются цветные люминесцентные лампы. По конструкции и размерам цветные люминесцентные лампы не отличаются от обычных люминесцентных ламп.

Бактерицидные и *эритемные лампы*. В ртутном разряде низкого давления приблизительно 55 % энергии приходится на линию 254 нм. Это излучение

характеризуется сильным бактерицидным действием и поэтому широко используется в различных облучательных установок для обеззараживания воздуха, для воды, пищевых продуктов и другие.

Бактерицидные лампы выпускаются двух типов: ДБ30-1 и ДБ60 мощностью 30 и 60 Вт в габаритах люминесцентной лампы 30 Вт.

Эритемные лампы представляют собой люминесцентную ртутную лампу низкого давления, излучающую в области 350–370 нм. Конструктивно эритемные лампы не отличаются от обычных люминесцентных ламп и изготовляются мощностью 30 Вт. В качестве люминофора в эритемных лампах используется фосфат кальция, активированный таллием с небольшим процентным содержанием цинка. Для изготовления ламп используется специальное стекло, прозрачное для ближнего ультрафиолетового излучения.

Ртутно-накальные лампы (лампы смешанного света). Лампы подобного типа включаются непосредственно в сеть напряжением 220 В без дросселя, что весьма удобно с эксплуатационной точки зрения. В связи с тем, что в ртутно-накальной лампе значительная часть мощности приходится на вольфрамовую спираль, ее световая отдача значительно ниже, чем у ртутных ламп высокого давления, и составляет 18–20 лм/Вт.

Для увеличения световой отдачи и улучшения цветопередачи ртутно-накальных ламп на внутреннюю поверхность стеклянной колбы наносят люминофор, излучающий преимущественно в красной части спектра. Световая отдача ртутно-накальных ламп с люминофором составляет 27–33 лм/Вт, срок службы 3–5 тыс. ч. Лампы выпускаются мощностью от 150 до 1 000 Вт и более.

Натриевые лампы. В современных натриевых лампах используется резонансное излучение паров натрия при низком давлении 0,5–1,2 Па (0,004–0,009 мм рт. ст.).

Излучение натриевых ламп приходится на длине волн 589,0 и 589,6 нм; таким образом эти лампы излучают практически монохроматический желтый цвет, что позволяет использовать их для целей освещения лишь в исключительных случаях, например для освещения автострад, декоративного освещения и прочие.

Натриевые лампы требуют высокого напряжения для зажигания и одновременно имеют резко выраженную падающую вольт-амперную характеристику. Для надежного зажигания и стабилизации разряда лампа включается в электрическую сеть через повышающий автотрансформатор с рассеянием. Время разгорания ламп составляет от 4 до 15 мин. Продолжительность горения современных натриевых ламп составляет от 3 до 5 тыс. ч.

В лампах ДНА-140 используются самокалящиеся триспиральные вольфрамовые электроды. Мощность ламп 140 Вт, световая отдача 95–110 лм/Вт.

Ксеноновые лампы. Важной особенностью разряда в инертных газах (аргоне, криптоне, ксеноне) является непрерывный спектр излучения. В видимой части спектра излучение ксеноновой лампы очень близко к солнечному и соответствует излучению черного тела при температуре 6 050–

6 300 К, что обеспечивает хорошую цветопередачу освещаемых объектов. Возрастающая вольт-амперная характеристика ксеноновых ламп в отличие от характеристики ртутного дугового разряда позволяет стабилизировать разряд простейшими балластами или они могут работать вовсе без балласта.

Ксеноновая лампа с воздушным охлаждением представляет собой прямую трубку из кварцевого толстостенного стекла. С обоих концов трубки вмонтированы электроды из торированного вольфрама. Диаметр трубки составляет 22–27 мм, длина зависит от мощности лампы.

В табл. 4.5 приведены основные характеристики трубчатых ксеноновых ламп ДКсТ.

Напряжение зажигания трубчатых ксеноновых ламп значительно превышает напряжение питающей сети, поэтому зажигание лампы осуществляется при помощи искрового генератора, падающего на зажимы лампы импульс высокого напряжения высокой частоты.

Таблица 4.5

Основные характеристики трубчатых ксеноновых ламп ДКсТ с воздушным охлаждением

Тип лампы	Мощность, Вт	Напряжение сети, В	Световая отдача, лм/Вт
ДКсТ-5000	5 000	110	17,6
ДКсТ-5000	10 000	220	22
ДКсТ-5000	20 000	380	27,5

Период разгорания у лампы практически отсутствует. Повторное зажигание лампы возможно лишь спустя 5–10 мин, т. е. после полного ее остывания. Продолжительность горения ламп составляет от 500 до 2 000 ч.

Контрольные вопросы

1. Напишите формулу силы света.
2. Чем измеряется сила света?
3. Единицы силы света и телесного угла.
4. Краткое описание силы света.
5. Единицы измерения освещенности.
6. Что такое цветность излучения?
7. Как строят кривые сила света?
8. Как определяется освещенность элемента поверхности в заданной точке?
9. Чем измеряется освещенность и светимость?
10. Напишите формулу спектральной плотности.
11. Для чего служит закон смещения Вина?
12. Что такое тепловое излучение?
13. Формула энергетической светимости.
14. От чего зависит световая эффективность полного излучателя?
15. Для чего предназначены электрические лампы накаливания?

16. Назовите основные характеристики лампы накаливания.
17. Объясните физическую сущность процесса электрического разряда.
18. Из каких основных частей состоит люминесцентная лампа низкого давления?
19. Как происходит преобразования электрической энергии в световые излучения?
20. Типы люминесцентных ламп?
21. Лампы, каких мощностей выпускаются промышленностью?
22. Основные элементы лампы ДРЛ?
23. Разрядные лампы массового применения
24. Специальные разрядные лампы

5. СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. УСЛОВИЯ РАССМАТРИВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА

5.1. Общие положения

Измерения световых характеристик источников света и осветительных приборов, а также характеристик условий освещения помещений и открытых пространств могут осуществляться зрительными или физическими методами.

В первом случае индикатором является глаз человека, во втором – различного рода физические приборы: фотоэлементы, фотоэлектронные множители, болометры и пр.

Зрительная (субъективная) фотометрия основывается на способности глаза оценивать с достаточно высокой степенью точности равенство яркостей двух *оптических смежных* и близких по цветности *полей сравнения*.

Сущность действия приборов, предназначенных для зрительной фотометрии, может быть пояснена схемой, приведенной на рис. 5.1. Если между двумя источниками *1* и *2* поместить трехгранную призму *3* из диффузно рассеивающего материала (например, гипса), то, смотря на ребро призмы, мы будем видеть одновременно обе ее грани, причем яркости граней зависят от сил света источников и их расстояний до призмы.

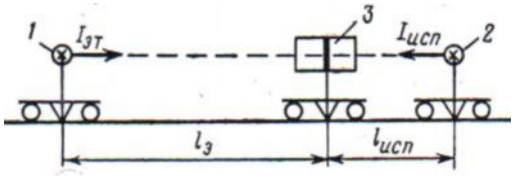


Рис. 5.1. Схема линейного фотометра:
1 – испытуемый источник; 2 – эталонный источник; 3 – призма (фотометрическая головка)

Перемещая призму на участке между двумя источниками при неизменном положении ее граней по отношению к направлению лучей, падающих от источников, можно добиться равенства яркостей обеих граней призмы.

Равенство яркостей граней призмы, выполненной из однородного диффузно рассеивающего материала, будет, очевидно, соответствовать и равенству освещенностей, что дает возможность определить силу света одного из источников, если известна сила света другого источника эталона.

Высокая точность измерений методами зрительной фотометрии достигается при условии соблюдения определенных требований. К числу основных из них следует отнести требование соответствия спектральной чувствительности глаза наблюдателя нормализованной функции относительной спектральной световой эффективности излучения.

Не менее важным является требование достаточной яркости полей сравнения, обеспечивающей работу глаза в условиях дневного зрения.

Практически яркость полей сравнения не должна быть менее 5–10 кд·м$^{-2}$, а также не должна превышать 30–50 кд·м$^{-2}$, так как при больших значениях яркости полей сравнения и низкой яркости окружающего фона, при которой

обычно проводятся световые измерения, глаз подвергается чрезмерному раздражению.

Стремление использовать при зрительной фотометрии лишь колбочковый аппарат и исключить палочковый, расположенный в основном по периферии сетчатой оболочки, заставляет ограничивать угловой размер поля зрения таких приборов пределами $3–5^0$.

Следует также иметь в виду, что точность зрительных световых измерений значительно понижается, если цветность сравниваемых излучений различна. В подобных случаях для повышения точности измерений приходится прибегать к специальным приемам измерений.

Необходимость строгого выполнения перечисленных требований, зависимость результатов измерений от индивидуальных особенностей наблюдателя, состояния его организма (физическое состояние, усталость) и окружающих условий, а также длительность процесса измерения привели в практических условиях к полной замене глаза как индикатора физическими приборами, т. е. к переходу от зрительной фотометрии к физической (объективной) фотометрии.

Основное преимущество физических приемников лучистой энергии по сравнению с глазом заключается в их способности непосредственной количественной оценки измеряемых величин. Применительно к измерению световых величин это качество, однако, присуще лишь таким физическим приемникам, кривая спектральной чувствительности которых близка к кривой относительной спектральной световой эффективности.

Широкое развитие методов *физической фотометрии* в настоящее время определяется также и тем, что физические приемники позволяют осуществлять измерения не только в видимой части спектра, но и в прилегающих к нему участках ультрафиолетовых и инфракрасных излучений.

Существенным преимуществом методов физической фотометрии является быстрота и воспроизводимость результатов измерений, что особенно важно при необходимости проведения массовых измерений световых характеристик осветительных средств (источников света, осветительных) или характеристик условий освещения.

В качестве приемников лучистой энергии в установках физической фотометрии наиболее широкое распространение получили вентильные фотоэлементы (фотоэлементы с запирающим слоем) и фотоэлементы с внешним фотоэффектом.

Под *вентильным фотоэлементом* понимается полупроводниковый прибор, в котором под действием лучистой энергии возникает э.д.с. В цепи фотоэлемента без подключения внешнего напряжения возникает электрический ток, зависящий от падающего на фотоэлемент лучистого потока. Таким образом, вентильные фотоэлементы являются непосредственными преобразователями лучистой энергии в электрическую.

Из числа вентильных фотоэлементов для световых измерений наибольшее распространение получили селеновые фотоэлементы, спектральная

чувствительность которых наиболее близко совпадает с нормализованной кривой относительной спектральной световой эффективности.

Основанием селенового фотоэлемента служит массивная стальная пластинка *1*, на которую нанесен непрозрачный для световых лучей слой селена *2* (рис. 5.2). Поверхность селена покрывается тончайшим (около 5 нм) прозрачным слоем *4* золота или платины. При этом на транш между слоями золота и селена образуется запирающий слой *3*, обладающий односторонней проводимостью от селена к золоту. На слой золота накладывается металлическое кольцо *5*, которое соединяется с отрицательным зажимом фотоэлемента; положительный зажим соединяется со стальной пластинкой.

Под воздействием света из наружного слоя селена освобождаются электроны, которые могут двигаться через запирающий слой лишь в одном направлении – от селена к слою золота. Если замкнуть зажимы фотоэлемента на гальванометр 6, то в цепи возникает электрический ток, направление которого указано на чертеже стрелками.

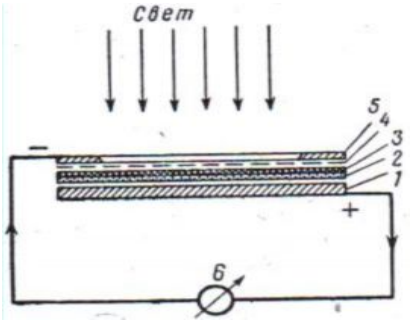


Рис. 5.2. Устройство селенового фотоэлемента

Ток, как было показано Столетовым, пропорционален падающему на поверхность фотоэлемента световому потоку, т. е. освещенности плоскости фотоэлемента, пропорциональность имеет место в режиме короткого замыкания (при сопротивлении внешней цепи, равном нулю). При включении фотоэлемента в цепь гальванометра пропорциональность нарушается, причем это нарушение увеличивается с ростом освещенности, вызывающим уменьшение внутреннего сопротивления селенового фотоэлемента (рис. 5.3).

Существенное преимущество селенового фотоэлемента по сравнению с другими типами фотоэлементов заключается в том, что максимум кривой спектральной чувствительности селенового фотоэлемента расположен вблизи максимума нормализованной кривой относительной спектральной световой эффективности. Практически полное совмещение кривой спектральной чувствительности селенового фотоэлемента с нормализованной кривой относительной спектральной световой эффективности может быть достигнуто применением прозрачных *корригирующих фильтров.*

Интегральная чувствительность селеновых фотоэлементов лежит в пределах от 300 до 750 мкА·лм$^{-1}$ и зависит от материала наружного электрода, покрывающего слой селена. Селеновые фотоэлементы инерционны, т. е. номинальный ток при различных сопротивлениях нагрузки устанавливается в

течение 10^{-2}–10^{-3} с после начала освещения. Ток селенового фотоэлемента зависит от температуры окружающей среды, причем температурный коэффициент для различных фотоэлементов меняется в достаточно широких пределах.

Электровакуумные фотоэлементы с внешним фотоэффектом представляют собой двухэлектродные приборы в стеклянном баллоне сферической или цилиндрической формы. Анод фотоэлемента изготовляется в виде кольца из тонкой никелевой проволоки, который располагается в центре колбы. Катодом фотоэлемента служит светочувствительный слой, нанесенный на внутреннюю поверхность стеклянной колбы или изогнутую в форме полуцилиндра пластинку, что повышает использование светового потока, падающего на катод.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом изображен на рис. 5.4. На внутреннюю поверхность стеклянной колбы *1* распылением нанесен светочувствительный слой, служащий катодом фотоэлемента *2*. Вблизи катода располагается проволочный анод *3*. Катод и анод при помощи герметически впаянных проводников соединяются с контактными штырьками *4*, укрепленными в цоколе элемента *5*.

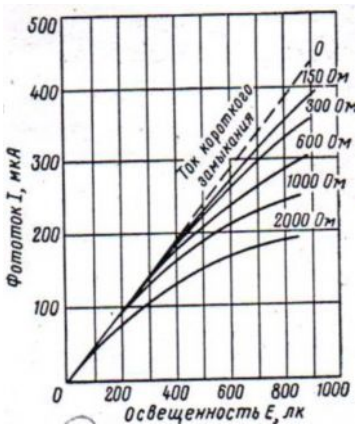


Рис. 5.3. Зависимость фототока селенового фотоэлемента от освещенности при различных сопротивлениях внешней цепи

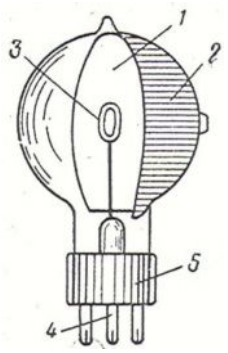


Рис. 5.4. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом делятся на *вакуумные* (электронные), у которых из колбы откачан воздух, и *газонаполненные* (ионные), колба которых после откачки воздуха наполняется инертным газом.

Принцип работы фотоэлемента с внешним эффектом заключается в том, что фотоны, падая на светочувствительный слой фотоэлемента, выбивают из него электроны, которые под действием электрического поля между анодом и катодом летят к аноду, образуя электрический ток в цепи фотоэлемента.

Интегральная чувствительность вакуумных фотоэлементов ниже чем у фотоэлементов с запирающим слоем, и не превышает 80–120 мкА/лм.

В газонаполненных фотоэлементах электроны, вырванные с катода, ионизируют на своем пути к аноду атомы газа, наполняющего колбу фотоэлемента, освождая при этом новые электроны. В результате ионизации

фототок в цепи фотоэлемента возрастает до 6–10-тикратного по сравнению с током аналогичного вакуумного фотоэлемента при тех же уровнях освещенности.

Получены вольт-амперные характеристики газонаполненного и вакуумного фотоэлементов. В вакуумном фотоэлементе при определенном значении анодного напряжения устанавливается постоянный ток насыщения, зависящий от плотности светового потока, падающего на катод. В газонаполненном фотоэлементе наблюдается непрервыный рост фототока с увеличением анодного напряжения, поэтому для предотвращения возникновения другого разряда в цепь газонаполненнго фотоэлемента необходимо включать большое сопротивление, ограничивающее анодное напряжение.

Обладая более высокой интегральной чувствительностью по сравнению с вакуумными фотоэлементами, газонаполненные фотоэлементы имеют и ряд существенных недостатков. Основными из них являются: отсутствие пропорциональности между фотоком и плотностью падающего на катод светового потока, меньшая температурная устойчивость и больший темновой ток по сравнению с вакуумными фотоэлементами.

Световые характеристики газонаполненного и вакуумного фотоэлементов при наличии и отсутствии (R=0) внешнего сопротивления. У вакуумного фотоэлемента пропорциональность между фототоком и световым потоком при включении внешнего сопротивления практически не нарушается. Для газонаполненного фотоэлемента характерно существенное нарушение этой пропорциональности при включении внешнего сопротивления.

Спектральные характеристики вакуумных фотоэлементов определяются в основном материалом светочувствительного слоя катода и способом его обработки.

При измерении малых плотностей лучистого и светового потоков для усиления фототока используются различные электронные усилители, а также фотоэлектронные умножители, в которых достигается с помощью вторичной эмиссии электронов.

5.2. Измерение освещенности

Необходимость в измерениях освещенности возникает на предприятиях (для оценки достаточности освещения рабочих мест), в помещениях общественных зданий, на открытых пространствах, а также в лабораторной обстановке.

Для измерения освещенности применяются специальные фотометрические приборы, получившие название *люксметров*. Простейший фотоэлектрический (объективный) люксметр представляет собой селеновый фотоэлемент, в цепь которого включен стрелочный гальванометр.

Шкала гальванометра градуируется непосредственно в люксах по стандартному источнику A с цветовой температурой T= 2 854 К, спектральный

состав излучения которого приближается к спектральному составу ламп накаливания средней мощности (200–300 Вт).

Возможность измерения малых значений освещенности (около 1 лк) достигается применением гальванометров чувствительностью порядка 10^{-6} А/дел. Для измерения больших освещенностей прибор снабжается шунтами и нейтральными фильтрами, надеваемыми на фотоэлемент.

Для измерения больших уровней освещенности на фотоэлемент прямоугольной формы надевается фильтр, состоящий из двух молочных стекол, между которыми расположена тонкая металлическая решетка. Фильтр повышает пределы измерения приблизительно в 100 раз, что дает возможность измерять освещенности соответственно до 2 500, 10 000 и 50 000 лк. Гальванометр, фотоэлемент и фильтр укладываются в футляр, что обеспечивает удобство при переноске.

При измерении освещенности фотоэлектрическими люксметрами необходимо иметь в виду следующее.

1. При измерении освещенности от люминесцентных ламп или других разрядных источников света люксметром без корригирующего фильтра, отградуированного по эталонному источнику А (лампа накаливания), в показания прибора необходимо вводить поправки, зависящие от спектрального состава излучения источника света.

2. При измерении освещенности от источников света (или светильников), расположенных под небольшими углами к плоскости фотоэлемента (менее 30°), возможно возникновение существенных ошибок. Это определяется тем, что при увеличении угла падения света, отчитываемого от нормали к плоскости фотоэлемента, показания люксметра соответствуют закону изменения освещенности от точечного источника (закон косинуса) лишь в пределах от 0 до 60^0. Поэтому, например, при измерении освещенности в горизонтальной плоскости от низко расположенного удаленного источника следует измерять освещенность в плоскости, перпендикулярной направлению силы света источника, а затем умножать полученное значение освещенности на косинус угла между нормалью к горизонтальной плоскости и направлением на источник света.

3. Со временем наблюдается старение фотоэлемента и уменьшение его интегральной чувствительности. Поэтому для получения достоверных результатов измерения освещенности необходимо осуществлять периодическую градуировку фотоэлектрического люксметра (1–2 раза в год).

4. Внутреннее сопротивление селенового фотоэлемента зависит от его площади и уровня измеряемой освещенности. Для разных конструкций фотоэлементов внутреннее сопротивление составляет от 300 до 2 000 Ом. При увеличении освещенности внутреннее сопротивление селеновых фотоэлементов падает, что нарушает пропорциональность между освещенностью и током, причем тем сильнее, чем больше сопротивление внешней цепи (рис. 5.3). Для сохранения пропорциональности между освещенностью и током фотоэлемента в достаточно широких пределах и для обеспечения наибольшей чувствительности люксметра следует применять

гальванометры, сопротивление которых значительно меньше внутреннего сопротивления фотоэлемента.

5. При измерениях освещенности в температурных условиях, резко отличных от условий, в которых градуировался прибор, необходимо вводить поправку, так как температурный коэффициент у некоторых типов селеновых фотоэлементов достаточно высок.

5.3. Измерение силы света

Для определения и построения характеристик источников света и осветительных приборов необходимо осуществлять измерение силы света и ее распределения в окружающем пространстве. Этой цели служат фотометрические приборы, называемые линейными и распределительными фотометрами.

Линейный фотометр. Основанием фотометра служит *фотометрическая скамья*, состоящая из двух металлических труб, жестко укрепленных на специальных подставках, устанавливаемых на необходимой высоте.

По краям фотометрической скамьи на неподвижных каретках устанавливаются эталонный и испытуемый источники света. Между источниками света на подвижной каретке устанавливается *фотометрическая головка*. Между источниками света и фотометрической головкой располагаются черные экраны с отверстиями, препятствующие попаданию на фотометрическую головку отраженных от стен и потолка помещения световых потоков.

Источники питания, а также электроизмерительная аппаратура и реостаты, необходимые для поддержания постоянства напряжения на источниках света во время измерений, располагаются на столах, служащих одновременно для установки фотометрической скамьи.

При измерении силы света испытуемый источник и эталон неподвижно закрепляются, а фотометрическая головка перемещается на *каретке* по направляющим фотометрической скамьи до тех пор, пока яркости обеих сторон гипсового экрана не уравниваются, и не исчезнет граница, разделяющая поля сравнения.

Субъективное ощущение равенства яркостей обоих полей сравнения соответствует равенству значений освещенности на противоположных сторонах гипсового экрана, создаваемых испытуемым и эталонным источником. В этом случае можно записать следующее соотношение:

$$E_{эт} = E_{исп}. \qquad (5.1)$$

Учитывая, что силы света эталонного и испытуемого источников, расположенных по краям фотометрической скамьи, измеряются строго по нормали к гипсовой пластинке, можно записать:

$$\frac{I_{эт}}{l_{эт}^2} = \frac{I_{исп}}{l_{исп}^2}; \qquad (5.1а)$$

в этих формулах $E_{эт,}$ $E_{исп}$ – освещенности противоположных сторон гипсового экрана, создаваемые эталонным и испытуемым источниками; $I_{эт}$, $I_{исп}$ – значения силы света эталонного и испытуемого источников в направлении к фотометрической головке; $l_{эт}$, $l_{исп}$ – расстояния от эталонного и испытуемого источников до фотометрической головки.

Находя из уравнения (5.1*а*) силу света испытуемого источника, получаем

$$I_{исп} = I_{эт} \frac{l_{исп}^2}{l_{эт}^2}. \qquad (5.2)$$

Таким образом, зная силу света эталона и положение фотометрической головки по отношению к обоим источникам, легко подсчитать силу света испытуемого источника.

В качестве *рабочих эталонов силы света* применяются лампы накаливания особой конструкции.

Измерения силы света на фотометрической скамье могут осуществляться с использованием фотоэлектрических люксметров. В этом случае фотоэлемент устанавливается на место фотометрической головки и освещается испытуемым и эталонным источниками света, последовательно устанавливаемыми на подвижной каретке. Если у прибора существует прямолинейная зависимость между фототоком и освещенностью, то по показаниям прибора сила света испытуемого источника может быть найдена из соотношения:

$$I_{исп} = I_{эт} \frac{n_{исп}}{n_{эт}}, \qquad (5.3)$$

где $n_{исп}$, $n_{эт}$ – показания прибора при освещении фотоэлемента испытуемым и эталонным источниками.

Если прибор не обладает прямолинейной характеристикой «фототок – освещенность», то, перемещая фотоэлемент по отношению к испытуемому и эталонному источникам, устанавливаемым последовательно на конце скамьи, определяют расстояния $l_{исп}$ и $l_{эт}$, при которых показания прибора одинаковы. По найденным расстояниям определяют силу света испытуемого источника, пользуясь уравнением (5.2).

В простейшем случае силу света испытуемого источника можно определить и без эталона, пользуясь показаниями люксметра, выраженными в люксах:

$$I_{исп} = \frac{E}{l_{исп}^2}, \qquad (5.4)$$

где E – освещенность по шкале прибора, лк; $l_{исп}$ – расстояние от испытуемого источника до плоскости фотоэлемента, м.

При измерениях силы света с помощью фотоэлементов необходимо строго следить за тем, чтобы плоскость фотоэлемента была расположена строго перпендикулярно по отношению к оси фотометрической скамьи.

Необходимость построения кривых силы света светильников заставляет измерять значения силы в различных направлениях отражающего светильник пространства.

Для этой цели используются приборы, называемые распределительными фотометрами.

Измерения силы света на распределительном фотометре требуют предварительной тщательной установки и проверки правильности взаимного расположения всех его элементов, что должно гарантировать строго перпендикулярное расположение приемного экрана фотометрической головки или плоскости фотоэлемента к направлению измерения силы света.

5.4. Измерение светового потока

Измерение светового потока источника света осуществляется в шаровых фотометрах. *Шаровой фотометр* представляет собой полый шар, окрашенный внутри белой диффузно отражающей краской.

В зависимости от размера источников света и световых приборов, световой поток которых необходимо измерить, применяют шаровые фотометры диаметром от 0,5 до 2,5 м. Для того чтобы поместить испытуемый источник света внутрь шара, в его стенке прорезается отверстие, закрываемое дверцей, или поверхность делается составной из двух раздвигающихся половинок.

Испытуемый источник света, будучи подвешен внутри шара, посылает свой световой поток во все стороны окружающего пространства. Этот световой поток $\Phi_{исп}$, упав на внутреннюю поверхность шарового фотометра, отразится от него: при этом доля отраженного светового потока будет, очевидно, равна произведению $\rho\Phi_{исп}$, где ρ – коэффициент отражения внутренней поверхности шара.

Световой поток после первого отражения перераспределится и снова упадет на отражающую поверхность. Отразившись вторично от внутренней поверхности шара, этот поток станет равным $\rho\rho\Phi_{исп}$ или $\rho^2\Phi_{исп}$. Дальнейший процесс многократных отражений светового потока будет протекать аналогично, причем доля светового потока каждого последующего отражения будет отличаться от предыдущего на величину коэффициента отражения внутренней поверхности шара.

В итоге многократных отражений светового потока на внутренней поверхности шарового фотометра установится некоторый световой поток Φ.

Величина этого потока может быть определена исходя из закона сохранения энергии, согласно которому световой поток испытуемого источника света должен быть равен потоку, поглощенному внутри шарового фотометра в процессе многократных отражений

$$\Phi_{исп} = \Phi\,(1 - \rho). \qquad (5.5)$$

Коэффициент пропускания поверхности шара принимаем равным нулю.

Решая уравнение (5.5) относительно установившегося светового потока Φ, получаем:

$$\Phi_{исп} = \Phi_{исп}\frac{1}{1-\rho}. \qquad (5.5а)$$

Уравнение (5.5а) можно переписать в виде

$$\Phi = \Phi_{исп} + \frac{\Phi_{исп}\rho}{1-\rho} = \Phi_{исп} + \Phi_0, \qquad (5.5б)$$

где $\Phi_{исп}$ – составляющая прямого потока источника (светильника); $\Phi_о = \rho\Phi_{исп}/(1-\rho)$ – составляющая потока многократных отражений.

Световой поток $\Phi_о$ равномерно распределена по внутренней поверхности шарового фотометра и создает одинаковую освещенность всех ее участков, определяемую уравнением

$$E_{вн} = \frac{\Phi_0}{S_{вн}} = \frac{\rho\Phi_{исп}}{4\pi r^2(1-\rho)}, \qquad (5.6)$$

где r – радиус шара.

Из уравнения (5.6) следует, что освещенность внутренней поверхности шарового фотометра при экранировании прямого светового потока пропорциональна световому потоку испытуемого источника света.

Светимость наружной поверхности молочного стекла может быть выражена через освещенность внутренней поверхности шара как

$$M = E_{вн}\tau.$$

Подставляя полученное соотношение в уравнение (5.6) и решая относительно $\Phi_{исп}$, окончательно получаем

$$\Phi_{исп} = \frac{4\pi r^2(1-\rho)}{\rho\tau}M = cM, \qquad (5.6а)$$

где $c = \frac{4\pi r^2(1-\rho)}{\rho\tau}$ – постоянная шарового фотометра; M – светимость наружной поверхности молочного стекла.

Измерение светимости наружной поверхности стекла обычно осуществляется фотоэлектрическим люксметром.

При измерении светового потока в шаровом фотометре чаще пользуются способом замещения. При этом вначале в шаровом фотометре устанавливается источник с известным световым потоком – эталоном светового потока и

измеряется освещенность $E_{эт}$. Затем устанавливается испытуемый источник и измеряется освещенность вторично $E_{исп}$. Искомый световой поток, очевидно, определится из соотношения

$$\Phi_{исп} = \Phi_{эт} \frac{E_{исп}}{E_{эт}}. \qquad (5.7)$$

Если люксметр имеет прямолинейную характеристику фототок – освещенность, это световой поток испытуемого источника может быть найден по световому потоку эталонного источника и отношению показаний люксметра.

5.5. Общие сведения о колориметрических системах

Есть две принципиально различные системы оценки и представления цвета. Первая – это колориметрическая система, в основе которой лежат основные излучения, смешивая которые, воспроизводят все многообразие цветов (иногда, когда данный цвет визуально имеет тот же цвет, что и смесь основных, этот принцип называют также принципом уравнивания цветов). Некоторые колориметрические системы имеют международную стандартизацию. Вторая – это система спецификации цветов, где цвет имеет материальный носитель в виде окрашенной поверхности и расположенный в определенном порядке. Системы спецификации стандартизуются национальными службами стандартизации. В последнее время эти системы имеют стандартное измерение цветов при определенной цветовой температуре в международных колориметрических системах.

На протяжении всей своей жизни человеку часто приходится иметь дело с оценкой цвета как на бытовом уровне, так и в своей профессиональной деятельности. Работникам телевидения, полиграфической и текстильной промышленности, кинематографистам, дизайнерам, да и многим другим необходимо знать численные характеристики цветов для определения точности воспроизведения цвета. А это значит, что в этих случаях невозможно обойтись без цветовых измерений. Измерение цвета означает выражение его через какие-либо величины, определяющие его место среди множества цветов в некоторой системе.

Учение об измерении цвета называется *метрологией цвета,* или *колориметрией.* Наряду с собственно измерением цвета колориметрия изучает также вопросы его систематизации и математического описания.

Метрология колориметрии задает условия наблюдения и измерения координат цвета. Если координаты двух цветов совершенно одинаковы, то и цвета одинаковы. Однако колориметрия не может дать ответ, насколько точно должны совпадать координаты цвета, чтобы цвета не различались визуально. Эту задачу решает высшая метрика цвета (ВМЦ). Методами высшей метрики цвета определяют различие в координатах двух близких цветов (ΔЕ) или, по-другому, находят малые цветовые различия. Она (ВМЦ) также пытается решить

такие сложные вопросы, как измерение белизны (например, бумаги), степени ахроматичности цвета и влияние цветовой адаптации на восприятие цвета.

5.6. Принципы измерения цвета

Для воспроизведения цвета необходимо знать характеристики как воспроизводимого объекта, так и полученного результата (например, цветной оригинал и его репродукция). В этом случае для оценки качества нельзя обойтись без цветовых измерений, без строгого описания цвета. Учение об измерении цвета называется колориметрией или метрологией цвета.

Теория цвета использует в основном два способа описания цвета – с помощью колориметрических систем и систем спецификаций. В данном разделе будут рассмотрены только принципы построения колориметрических систем. Один из способов определения цвета основан на измерении его по принципу синтеза. В приборах – колориметрах, где реализован этот принцип, с помощью трех основных синтезируется цвет, тождественный измеряемому.

Две грани призмы образуют фотометрическое поле. На одну половину поля направляют измеряемое излучение *Ц*, а на другую – основные *R, G, B*. Регулируя количества основных, цвета обеих половин поля можно уравнять. Зная характеристики светопоглощающих устройств (диафрагмы, клиньев), можно найти количества основных, а по ним – координаты измеряемого цвета. Определив цветовые координаты, легко воспроизвести сам цвет.

Иногда вместо цветовых координат определяют психофизические характеристики цвета: доминирующую длину волны, чистоту цвета и яркость. Их определение основано на том, что спектр содержит все цвета, кроме пурпурных. Поэтому к любому световому пучку можно подобрать спектральный цвет, тождественный измеряемому по цветовому тону.

Длина волны монохроматического излучения, тождественная измеряемому цвету, называется доминирующей длиной волны ($\lambda_{дом}$). Она характеризует цветовой тон цвета *Ц*.

Насыщенность цвета *Ц* характеризуется колориметрической чистотой цвета *p*. Она определяет долю того монохроматического излучения, которое обеспечивает в смеси с белым зрительное тождество с рассматриваемым излучением (цветом), вычисляется по формуле

$$P = \frac{B_\lambda}{B_\lambda + B_б},$$

где B_λ – яркость монохроматического излучения; $B_б$ – яркость белого излучения.

И наконец, светлота в колориметрии определяется через яркость *B*, которая является количественной характеристикой цвета. Она зависит от количества излучения, необходимого для получения на эталонной грани призмы монохроматического излучения, не отличимого от цвета *Ц* по светлоте.

5.7. Основы построения колориметрических систем

Одним из главных требований метрологии (в частности, и метрологии цвета) является то, что результаты измерений должны быть однозначными и воспроизводимыми. Под однозначностью понимают способность одной и той же величины всегда давать одинаковые значения, под воспроизводимостью – сопоставимость полученных результатов измерений. Для удовлетворения этих условий необходимо, чтобы измерения проводились в одних и тех же условиях, принятых за норму. Совокупность нормированных условий измерений цвета составляет колориметрическую систему.

В колориметрии нормируют те условия, которые непосредственно влияют на результат: цветность основных, количества основных, уровень яркости, размеры фотометрического поля.

Принцип построения колориметрических систем основывается на одном из законов Грасмана (Грасман Герман немецкий математик, физик и филолог), согласно которому любой цвет может быть выражен тремя, если они линейно независимы. Этому требованию отвечают излучения синего, зеленого и красного цветов, называемых *триадными*. Учитывая еще ряд требований, выбор основных ограничили определенными интервалами спектра и длин волн.

С уровнем яркости и размером фотометрического поля связана контрастная чувствительность глаза. В связи с этим два объекта разного цвета, различимые при одной яркости, могут оказаться неразличимыми при другой, когда чувствительность глаза понижена. Поэтому уровни колориметрических измерений нормируют таким образом, чтобы уровень яркости был оптимальным по отношению к чувствительности и человеческого глаза.

5.8. Основная физиологическая система КЗС

Выбор основных цветов, ограниченный лишь условием линейной независимости между ними, позволяет иметь неограниченно большое количество колориметрических систем.

Одной из таких систем является основная физиологическая система *КЗС*. В этой системе координаты цвета *К, З* и *С* – уровни возбуждения трех приемников глаза в единичных значениях *К З С* – компонентов цвета. Особенность физиологической системы заключается в том, что в отличие от всех других систем (в том числе и тех, которые будут рассматриваться дальше) в ней любой цвет не только выражается суммой трех основных, но и определяется уровнем соотношением реакций трех цветоощущающих рецепторов глаза. В связи с этим особая важность данной системы там, где есть необходимость анализа реакций цветоощущающих рецепторов, цветовой адаптации и т. д. Основная трудность построения данной системы заключается в невозможности точного измерения спектральной чувствительности каждого из трех цветоощущающих рецепторов.

5.9. Основы колориметрической системы (*CIERGB*)

Первая колориметрическая система *RGB* была предложена и принята в 1931 г., международной комиссией по освещению (МКО), в литературе часто вместо МКО используется аббревиатура CIE от французского *Commision Internationale de I'Eclairage*. Выбор основных цветов этой системы осуществлялся исходя из следующих требований.

1. Выбранные основные должны легко воспроизводиться.
2. Каждый из выбранных основных должен возбуждать по возможности лишь одну группу цветоощущающих рецепторов.

Учитывая год разработки первой колориметрической системы, следует отметить, что в то время наиболее воспроизводимыми считались излучения газосветных ламп, из которых с помощью светофильтров легко выделялись монохроматические излучения. В связи с этим CIE в качестве основных были выбраны цвета следующих излучений: красное (λ_R=700 нм), выделяемое красным светофильтром из лампы накаливания; зеленое (λ_G=546,1 нм) линия *e* в спектре ртутной лампы; синее (λ_B=435,8 нм) линия *g* в спектре ртутной лампы. Цвета этих излучений получили соответственно названия *R (red), G (green), B (blue),* а колориметрическая система – *CIERGB*.

Количественные характеристики основных цветов *CIERGB* выражают как яркостными энергетическими, так и световыми величинами. Для колориметрических измерений удобнее выбирать единицы световых величин таким образом, чтобы одинаковые количества основных давали белый цвет. Это один из основных принципов синтеза в колориметрии.

Кривые сложения $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ и $\bar{b}(\lambda)$, и представляют собой распределение по спектру цветовых координат R_λ, G_λ и B_λ монохроматических излучений мощностью 1 Вт ($\Phi_{o\lambda}$). Поэтому значения ординат кривых сложения называют *удельными*, т. е. отнесенными к единице мощности.

В *CIERGB* ординаты кривых сложения (удельные координаты) были установлены опытным путем. Экспериментально нахождение удельных координат осуществлялось путем подбора смеси излучений основных *RGB* к спектральным излучениям произвольной мощности и последующего деления их координат на мощность:

$$\bar{r}_\lambda = R_\lambda / \Phi_{0\lambda};\ \bar{g}_\lambda = G_\lambda / \Phi_{0\lambda};\ \bar{b}_\lambda = B_\lambda / \Phi_{0\lambda}.$$

5.10. Основы стандартной колориметрической системы XYZ (*CIEXYZ*)

Одновременно с колориметрической системой *CIERGB* была принята еще одна. В качестве основных в ней были выбраны цвета более насыщенные, чем спектральные. В связи с тем, что таких цветов в природе нет, их обозначили символами *XYZ*, а сама колориметрическая система получила название *CIEXYZ*.

К разработке этой колориметрической системы побудил ряд причин, связанных с некоторыми неудобствами при работе с системой *CIERGB*.

Одним из недостатков *CIERGB* является наличие отрицательных координат для целого ряда реальных цветов, что затрудняет расчет цветовых характеристик по спектральным кривым. Другой существенный недостаток системы *CIERGB* – необходимость определения всех трех составляющих цвета для определения количественной характеристики цвета – яркости.

В связи с этим в основу построения колориметрической системы *XYZ* были положены следующие положения:

1) все реальные цвета должны иметь только положительные координаты;

2) яркость должна определяться одной координатой цвета;

3) координаты белого цвета равноэнергетического источника Е должны быть равны между собой.

Ординаты кривых сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ имеют тот же смысл, что ординаты кривых в системе *CIERGB*:

$$\bar{x}_\lambda = X_\lambda / \Phi_{0\lambda};\ \bar{y}_\lambda = Y_\lambda / \Phi_{0\lambda};\ \bar{z}_\lambda = Z_\lambda / \Phi_{0\lambda}.$$

Считается, что цветоразличительная способность человеческого зрения была выработана в процессе эволюции как одна из основных защитных систем организма. Цвет необходимо измерить и данные измерения использовать в производстве для регулирования процессов и для получения конечного продукта. Поскольку конечным продуктом является цветное изображение, предназначенное для рассматривания, нормируются условия рассматривания и соответствующие им условия измерения.

5.11. Условия рассматривания

Цветные образцы полиграфической и фотографической продукции могут рассматриваться непосредственно глазом или с использованием просмотровых устройств. Они также могут использоваться для технических целей, например печать с негатива на позитив в фотографии. Цветные иллюстрации предназначены для рассматривания невооруженным глазом в отраженном свете. Поэтому с точки зрения эффективности измеряемых плотностей необходимо знать соответствующие оптимальные условия рассматривания и измерения.

Наиболее удобно рассматривать отпечатки, когда направление зрения перпендикулярно их поверхности. Если иллюстрация освещается направленным светом, то свет должен падать под углом 45^0, чтобы исключить возможные блики. Выпускаются специальные осветительные установки для рассматривания отпечатков в отраженном свете с учетом вышесказанного, а также с нормированием уровня освещенности и цветовой температуры (при работе с глянцевыми изображениями или свежеотпечатанными дополнительно устанавливается поляризационный светофильтр, как при рассматривании, так и при измерении). Для рассматривания образцов, «слайдов», проходящем свете

также используются специальные осветительные установки с освещением рассеянным светом определенного уровня яркости и цветовой температуры. В комплект такой аппаратуры обычно добавляют нейтрально-серые рамки определенной плотности для уменьшения фонового освещения и комплект оптических клиньев для визуального контроля.

5.12. Классификация способов измерения цвета

Чтобы правильно воспроизвести цвет, его необходимо измерить. Необходимо также контролировать процесс тиражирования данного изображения цвета.

В полиграфии, фотографии и других отраслях науки и техники измерение цвета может осуществляться в зависимости от цели двумя способами: колориметрически и денситометрически.

Денситометрические измерения проводят с использованием денситометров, работающих в проходящем или отраженном свете, а также «оцифровывают» изображение с помощью сканеров.

Колориметрические измерения бывают *визуальные*, *фотоэлектрические*, *спектральные*:

а) первые выполняются с использованием визуального колориметра или атласа цветов;

б) вторые выполняются с использованием спектрально-согласованного или спектрально-несогласованного фотоэлектрического колориметра;

в) спектральные измерения производятся в автоматическом режиме в спектроколориметре или производится расчет по измеренной спектральной кривой образца и таблицам для расчета координат цвета.

Предложенное деление достаточно условно, на самом деле существуют общие принципы измерения и управления цветом, но для конкретных перечисленных способов существуют некие нюансы.

Прежде чем рассматривать конкретные способы измерения, необходимо вспомнить такие термины, как *метамерность* и *изомерность*. На этих двух понятиях основана сама возможность воспроизведения и измерения цвета любым способом. Они обычно относятся к получаемым или сравниваемым цветам, причем цветам зрительно одинаковым, и еще чаще – к излучениям, вызывающим ощущение одинаковых цветов. Часто (и неправильно) понятие «метамерность» относят к окраске предмета и изменению цвета этого предмета в зависимости от цветовой температуры освещения. Напомним, что два цвета метамерны, т. е. одинаковые по цвету, если световые пучки, вызвавшие ощущение одинаковости этих цветов, различны по спектральному составу. Из определения следует, что метамерные цвета необходимо сравнивать визуально или путем измерения на колориметре.

Если цвета по спектральному составу совершенно одинаковы, то их называют *изомерными*, например цвета оттисков полиграфического тиража, напечетанного одной триадой красок.

Итак: явление метамерности позволяет получать заданный цвет различными способами, поэтому контролировать правильность процесса цветовоспроизведения необходимо колориметрически. Изомерность важна для контроля стабильности технологического процесса цветовоспроизведения и позволяет использовать для этого денситометры.

5.13. Цветные денситометры, особенности измерения цветовых величин

Для измерения оптических плотностей в проходящем или в отраженном свете в полиграфии и фотографии используются денситометры трех видов:

а) денситометры для измерения в проходящем свете;

б) денситометры для измерения в отраженном свете;

в) универсальные денситометры для измерения и в проходящем, и в отраженном свете.

При измерении в проходящем свете измеряемый прозрачный образец помещается между источником света и фотоприемником на измерительный стол и производятся измерения оптической плотности. Используется формула $D_\tau = \lg(F_0 / F_\tau)$.

При измерении в отраженном свете измеряемый непрозрачный образец помещается на белую поверхность, измерения производятся фотометрической головкой, которая освещает образец определенным образом и она же собирает отраженный свет. В этом случае оптическая плотность определяется по формуле $D_\rho = \lg(F_0 / F_\rho)$.

В универсальных денситометрах есть и измерительный стол для измерения D_τ и фотометрическая головка для измерения D_ρ. Общим является блок обработки данных и индикации.

При измерении на денситометре оптические плотности полей изображений, рассеивающих свет, определяются не только светопоглощением. Величина плотности зависит также от оптико-геометрических и спектральных условий освещения и регистрации света приемником, поэтому эти условия регламентируются стандартами.

В проходящем свете стандартизируются геометрия измерения для двух типов оптических плотностей: *диффузной оптической плотности* и *регулярной оптической плотности*.

В последние 15–30 лет предложен «колориметрический» подход к стандартизации метода измерения. Стандартизируются не спектральная характеристика зональных светофильтров, а так называемые «статусы». По своей сути это относительные спектральные актиничности денситометра за измерительным комплектом светофильтров, или, как их еще называют, «реакция фотоприемника денситометра».

Контрольные вопросы

1. Какими методами измеряется световые характеристики источников света?
2. Классификация фотоэлементов с внешним фотоэффектом.
3. Для чего используются электронные усилители при измерении световых потоков?
4. Где возникают необходимость измерения освещенности?
5. Из каких параметров зависит сопротивление селенового фотоэлемента?
6. Принципы измерения цвета.
7. Основы построения колориметрических систем.
8. Основная физиологическая система *КЗС*.
9. Основы колориметрической системы (*CIERGB*).
10. Основы стандартной колориметрической системы XYZ (*CIEXYZ*).
11. Условия рассматривания.
12. Классификация способов измерения цвета (визуальные, фотоэлектрические, спектральные).
13. Колориметрический способ.
14. Денситометрический способ.
15. Метамерность.
6. Изомерность.
7. Денситометры.

6. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СВЕТОВОМ ПОЛЕ И ВЕКТОРЕ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ

6.1. Светотехнические величины светового поля

Чтобы определить любую светотехническую величину в данной точке светового поля, достаточно иметь распределение яркости в пространстве, окружающем эту точку. Принимая выбранную точку за центр, можно построить тело распределения яркости, откладывая значения яркостей окружающим поверхностей и источников по соответствующим направлениям пространства и проводя кривую через полученные точки поверхностей. Диафрагмы имеют отверстия A_1 и A_2 такие, что изменение положения точки $Б_1$ в пределах диафрагмы не оказывает заметного влияния на значение телесных углов ω_1, имеющих вершины в точках $Б_1$, и опирающихся на соответствующие отверстия диафрагм *1* и *2* (рис. 6.1). Однако размеры отверстий настолько велики, что явление дифракции отсутствует. Пусть мы имеем светящую поверхность или светящий объем, расположенные за первой диафрагмой (рис. 6.1).

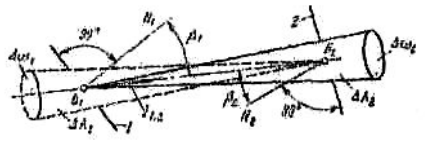


Рис. 6.1

Выделяем пучок лучей двумя диафрагмами, отвечающими ранее сформулированным условиям. Определим телесный угол

$$\Delta\omega_2 = \frac{\Delta A_2 \cos\beta_2}{b_{12}^2}. \qquad (6.1)$$

Световой поток лучей, проходящих через обе диафрагмы

$$\Delta\Phi_{12} = \Delta I_{12}\Delta\omega_2 = \frac{L_{12}\Delta A_1 \Delta A_2 \cos\omega_1 \cos\omega_2}{b_{12}^2}, \qquad (6.2)$$

где L_{12} – яркость пучка лучей – яркость объема или поверхности, расположенной за диафрагмой *I*, в направлении к точке $Б_2$ (см. рис. 6.1); I_{12} – сила света, излучаемая через первую диафрагму в направлении к точке $Б_2$, расположенной в отверстии второй диафрагмы.

Остальные величины, входящие в выражение (6.2), ясны из рис. 6.1. Из выражения (6.2) определим яркость пучка лучей:

$$L_{12} = \frac{\Delta\Phi_{12} b_{12}^2}{\Delta A_1 \Delta A_2 \cos\beta_1 \cos\beta_2} = \frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta G}, \qquad (6.3)$$

где G – мера множества (геометрический фактор) лучей пучка

$$\Delta G = \frac{\Delta A_1 \Delta A_2 \cos\omega_1 \cos\omega_2}{b_{12}^2} = const, \qquad (6.4)$$

для любых двух сечений пучка лучей. Если взять отверстия в диафрагмах бесконечно малыми, то выражение (6.3) примет следующий вид:

$$L_{12} = \frac{d\Phi_{12} b_{12}^2}{dA_1 dA_2 \cos\beta_1 \cos\beta_2} = \frac{d\Phi_{12}}{dG}, \qquad (6.5)$$

где L_{12} – яркость в направлении оси $Б_1Б_2$ элементарного пучка лучей; dG – мера множества (геометрический фактор) лучей элементарного пучка.

Яркость в направлении элементарного пучка лучей *М*. Планк назвал яркостью луча.

Выражение (6.2) можно записать в следующем виде:

$$L_{12} = \frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta\omega_1 \Delta A_2 \cos\beta_2} = \frac{\Delta E_н}{\Delta\omega}, \qquad (6.6)$$

где $E_н$ – освещенность в точке A_2 на площадке, перпендикулярной оси лучка лучей (нормальная освещенность).

Уменьшая отверстия в диафрагмах, можем получить следующее выражение

$$L_{12} d\omega = dE_{12}. \qquad (6.7)$$

В дальнейшем под нормальной освещенностью будем понимать освещенность элементарной площадки, расположенной перпендикулярно падающему на нее световому лучу.

Несмотря на то, что тело распределения яркости однозначно определяет световое поле в данной точке пространства, им пользоваться неудобно, так как поле в каждой точке характеризуется не одним, а многими значениями яркости.

6.2. Интегральные характеристики светового поля

В последнее время все чаще и чаще начинают пользоваться интегральными характеристиками светового поля. Н. Г. Болдырев (рис. 6.2) предложил общий вид интегральной характеристики светового поля:

$$C = \int_{\omega} L_{\beta\varphi} f(\beta) d\omega, \qquad (6.8)$$

где $L_{\beta\varphi}$ – яркость пространства в направлении, определяемом углами φ и β (рис. 6.2); $f(\beta)$ – функция, определяющая ценность излучения, поступающего с данного направления на выбранную поверхность, расположенную в данной точке светового поля; $d\omega$ – элементарный телесный угол, в пределах которого из данной точки пространства виден участок поверхности с яркостью $L_{\beta\varphi}$.

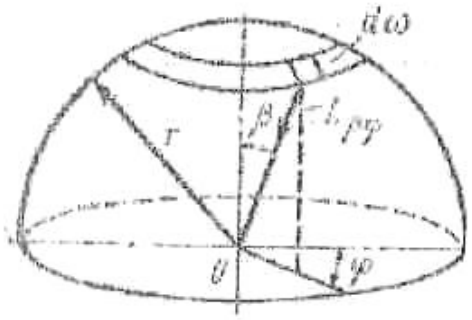


Рис. 6.2

Очевидно, что интегральная характеристика светового поля определяет среднюю освещенность выбранной поверхности, расположенной в данной точке поля. Размеры тела, среднюю освещенность поверхности которого определяет уравнение (6.8), малы и световое поле не искажает.

Функция ценности излучения $f(\beta)$ зависит от положения точечного источника, освещающего выбранную поверхность, и формы этой поверхности. Функция ценности определяется отношением σ/A, где σ – проекция выбранной поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению от точечного источника к точке *Б*, для которой определяется интегральная характеристика; *A* – выбранная поверхность, расположенная в окрестностях точки *Б*, средняя освещенность которой является интегральной характеристикой светового поля в этой точке. Если мы имеем равнояркие излучающие поверхности, а это поверхности, с которыми часто приходится иметь дело, то выражение (6.2) упрощается:

$$C = L\int_{\omega} f(\beta)d\omega\,. \qquad (6.9)$$

1. Освещенность плоскости *E*. Функция ценности

$$f(\beta) = \frac{\Delta A\cos\beta}{\Delta A}\cos\beta\,; \quad E = \int_{\omega} L_{\beta\varphi}\cos\beta d\omega = \int_{\omega} dE_{н}\cos\beta,$$

где ω – телесный угол, в пределах которого расположена излучающая свет поверхность, в поле которой определяется освещенность.

2. Пространственная освещенность E_0 предложена Вебером в 1916 г. По определению пространственная освещенность в данной точке светового поля равна сумме нормальных освещенностей. Значит, $f(\beta) = 1$,

$$E_0 = \int_{\omega} L_{\beta\varphi} d\omega = \int_{\omega} dE_н. \qquad (6.10)$$

3. Средняя сферическая освещенность $E_{4\pi}$ – средняя освещенность поверхности сферы малого радиуса. Эту интегральную характеристику предложил Гершун. Функция ценности этой характеристики

$$f(\beta) = \frac{\pi r^2}{4\pi r^2} = \frac{1}{4};\ E_0 = \frac{1}{4}\int_{\omega} dE_н = \frac{1}{4}E_0\,, \qquad (6.11)$$

где r – радиус сферы.

4. Средняя полусферическая освещенность $E_{2\pi}$ это средняя освещенность сферической части поверхности полусферы исчезающего радиуса предложена Гершуном).

Функция ценности этой характеристики

$$f(\beta) = \frac{\pi r^2}{4\pi r^2}(1+\cos\beta) = \frac{1}{4}(1+\cos\beta). \qquad (6.12)$$

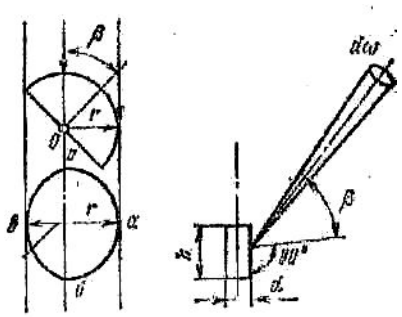


Рисунок 6.3

На рис. 6.3 показана проекция полусферической поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению, определенному углом падения света β. Часть проекции оаб равна 0,5 πr^2, а овб – половине площади эллипса 0,5 πr^2 cos β. Выражение, определяющее среднюю полусферическую освещенность, имеет вид

$$E_0 = \frac{1}{4}\int_{\omega} L_{\beta\varphi}(1+\cos\beta)d\omega = E_{4\pi} + \frac{1}{4}\int_{\omega} dE_н \cos\beta, \qquad (6.13)$$

где E_0 – освещенность плоскости основания полусферы; $dE_н$ – нормальная освещенность – освещенность площади, перпендикулярной оси телесного угла $d\omega$.

Средняя полусферическая освещенность зависит как от расположения точки, для которой она определяется, так и от ориентации полусферы. За ориентацию полусферы обычно принимается положение ее основания.

6.3. Световой вектор

Мгновенные значения мощности, переносимой через замкнутую поверхность, охватывающую данную точку электромагнитного поля, характеризует вектор Умова-Пойнтинга. Этот вектор равен векторному произведению векторов электрической и магнитной напряженностей поля

$$\vec{P} = [\vec{\varepsilon}\,\vec{H}]. \qquad (6.14)$$

При изучении светового поля светотехники обычно не пользуются мгновенными характеристиками, в то время как макроскопические по времени характеристики представляют для них большой интерес. Поэтому, несмотря на то, что электромагнитное поле было хорошо изучено и величины, его характеризующие, установились, А. А. Гершун и М. М. Гуревич ввели новую величину для характеристики светового поля, которую назвали световым вектором. «В каждой точке светового поля всегда имеется вектор, независимый от выбора координатных осей, обладающий тем свойством, что проекция его на любое направление численно равна разности освещенностей двух сторон плоского элемента, помещенного в данной точке перпендикулярно этому направлению».

Световой вектор определяет значение и направление переноса светового потока в данной точке поля через единицу площади, перпендикулярной направлению переноса. Для определения модуля и направления светового вектора в данной точке пространства достаточно знать распределение яркости в пространстве, окружающей эту точку. Если мы имеем точечный источник,

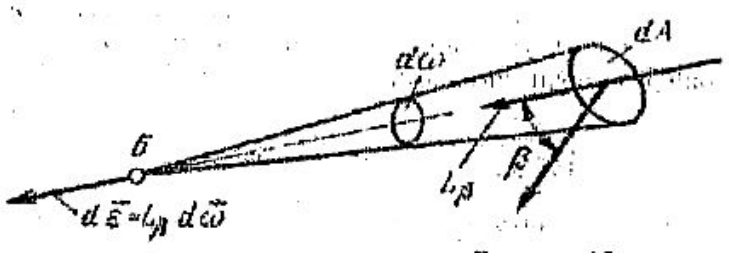


Рис. 6.4

который виден из точки *Б* под элементарным телесным углом $d\omega$ (рис. 6.4), то световой вектор, создаваемый в точке *Б* этим источником, по модулю равен нормальной освещенности, а по направлению будет совпадать с осью

элементарного телесного угла $d\omega$. Его можно откладывать как в направлении распространения излучения, так и в обратном. Условились за направление светового вектора принимать направление распространения излучения.

Принято характеризовать светораспределение линейного источника света поперечной и продольной кривыми силы света участка линейного источника длиной 1 м.

Силу света такого участка под углом γ обозначают I_γ и находят по поперечной кривой силы света. Угол γ отсчитывается от вертикали к плоскости полосы (рис. 6.5), Силу света линейного источника длиной 1 м в продольной плоскости, проходящей через ось линейного источника в направлении к точке *Б*, запишем в таком виде

$$I_{\gamma\alpha} = I_\gamma \cos^N \alpha, \qquad (6.15)$$

где N – положительное число, имеющее значения от 1 до 3: для различных люминесцентных светильников.

Продольная кривая силы света участка длиной dy линейного источника описывается следующим выражением:

$$dI_{\gamma\alpha} = I_\gamma \cos^N \alpha dy. \qquad (6.16)$$

Определим в точке *Б* интересующие нас характеристики светового поля линейного источника света.

Пространственная и средняя сферическая освещенности. Определим нормальную освещенность $dE_н$ в точке *Б*, создаваемую элементом поверхности линейного источника длиной dy:

$$dE_н = dI_{\gamma\alpha} / \mathrm{b}^2 = I_\alpha \cos^N \alpha dy / b^2. \qquad (6.17)$$

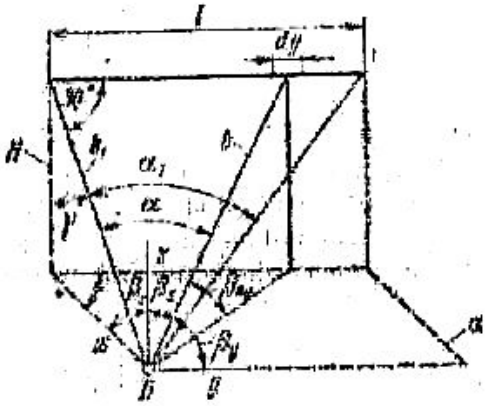


Рис. 6.5

Это выражение является основным, используя его, можно получить все интегральные характеристики, модуль и направление светового вектора в точке

Б поля линейного источника света. Выразим компоненты уравнения (6.17) через одну переменную величину *a* и постоянные величины, определяющие положение точки *Б* относительно линейного источника света:

$$b = b_1 / \cos\alpha\,; \quad y = b_1 tg\alpha\,; \quad dy = b_1 d\alpha / \cos^2\alpha.$$

Проводим соответствующие замены и приводим (6.17), к функции одной переменной величины α:

$$dE_n = (I_\gamma / \mathrm{b}_1)\cos^N \alpha d\alpha. \tag{6.18}$$

Определим косинусы углов падения света на координатные плоскости в точке *Б* (см. 6.15):

$$cos\beta_x = a/b = sin\gamma cos\alpha;\ \ cos\beta_y = sin\alpha;$$
$$cos\beta_z = H/b = cos\gamma\, cos\alpha. \tag{6.19}$$

Интегрируя (6.18) от 0 до α_1, определяем создаваемую линейным источником в точке *Б* пространственную освещенность E_o

$$E_0 = I_\gamma / b_1 \int_0^{\alpha_1} \cos^N \alpha d\alpha. \tag{6.20}$$

Средняя сферическая освещенность

$$E_{4\pi} = E_0 / 4. \tag{6.21}$$

Средняя полусферическая освещенность. Используя (6.15) и (6.18), находим среднюю полусферическую освещенность $E_{2\pi}$ с горизонтальной ориентацией:

$$E_{2\pi} = E_{4\pi} + \frac{I_\gamma}{4b_1}\int_0^{\alpha_1} \cos^N \alpha \cos\beta_z d\alpha = E_{4\pi} + \frac{I_\gamma}{4b_1}\cos\gamma \int_0^{\alpha_1} \cos^{N+1} \alpha d\alpha. \tag{6.22}$$

Заменяя в (6.22) $cos\beta r$ на косинус угла падения света на произвольно ориентированное основание полусферы, получаем выражение, описывающее $E_{2\pi}$ с произвольной ориентацией.

Средняя цилиндрическая освещенность. Используя (6.16) и (6.18), находим выражения, описывающие среднюю цилиндрическую освещенность $E_ц$:

$$\mathrm{E_ц} = \frac{1}{4}\int_0^{\alpha_1} dE \cos\beta_{xy} = \frac{I_\gamma}{\pi b_1}\int_0^{\alpha_1} \cos^N \alpha \cos\beta_{xy} d\alpha = \frac{I_\gamma}{\pi b_1}\int_0^{\alpha_1} \cos^N \alpha \sqrt{1 - \cos^2\gamma \cos^2\alpha}\, d\alpha. \tag{6.23}$$

Контрольные вопросы:

1. Что означает L в формуле светового потока лучей?
2. Что определяет интегральная характеристика светового поля?

3. От чего зависит средняя полусферическая освещенность?
4. Выражение, определяющее среднюю полусферическую освещенность.
5. Назовите основные характеристики светового поля?
6. Что такое световой вектор?
7. Какой ученый ввел основные характеристики световому вектору?
8.Формула сферической освещенности.
9. Назовите различия между световым вектором и световым полем.
10. Назовите основные характеристики светового вектора?

7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

7.1. Выбор напряжения и источников питания.

Для питания светильников общего освещения применяются электрические сети переменного тока напряжением: при заземленной нейтрали не выше 380/220 В, при изолированной не выше 220 В, при постоянном токе не больше 220 В.

В основном широко применяются осветительные сети переменного тока с заземленной нейтралью. Сети с изолированной нейтралью используются в основном в специальных установках при повышенных требованиях к электробезопасности, а постоянный ток – для резервного питания особо ответственных осветительных приемников и в специальных электроустановках.

В последние годы для производственных предприятий стала применяться система трехфазного тока напряжения 660/380 В с заземленной нейтралью. Согласно ПУЭ допускается использование такого напряжения для питания светильников – линейное при системе 380/220 В и фазное при 660/380 В.

Напряжение 380 В для питания светильников общего освещения допускается при высоте установки светильников не менее 2,5 м над полом в случаях, когда: светильники комплектуются лампами, напряжение которых 380 В (например, лампы ДРЛ мощностью 2000 Вт); электрические схемы светильников требуют применения напряжения 380 В (схема с последовательным включением люминесцентных ламп или с трехфазными ПРА); лампы в многоламповых светильниках по условиям эксплуатации подключаются к нескольким фазам.

При питании сетей напряжением 380 В вводы в светильники и ПРА выполняют медными проводниками с изоляцией на напряжение не ниже 660 В; в помещениях с повышенной опасностью и в особо опасных помещениях все фазные провода, вводимые в светильники, отключаются одновременно, а на корпус светильника наносятся хорошо различимые знаки «380 В». В помещениях с повышенной опасностью запрещается ввод в светильники и ПРА двух и трех фаз при системе 660/380 В.

В помещениях опасных и особо опасных вводятся ограничения по применению напряжения 127 и 220 В для светильников общего освещения с лампами накаливания и ДРЛ. Одно из них заключается в том, что при высоте установки светильника менее 2,5 м конструкция их должна исключать возможность доступа к лампам без применения какого-либо приспособления или инструмента (специального ключа, отвертки, плоскогубцев и т. д.). Это вызвано необходимостью повышения электробезопасности людей, не квалифицированных в области обслуживания электроустановок. Оно не обязательно для специально подготовленного персонала.

Напряжение 42 В применяется в особо опасных помещениях (сырых, загроможденных и т. д.) при установке светильников на высоте до 1,8 м над полом независимо от конструкции светильника.

Для питания светильников местного стационарного освещения с лампами накаливания в помещениях без повышенной опасности рекомендуется применение напряжения не выше 220 В, а в остальных случаях, в том числе для освещения, встроенного в электрические щиты, камеры, в бункеры и прочее оборудование, – напряжение не выше 42 В.

Для местного освещения допускается включение люминесцентных светильников на напряжение до 220 В во всех помещениях, за исключением сырых, жарких и с химически активной средой.

Для питания светильников местного стационарного освещения с лампами накаливания и ручных переносных в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных используется напряжение не выше 42 В.

При неблагоприятных условиях, увеличивающих опасность поражения током, например неудобное положение работающего, теснота, соприкосновение человека с большими металлическими массами, в таких помещениях, как котельные, сталеплавильные цехи, в водопроводных туннелях и т. д., должны применяться сети с напряжением не свыше 12 В.

В настоящее время для питания местного освещения, поставляемого комплектно с металлообрабатывающими станками, применяется напряжение 24 В.

Для обеспечения надежной работы газоразрядных ламп напряжение на них не должно быть ниже 90 % номинального, а наибольшее – не более 105 % номинального. Частота колебаний напряжения у ламп рабочего освещения при изменениях менее 1 % не ограничивается, а более 1 % их допустимую частоту определяют в зависимости от величины колебания напряжения по формуле

$$n = 6/(u_i - 1), \qquad (7.1)$$

где n – наибольшее допустимое число колебаний напряжения, ч; u_i – значение колебания напряжения, %.

Указанное требование не распространяется на лампы местного освещения, обслуживающие станок или механизм, если резкие изменения напряжения связаны с работой их электродвигателей. При резко переменном характере нагрузок отдельных установок допускаются колебания напряжения до 1,5 % при неограниченной их частоте.

Питание осветительной сети осуществляется от трансформаторов. При напряжении силовых приемников 380 В питание установок должно осуществляться от трансформаторов 380/220 В, общих для силовой и осветительных нагрузок.

При напряжении силовых приемников 660 В должен производиться обоснованный выбор питания между самостоятельными осветительными трансформаторами 380/220 и 220/127 В, питаемыми от сети высокого напряжения, и промежуточными, питаемыми через силовые трансформаторы.

При напряжении светильников 380 В можно использовать сети 660/380 В.

Применение самостоятельных осветительных трансформаторов необходимо лишь тогда, когда силовая нагрузка вызывает недопустимые колебания напряжения или напряжение 380/220 В – 220/127 В нельзя принять по условиям безопасности (некоторые подземные выработки, где не применяют напряжение более 3×127 В). Совмещение трансформаторов для силовой и осветительной нагрузок уменьшает их общее число и суммарную установленную мощность, сокращает количество аппаратуры и объем помещений подстанций, а также позволяет упростить общую схему электроснабжения.

Питание установок малого напряжения (12–42 В) производится от одно- и трехфазных понижающих трансформаторов, питаемых напряжением 220, 380/220 или 3×220 В от тех же источников, что и общее освещение.

Местное освещение станков осуществляется от осветительных понижающих трансформаторов, поставляемых комплектно с электрооборудованием станка и питаемых от его силовой сети.

У трехфазных понижающих трансформаторов, применяемых для питания осветительных установок малого напряжения (12–42 В), соединяют обмотки на стороне низшего напряжения в звезду или треугольник без выведения нулевой точки. Светильники, питаемые от таких трансформаторов, включают на их линейное напряжение.

7.2. Схемы питания

Требования к надежности питания, качеству напряжения, удобству и безопасности эксплуатации, а также и экономичности осветительных установок могут быть удовлетворены вариантами схем питания. Выбор схемы питания производится только по совокупности всех показателей применительно к конкретным условиям освещения.

Осветительные сети внутреннего освещения разделяются на линии: питающую, прокладываемую от трансформаторных подстанций до групповых щитков, и групповую – от групповых щитков до светильников.

По надежности электроснабжения осветительные установки делятся на три категории.

I категория – перерыв в электроснабжении не допускается или допускается только на время автоматического включения резерва.

Питание этих установок следует обеспечивать от двух независимых источников. Если же перерыв в работе электроснабжения может привести к разрушению особо важного технологического оборудования, угрозе жизни многих людей и т. п., то осветительные установки выделяют в «особую» группу и питаются они от двух независимых источников с переключением части светильников (или включением дополнительных светильников) на третий независимый источник при полном (или частичном) отключении установки. Такими аварийными источниками могут быть: дизельные станции, бензиновые двигатели, аккумуляторные батареи, а также электрические связи с ближайшими независимыми источниками, которые остаются в работе при обесточении предприятия, а в нормальном режиме не используются.

II категория – допускается перерыв в электроснабжении на время, необходимое для ручного включения резерва дежурным персоналом или выездной бригадой.

Такие установки практически обеспечиваются автоматическим вводом резерва (АВР).

III категория – все прочие осветительные установки, в которых допускается перерыв в работе на время ремонта или замены поврежденного элемента в течение суток.

В осветительных установках сохранение полного освещения при выходе из строя одного из источников питания или одной из линий не требуется, поэтому необходимая степень резервации питания установки осуществляется устройством аварийного освещения.

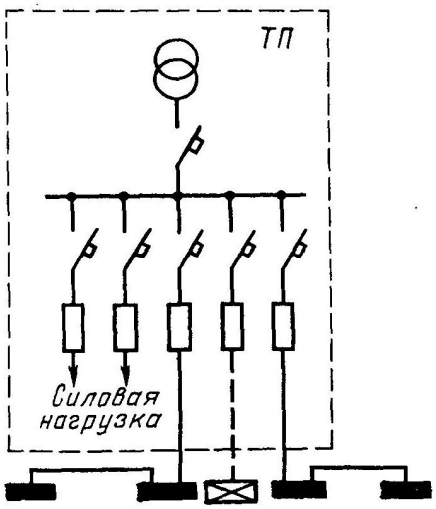


Рис. 7.1. Схема питания осветительной установки от одной автотрансформаторной подстанции

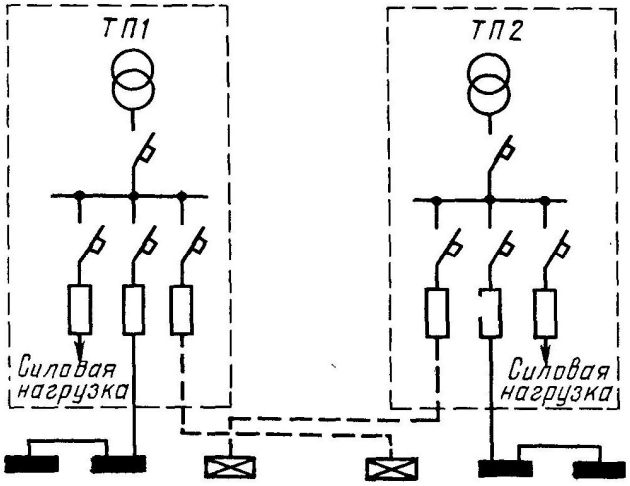


Рис. 7.2. Схема питания осветительной установки от двух подстанций: форматорной подстанции

— щиток рабочего освещения;

— щиток аварийного освещения

— щиток рабочего освещения;

— щиток аварийного освещения

Питание нагрузок III категории может производиться от одной однотрансформаторной подстанции. Все виды нагрузки (силовая, рабочее и аварийное освещение) питаются самостоятельными линиями от шин низшего напряжения подстанции (рис. 7.1) или от ввода в здание.

Погасание всего освещения возможно только при обесточивании трансформатора, т. е. при одновременном отключении силовой нагрузки, когда отпадает необходимость в аварийном освещении. В отдельных зданиях с небольшой нагрузкой можно ввести только одну питающую линию. Аварийное освещение в таких случаях должно питаться от места ввода самостоятельной

сетью. Если в здании кроме осветительного предусмотрен электросиловой ввод, аварийное освещение можно подключать к электросиловому вводу.

Для осветительных установок II категории используется более надежная схема питания. Практически электронагрузки этой категории имеют ту же схему питания, что и нагрузки I категории. В такой ситуации аварийное освещение зданий или их частей питается от одной подстанции, а рабочее от другой (рис. 7.2). Если трансформаторы имеют независимое питание, то данная схема полностью удовлетворяет требованиям к установкам с аварийным освещением. Ее можно рекомендовать и для эвакуационного освещения. Питающие линии аварийного освещения, показанные на рис. 7.2, могут быть присоединены к питающей электросиловой сети.

Широко распространено питание от одной двухтрансформаторной подстанции, когда рабочее и аварийное освещение питаются раздельными сетями от самостоятельных трансформаторов (рис. 7.3).

Так же как и в предыдущей схеме, щитки аварийного освещения могут питаться не самостоятельной сетью, а подключаться к силовой питающей сети. В данной схеме трансформаторы также можно рассматривать в качестве независимых источников питания, если они получают его по независимым системам от разных генераторов. В этом случае схема в отношении надежности не уступает предыдущей с однотрансформаторными подстанциями. Преимущество двухтрансформаторных подстанций заключается в том, что при обесточивании одного из трансформаторов возможно питать нагрузку, в частности рабочее освещение, от другого за счет использования его перегрузочной способности.

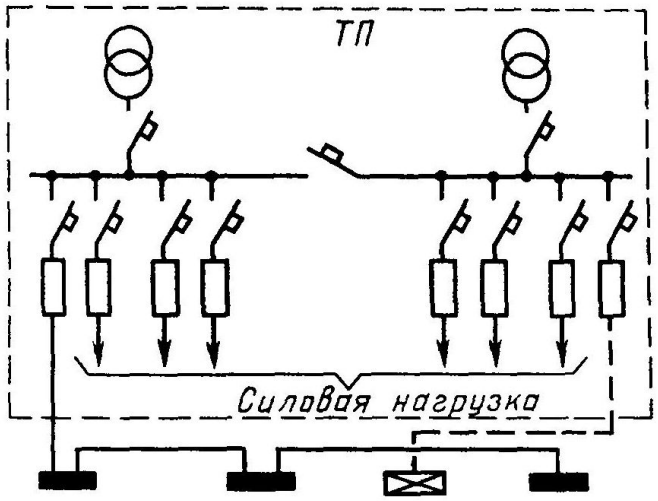


Рис. 7.3. Схема питания осветительной установки от одной двухтрансформаторной подстанции:

— щиток рабочего освещения; — щиток аварийного освещения

Такая схема с автоматическим замещением распространена на встроенных подстанциях производственных предприятий или пристроенных к ним помещениях комплектных трансформаторных подстанций (КТП)

заводского изготовления. Они бывают не только двух-, но и однотрансформаторные и состоят из нескольких соединенных между собой стальных шкафов, в которых размещаются трансформаторы, вводные, межсекционные и линейные автоматы.

В питающих сетях освещения применяются как магистральные, так и радиальные схемы в зависимости от мощности и расположения щитков. При магистральных схемах питания одной линией рекомендуется питать не более 5 щитков.

Ограниченность числа защитных аппаратов на распределительных щитах подстанций и большие значения их номинальных токов в ряде случаев делают необходимым питание групповых щитков от распределительного через магистральный, на котором происходит разделение мощного фидера подстанции (рис. 7.4). Вводы в здание должны быть оборудованы вводными или вводно-распределительными устройствами.

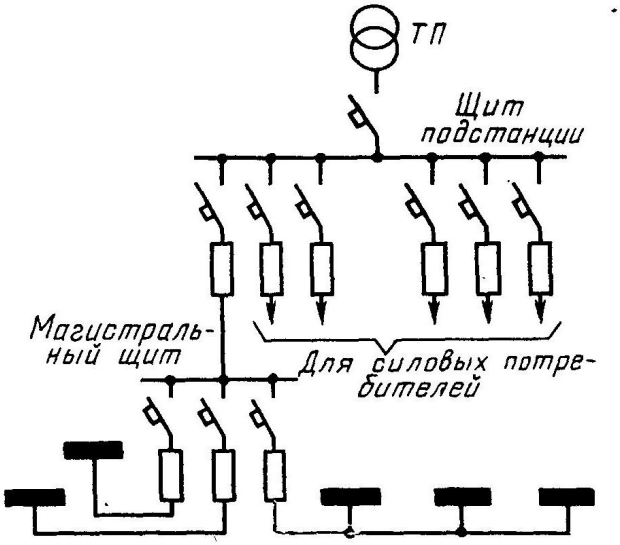


Рис. 7.4. Схема питания освещения через магистральный щиток:

— щиток рабочего освещения

Для зданий, имеющих КТП, такими устройствами могут быть распределительные щиты подстанций, обслуживаемые персоналом потребителя.

7.3. Групповые осветительные сети

Групповые щитки для питания групповых осветительных сетей следует располагать в таком месте, чтобы обеспечить возможно более рациональное и экономичное построение сети с учетом размещения источников питания, управления и т. д.

Щитки рекомендуется располагать в местах постоянно доступных и удобных для обслуживания. Располагая на щитках систему управления

освещением, надо разместить их вблизи основного входа в помещение, чтобы видеть управляемые светильники.

Конструктивное выполнение щитков должно соответствовать условиям окружающей среды. Щитки следует выносить из помещений с тяжелыми условиями среды, а также из взрыво- и пожароопасных помещений и располагать их в помещениях с более благоприятными условиями среды, в помещениях станций управления и на лестничных клетках.

Групповые линии, отходящие от щитков, при трехфазных системах с нулевым проводом можно выполнять: двухпроводными однофазными (рис. 7.5, а, б); трехпроводными двухфазными (рис. 7.5, *в*); четырехпроводными трехфазными (рис. 7.5, *г, д*).

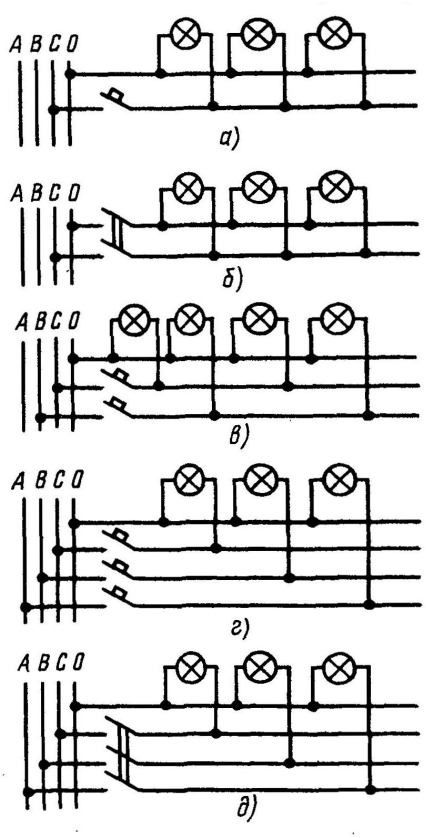


Рис. 7.5. Схемы групповых линий при трехфазной системе с нулевым проводом:
а – двухпроводная; б – двухпроводная для взрывоопасных помещений класса В-1;
в – трехпроводная; г – четырехпроводная, защищаемая однополюсными автоматами;
д – четырехпроводная, защищаемая трехполюсным автоматом

В начале каждой групповой линии сети освещения устанавливают аппараты защиты на всех незаземленных проводах, а во взрывоопасных помещениях класса В-1 также и на нулевых проводах двухпроводных групп. В остальных случаях на нулевых заземленных проводах установка аппаратов защиты запрещается.

Автоматы для трехфазных групповых линий могут быть одно- и трехполюсными (рис. 7.5, *г, д*).

Достоинство однополюсных автоматов в том, что они позволяют выключать светильники отдельными группами и уменьшают число

отключаемых при коротких замыканиях и других неисправностях в светильниках и групповых линиях. Трехполюсные автоматы применяются в том случае, когда: необходимо одновременно отключать все светильники, питаемые трехфазными четырехпроводными группами; к трехфазной групповой линии присоединяется трехфазный конденсатор для повышения коэффициента мощности; необходимо применять автоматы на токи более 50 А, для которых однополюсные автоматы не изготовляются. Трехполюсные автоматы применяются также для линий, питающих трехфазные понижающие трансформаторы. В трехфазных системах без нейтрали, а также с нулевым проводом при питании светильников не фазным, а линейным напряжением, применяются двухпроводные (двухфазные) (рис. 7.6, *а*) и трехпроводные (трехфазные) (рис. 7.6, *б*) групповые линии, для защиты которых рекомендуется применять двух- и трехполюсные автоматы, при необходимости допускаются и однополюсные.

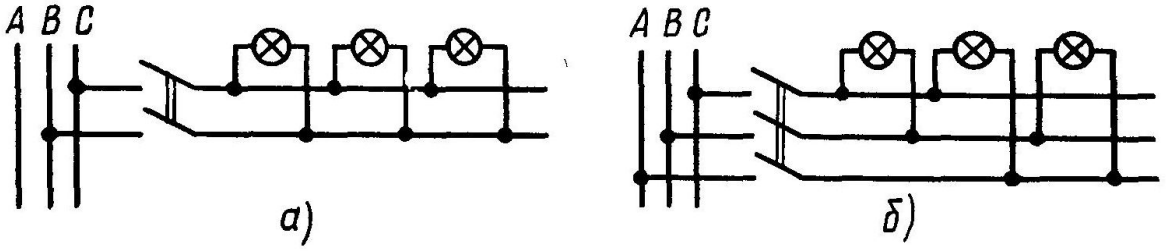


Рис. 7.6. Система групповых линий при трехфазной системе без нулевого провода:
а – двухпроводная; б – трехпроводная

Питание групповых линий малого напряжения 12–42 В от однофазных трансформаторов осуществляется по схеме рисунка 7.6 а, а при питании от трехфазных трансформаторов – по схеме рис. 7.6, *б*.

Количество и мощность светильников, питаемых одной групповой линией, ограничивается нормируемой ПУЭ величиной тока расцепителей автоматов или плавких вставок предохранителей. Так, номинальный ток плавких вставок предохранителей или установок автоматов, применяемых для защиты линий групповой сети, не должен превышать 25 А.

В группах, питающих газоразрядные лампы единичной мощностью 125 Вт и более или лампы накаливания 500 Вт и выше, а также в сетях напряжением не выше 42 В, допускается применение аппаратов защиты с номинальным током до 63 А, а в группах, питающих лампы единичной мощностью 10 кВт и более, – с номинальным током, соответствующим силе тока лампы. В этом случае каждая лампа должна питаться отдельной групповой линией. Кроме того, ПУЭ ограничивается числом ламп на каждую групповую линию. Так, каждая групповая линия должна содержать на фазу не более 20 ламп накаливания, ДРЛ, МГЛ или натриевых ламп, в это число включаются также и штепсельные розетки.

Для групповых линий, питающих световые карнизы, панели и т. д., а также светильники с люминесцентными лампами, допускается присоединение до 50 ламп на фазу; для линий, питающих многоламповые люстры, число ламп

на фазу не ограничивается. При выборе числа фаз групповых линий следует руководствоваться преимуществами, характеризующими каждую из них: трехфазные четырехпроводные линии по сравнению с однофазными позволяют иметь втрое большую нагрузку при одинаковых токах аппаратов защиты, в шесть раз меньшую потерю напряжения в линии при одинаковых моментах нагрузки и сечениях проводов линии, но при вдвое большей протяженности проводов. При трехфазных группах облегчается чередование светильников, что позволяет уменьшить коэффициент пульсации освещенности для газоразрядных ламп типа ДРЛ, МГЛ и НЛВД. Эти преимущества трехфазных линий делают их особенно экономичными в больших производственных помещениях при значительной мощности общего освещения, в помещениях большой протяженности (туннели, галереи и т. п.), а также в помещениях, освещаемых лампами ДРЛ, МГЛ, НЛВД, а в некоторых случаях и люминесцентными лампами, когда не обеспечивается требуемый по нормам коэффициент пульсации освещенности.

Однофазные группы питания целесообразны для небольших помещений с малым количеством светильников небольшой мощности. При большом числе помещений в производственных зданиях общее освещение рекомендуется питать трехфазными группами с однофазными ответвлениями в отдельные помещения.

В цехах большой протяженности при отсутствии необходимости управления освещением по отдельным участкам рекомендуется применение системы распределительных магистралей, прокладываемых вдоль цеха и выполняемых шинопроводами или на изолирующих опорах проводами в трубах.

Токовая нагрузка и число светильников для распределительных магистралей не ограничиваются, но на ответвлениях от них к отдельным светильникам или к их блокам должны устанавливаться аппараты защиты и управления.

В осветительных сетях следует предусматривать компенсацию реактивной мощности с доведения коэффициента мощности до значения не менее 0,9. Такая компенсация в установках с люминесцентными лампами осуществляется конденсаторами в составе ПРА для этих ламп, а с лампами ДРЛ, МГЛ и НЛВД, не имеющими конденсаторов в составе ПРА, установленными у щитков трехфазными конденсаторами отдельно на каждой отходящей группе.

Необходимость компенсации в установках с лампами ДРЛ и МГЛ определяется в зависимости от общего коэффициента мощности в системе электроснабжения предприятия. Если активная мощность присоединенных к трансформатору ламп ДРЛ или МГЛ не превышает 10 % его номинальной мощности, компенсацию производить не рационально.

Ограничить пульсацию освещенности до норм, предусмотренных СНиПом для люминесцентных ламп, можно, применяя компенсированные ПРА; в установках с лампами ДРЛ, МГЛ, НЛВД обязательно использование трехфазных групповых линий с поочередным присоединением ламп к

различным фазам сети. При расстоянии между светильниками меньше рекомендуемого предпочтительно устанавливать в тех же точках блоки из двух, трех светильников, присоединенных к различным фазам сети.

Трассировка линий групповой сети должна обеспечивать удобство монтажа, а при открытой проводке – наглядность и доступность проводки. Для линий, прокладываемых в одном помещении, следует принимать совмещенную трассу и применять объединение нулевых проводов (преимущественно для линий, принадлежащих разным фазам сети). Объединение нулевых проводов рабочего и аварийного освещения, а также нулевых проводов, имеющих защиту, недопустимо.

Линии скрытой проводки рекомендуется прокладывать по кратчайшим расстояниям без соблюдения принципа параллельности строительным линиям. Общие для нескольких линий нулевые провода должны прокладываться в трубах совместно с фазными, а при проводке кабелями или многожильными проводами – заключаются в общую оболочку со всеми фазными проводами или с частью из них. При распределении между фазами однофазных нагрузок следует ограничивать разницу в токах наиболее и наименее нагруженной фазы величиной не более 30 % в пределах одного щитка и 10 % в начале питающей линии.

В схемах питания освещения помещений производственных и общественных зданий, в которых согласно требованиям СНиПа 170 или отраслевых норм предусматриваются линии аварийного или освещения безопасности, следует использовать схемы автоматического переключения освещения с основного (нормального) источника питания на резервный (аварийный) при исчезновении напряжения в основном источнике. Такие переключения имеют место в сетях аварийного освещения для продолжения работы на особо ответственных объектах, например, в операционных блоках, а также для эвакуационного освещения из зданий.

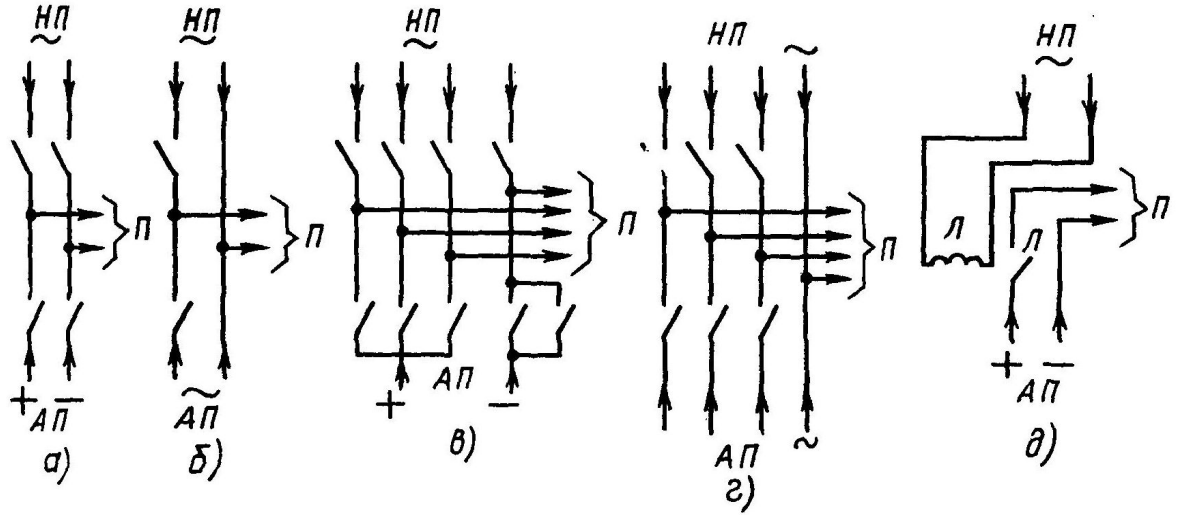


Рис. 7.7. Схема главных цепей станции аварийного переключения:
НП – нормальное питание; АП – аварийное питание; П – потребитель;
Л – контактор автоматического включения аварийного освещения

На рис. 7.7, *а–г* показаны схемы главных цепей станций, применяемых для осветительных сетей. Источником питания рабочего освещения во всех схемах является переменный ток, тогда как для аварийного освещения или освещения безопасности может применяться переменный и постоянный ток. В практике проектирования имеет место схема питания, при которой аварийное освещение при действии рабочего отключено, и питание аварийного автоматически подключается только при отключении рабочего (рис. 7.7, *д*).

Станции аварийного переключения обеспечивают обратное автоматическое переключение (или отключение) освещения при появлении напряжения на основном источнике питания.

7.4. Защита осветительных сетей и выбор аппаратов защиты

Защиту от токов короткого замыкания должны иметь все осветительные сети. Отсутствие защиты может привести к перегреву проводов и кабелей, вызывая пожары, ожоги, поражения током. Защита от перегрузок также необходима во всех случаях, но она значительно повышает стоимость сети, поэтому используется лишь тогда, когда перегрузки наиболее вероятны, а опасность пожара особенно велика. Защита от перегрузок применяется в электрических сетях жилых и общественных зданий, служебно-бытовых, пожаро- и взрывоопасных помещениях промышленных зданий, а также взрывоопасных установках наружного освещения. В остальных производственных помещениях защищать от перегрузок, согласно ПУЭ, надо сети, выполненные открыто проложенными незащищенными изолированными проводами с горючей оболочкой, например АПР, ПРД и т. д.

Защита осветительных сетей осуществляется аппаратами защиты – автоматическими выключателями (автоматами) или плавкими предохранителями, автоматически отключающими линии при аварийном режиме, т. е. токе короткого замыкания. Защитное действие автомата основано на отключении цепи при прохождении по ней тока короткого замыкания или перегрузки, что осуществляется расцепляющим механизмом автомата.

Основной характеристикой автомата является зависимость полного времени отключений сети от значения протекающего тока. В автоматах с тепловыми и комбинированными расцепителями время срабатывания зависит от тока перегрузки или короткого замыкания: чем больше ток, тем быстрее автомат отключает линию (автоматы с обратно зависимой от тока характеристикой). Автоматы с мгновенно действующими расцепителями начинают действовать только после того, как ток достигнет определенного для данного расцепителя значения; обычно этот ток в 6–8 раз больше номинального.

Для защиты осветительных сетей используются автоматы с тепловыми и комбинированными нерегулируемыми расцепителями и только на щитах подстанций применяются автоматы с комбинированными регулируемыми расцепителями. Аппараты защиты должны надежно отключать значительные перегрузки и не производить ложных отключений.

Номинальные токи аппаратов защиты должны быть не менее расчетных токов защищаемых участков сети, близкими к ним, и не отключать электроустановку при включении ламп.

В табл. 7.1 данные, предложенные Г. М. Кнорингом, приведены ориентировочно по выбору плавких вставок предохранителей и уставок автоматов с учетом пусковых токов мощных ламп накаливания и ламп ДРЛ.

При установке нескольких автоматов с тепловыми или комбинированными расцепителями в шкафах или ящиках их номинальные токи должны быть снижены на 10–20 % в зависимости от числа и загрузки автоматов (из-за возможного перегрева, так как расцепители рассчитаны для температуры 25 °С).

Защитные аппараты отключают линии при токах короткого замыкания в минимальное время и с соблюдением требования селективности. В сетях, защищаемых от перегрузки, защита при коротких замыканиях надежно осуществляется аппаратами, выбранными по условиям возможной перегрузки.

Для сетей, не защищенных от перегрузок (выполненных защищенными проводами, кабелями, проводами в трубах в производственных помещениях, не опасных для пожара и взрыва), в установках с глухим заземлением нейтрали при замыканиях в двух- и трехфазных сетях с изолированной нейтралью отключение обеспечивается, если ток короткого замыкания превышает номинальный плавкой вставки предохранителя или расцепителя автомата не менее чем в три раза (автоматы с тепловыми или комбинированными расцепителями).

Таблица 7.1

Тип аппаратов защиты	Отношение номинального тока плавкой вставки или уставки теплового расцепителя автомата к рабочему току линии не менее, для ламп		
Плавкие предохранители	накаливания	ДРЛ	люмине-сценция
	1,0	1,2	1,0
Автоматические выключатели с тепловыми расцепителями с уставками менее 50 А	1,0	1,4	1,0
С уставками 50 А и выше	1,0	1,0	1,0
Автоматические выключатели с комбинированными расцепителями с уставками менее 50 А	1,4	1,4	1,0
С уставками 50 А и выше	1,4	1,0	1,0

Во взрывоопасных помещениях это соотношение должно быть не менее: 4 – при предохранителях и 6 – при автоматах.

При обеспечении соотношения между длительно допустимым током проводника и номинальным током защитного аппарата (таблица 7.2) расчетная проверка кратности токов короткого замыкания необязательна. В этой же таблице приведены аналогичные соотношения при защите сетей от перегрузки. Если сечения, определяемые условиями защиты, оказываются

большими, чем необходимые по расчетному току, то можно принять ближайшие меньшие сечения (но не меньше, чем необходимые по расчетному току). Защита в осветительных сетях должна действовать селективно, т. е. аппараты защиты отключают не питающую его линию, а только поврежденный или перегруженный участок сети.

Таблица 7.2

Проводники	Характеристика помещений, где требуется защита проводников	Нормируемое соотношение $I_п / I_э$ для аппаратов защиты			
		плавкие предохра-нители	автоматические выключатели с обратно зависимой от тока характеристикой		автоматические выключатели с максимальными мгновенно действующими расцепите-лями
			нерегули-руемый расцепи-тель	регулир уемый расце-питель	
Сети, защищаемые: *от токов короткого замыкания*					
Проводники всех типов	Все помещения	≥0,33	≥1,0	≥0,66	≥0,22
от перегрузки					
Открыто проложен-ные изолированн ые провода с горючей оболочкой	Производствен ные невзрывоопасные помещения	≥1,0			
	Другие помещения	≥1,25	≥1,0	≥0,66	≥1,25
Защищен-ные прово-да, кабели с резиновой и пластмассо-вой изоляцией, провода в трубах	Производственные пожароопасные помещения	≥1,0			
	Помещения: торго-вые, служебно-бытовые промышленных предприятий; общественные и жилые здания; взрывоопасные установки	≥1,25	≥1,0	≥0,66	≥1,25
Кабели с бумажной изоляцией	Помещения: пожароопасные, торговые, служебно-бытовые	≥1,0	≥1,0	≥0,8	≥1,0

	промышленных предприятий, общественные и жилые здания; взрывоопасные установки				

Селективность обеспечивается, когда фактическое время срабатывания аппарата защиты в высшем звене сети значительно больше, чем аппарата в низшем. Для получения селективности необходимо, чтобы время отключения большего предохранителя превышало время отключения меньшего не менее чем в три раза.

Аппараты защиты должны устанавливаться в начале головных участков осветительной сети, а также во всех местах сети, где сечение уменьшается: на линиях, отходящих от щитов, щитков и других распределительных устройств; на вводах в здание при питании от отдельно стоящих подстанций; в местах уменьшения сечений проводников по направлению к электроприемникам; на стороне высшего и низшего напряжений понижающих трансформаторов.

По требованию ПУЭ аппараты защиты должны устанавливаться в местах присоединения защищаемых проводников к питающей линии. Допускается отнесение их от места присоединения на расстояние до 3 м, а при ответвлениях в труднодоступных местах – до 30 м. Незащищенные участки следует выполнять кабелями с негорючей оболочкой или проводами в стальных трубах, при длине более 3 м они должны иметь пропускную способность не менее 10 % пропускной способности защищенного участка магистрали.

Во всех случаях сечение проводов незащищенного участка должно пропускать расчетный ток ответвления и быть не меньше сечения проводника после защитного аппарата. В нулевых проводниках защитные и отключающие аппараты не устанавливаются, за исключением нулевых проводников двухпроводных линий во взрывоопасных помещениях классов В-1.

В производственных зданиях широко распространены автоматы разных типов, которыми укомплектовываются щитки и распределительные пункты.

Достоинство автоматов заключается в возможности их использования не только как защитных автоматов, но и как отключающих элементов для управления освещением.

7.5. Управление освещением

Способы управления освещением, т. е. его включением и отключением, выбирают с учетом удобства эксплуатации, простоты и экономичности. Всегда необходимо учитывать наличие естественного освещения и характер его использования. В зависимости от обеспечения зон помещения естественным освещением решается, какими частями должно отключаться искусственное. Аппараты управления рекомендуется устанавливать в местах,

удобных для использования, а также в наиболее благоприятных условиях среды; иногда для этого отводится специальное помещение.

Применяемые способы управления освещением разделяются на четыре вида: местное, централизованное, дистанционное и автоматическое управление.

Местное управление применяется для небольших помещений и выполняется выключателями, переключателями или другими простыми аппаратами. Приборы управления располагают у входов в помещение со стороны дверной ручки или внутри помещения на высоте около 1,5 м от пола. Вне помещений выключатели устанавливают, если внутри условия среды тяжелее, чем снаружи (например, душевые), а также для помещений, часто находящихся закрытыми (кладовые, склады, вентиляционные камеры и т. п.).

Для местного управления наиболее распространены однополюсные выключатели на 6 и 10 А для открытой и скрытой проводки. Местное управление трехфазными понижающими трансформаторами обычно производится трехполюсными выключателями, устанавливаемыми вблизи трансформаторов.

В помещениях с повышенной опасностью и особо опасных при напряжении 3×220 и 220/127 В и питании светильников напряжением 220 В с целью повышения электробезопасности для местного управления применяются двухполюсные пакетные выключатели.

В крупных помещениях целесообразно *централизованное* управление, осуществляемое с групповых щитков автоматами, защищающими групповые линии. Если же эксплуатация допускает включение освещения всего помещения одновременно, то для этого можно использовать вводные аппараты на щитках или аппараты в начале питающих линий.

В очень крупных цехах, где общее освещение питается от нескольких подстанций, по условиям производственной работы и естественного освещения допускается централизованное управление, рекомендуется устройство дистанционного централизованного управления освещением здания или группы зданий из одного места, например, диспетчерской, электромашинного помещения, конторы начальника цеха и т. п.

При устройстве централизованного диспетчерского дистанционного управления (ЦДУ) необходимо продумать распределение нагрузок между щитками и щитков – между цепями управления, с тем чтобы одновременно включалось освещение помещений с одинаковыми условиями естественного освещения и режимом производственной работы.

Дистанционное управление осуществляется магнитными пускателями или контакторами, установленными на щитах станций управления (ЩСУ) или в шкафах управления (ШУ), включенными в цепи линий питающей осветительной сети. В пункте управления предусматривается сигнализация состояния освещения, питаемая через каждый из пускателей или контакторов.

При *автоматическом* управлении включение и отключение искусственного освещения производится без участия человека в зависимости от изменения осветительных условий, создаваемых в помещениях

естественным освещением, или по заданному суточному графику. Для местного освещения применяются индивидуальные отключающие аппараты, устанавливаемые на рабочих местах.

При проектировании управления общим рабочим освещением следует: в помещениях с боковым естественным освещением предусматривать отключение светильников рядами, параллельными окнам; на один выключатель объединять светильники, требующие одновременного действия по условиям производства; в помещениях с несколькими входами, посещаемых специальным персоналом (например, водопроводные, кабельные и теплофикационные туннели), предусматривать управление освещением от каждого входа или части входов.

В производственных помещениях, где работа производится в три смены, могут быть участки, на которых работа в отдельные промежутки времени может не выполняться. Тогда необходимо предусматривать возможность раздельного управления освещением для наиболее вероятных вариантов организации работ по отдельным зонам и участкам помещения.

Следует учитывать необходимость создания пониженной освещенности в нерабочее время для ремонтных и наладочных работ, для этого включают не все светильники сразу, а часть их, например, путем поочередного подключения светильников в трехфазных четырехпроводных и двухфазных трехпроводных групповых линиях или чередования отдельно управляемых рядов светильников.

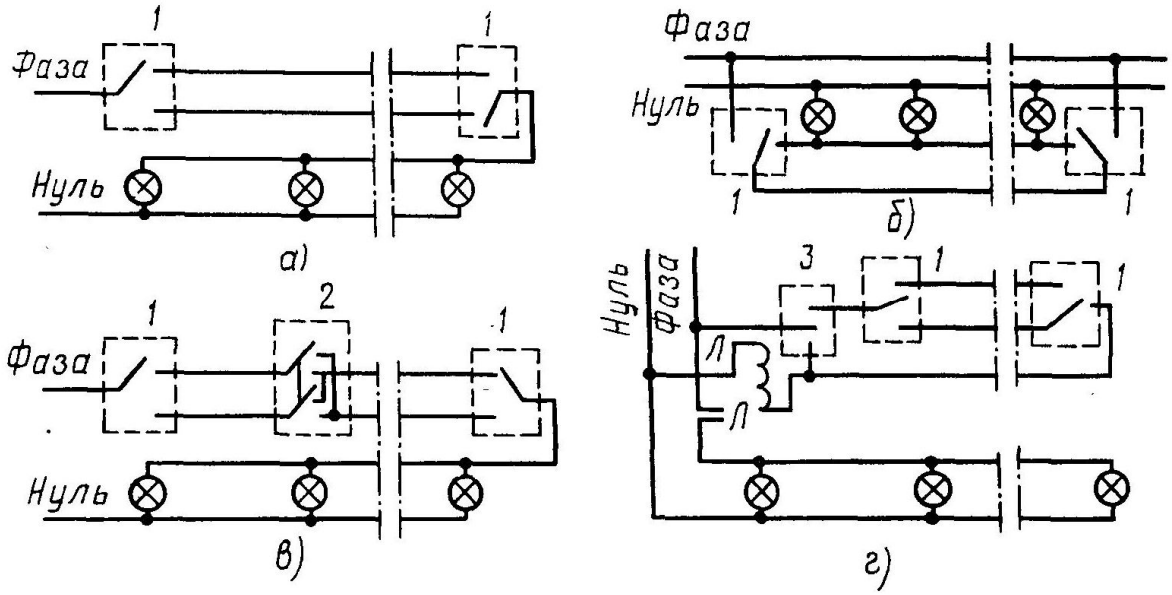


Рис. 7.8. Схема управления освещением:
а – из двух мест; б – из двух мест с транзитной фазой; в – из трех мест; г – с помощью пускателей, реле или контакторов (для управления их катушками применяются схемы а, б, в)

Для протяженных помещений с несколькими входами, не используемыми как постоянные проходы (кабельные галереи и туннели, галереи шинопроводов и т. п.), управление рекомендуется осуществлять со всех

возможных входов по «коридорной» схеме (рис. 7.8, *а)* при использовании однополюсного переключателя на два направления без нулевых положений.

При схеме рис. 7.8, *б*, применяемой только для управления из двух мест, потеря напряжения в линии больше, чем при схеме рис. 7.8 *а,* но возможно подключать нагрузки, не управляемые по «коридорной» схеме без прокладки дополнительных проводников.

В схеме рис. 7.8, *в* используется переключатель двухполюсный на два направления без нулевых положений.

При токах нагрузки, превышающих допустимые для переключателей (более 6–10 А), а также при двух- и трехфазных линиях управляются не светильники, а катушки магнитных пускателей, реле или контакторов (рисунок 7.8, г), где используется переключатель однополюсный с нулевым положением.

При управлении магнитными пускателями и подобными аппаратами в цепи катушек устанавливают не кнопки, а выключатели или переключатели для восстановления освещения после временного перерыва питания.

Аппараты управления обычно устанавливают на всех фазных проводах и на обоих проводах сети постоянного тока. Для двухпроводных линий 12–42 В выключатели помещают только в одной из фаз (полюсов). Незаземленные фазы линий, питающих щитки, трансформаторы и другое электрооборудование должны отключаться одновременно. При этом аппараты управления располагают в непосредственной близости от этого оборудования, а если такая возможность отсутствует, то в местах, доступных только для обслуживающего персонала. При управлении двух- и трехфазными линиями в системах с глухозаземленной нейтралью, питающими однофазные приемники, рекомендуется применять однополюсные автоматы. Установленные на групповых линиях конденсаторы и обслуживаемые ими светильники должны отключаться одновременно и на всех полюсах, т. е. трехполюсным автоматом.

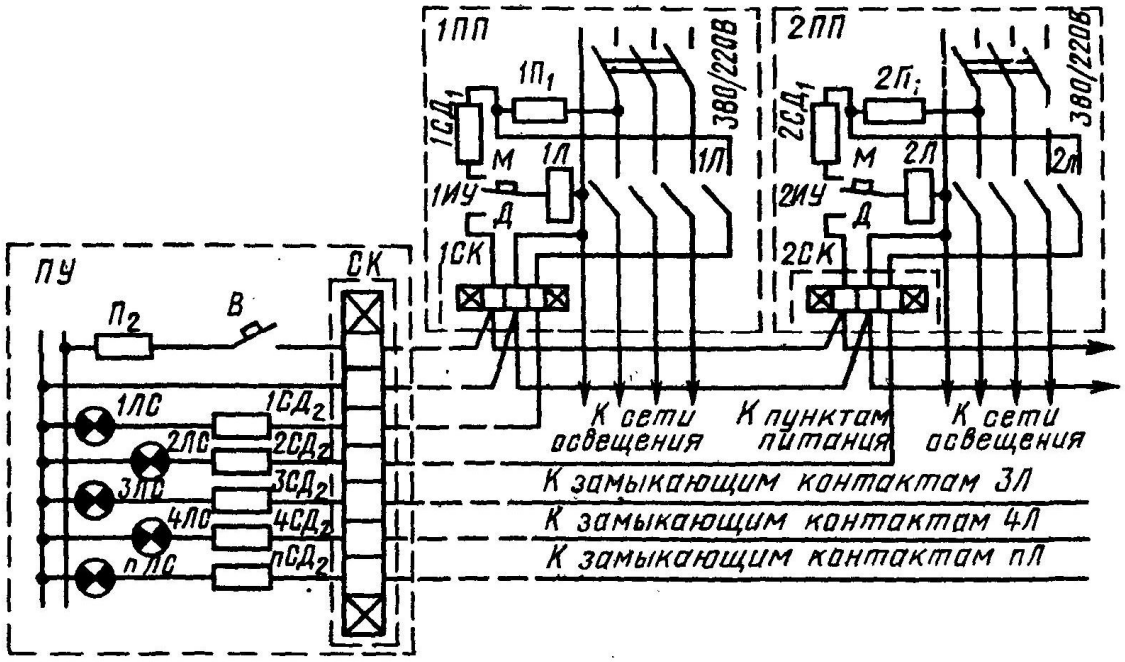


Рис. 7.9. Схема дистанционного управления по сильноточным проводам с применением избирателя управления

Во взрывоопасных помещениях класса В-1 аппараты управления и защиты устанавливают и на нулевых проводах двухпроводных линий. При ПДУ должна сохраняться возможность местного (со щитков или отдельными выключателями) управления освещением. Схемы обычного ПДУ выполняют на переменном токе с прокладкой сильноточных кабелей (рис. 7.9) или на постоянном с использованием жил кабелей телефонной сети. ПДУ включает в себя: пункты управления (ПУ), где устанавливается пункт или щит управления и необходимые для этого приборы, оборудование и блок питания; исполнительные пункты управления (ИП), где размещается сильноточная или слаботочная аппаратура; количество и месторасположения исполнительных пунктов соответствуют количеству и месторасположению пунктов питания управляемой осветительной установки; каналы связи между пунктами управления и исполнительными пунктами. Пункт управления обычно располагается в помещении, где есть дежурный персонал, производящий включение и отключение освещения. В пункте, в зависимости от принятой схемы питания, должен быть надежный источник постоянного или переменного тока. Надежность питания переменным током обеспечивается от двух независимых источников питания. При аварийном отключении основного источника питания автоматически включается резервное. Сигнальные лампы (ЛС), установленные на блок-контакторах, позволяют контролировать напряжение на участках электрической цепи.

При работе сети дистанционного управления на постоянном токе в пункте управления имеется аккумуляторная батарея или вентильный выпрямитель. Каналы связи пунктов управления с исполнительными пунктами, совмещенными с пунктами питания осветительной установки, выполняют как самостоятельные кабельные или воздушные линии, а также

используя телефонную сеть. Отдельные специальные линии управления освещением удобны и надежны в эксплуатации, но их устройство требует больших затрат. Поэтому во всех местах, где это возможно, используются телефонные сети.

Для сильноточных линий дистанционного управления применяются различные контрольные кабели с алюминиевыми жилами, а с медными используются только в виде исключения на ответственных объектах. В менее ответственных воздушных сетях управления, например в сетях управления наружным освещением различных поселков, небольших городов и территорий фабрик и заводов, иногда применяются стальные провода диаметром 3–5 мм. Широко распространенная схема управления освещением по сильноточным проводам показана на рисунке 7.9. В каждом пункте питания *1ПП, 2ПП, 3ПП...* на отходящих осветительных линиях дополнительно к автоматам или рубильникам устанавливаются контакторы или магнитные пускатели *1Л, 2Л, 3Л...,* катушки которых питаются от специальной сети с пункта управления (ПУ). В цепь сети управления включен однополюсный выключатель или рубильник *В*, который управляет осветительной установкой. На управляемом пункте питания для контроля за состоянием установки находятся сигнальные лампы *1ЛС, 2ЛС, 3ЛС...,* которые горят при включенном замкнутом положении рабочих контактов магнитных пускателей, так как подключаются через замыкающие блок-контакты магнитных пускателей. Сигнализацию осветительной установки не устраивают на небольших освещаемых объектах, когда горение источников света может наблюдаться визуально, это приводит к упрощению схемы управления и снижению ее стоимости. Для управления освещением с пункта питания при частичном включении осветительной установки (для производства ремонтных работ части территории или отдельного помещения) на каждом пункте питания устанавливают избиратели управления *1ИУ, 2ИУ, 3ИУ...,* представляющие собой нормальные однополюсные пакетные переключатели, например, типа ППМ1 – 10/Н2 на два направления с нулевым положением. При изображенном положении переключателя *М* обеспечивается местное питание катушки магнитных пускателей вне зависимости от положения выключателя *В* на пункте управления. При положении *Д* управление производится с пункта централизованного управления. Среднее положение переключателя отключает цепь питания катушки магнитного пускателя и обеспечивает невозможность ее включения с пункта управления, что особенно важно для безопасности при производстве ремонтных работ или смене ламп.

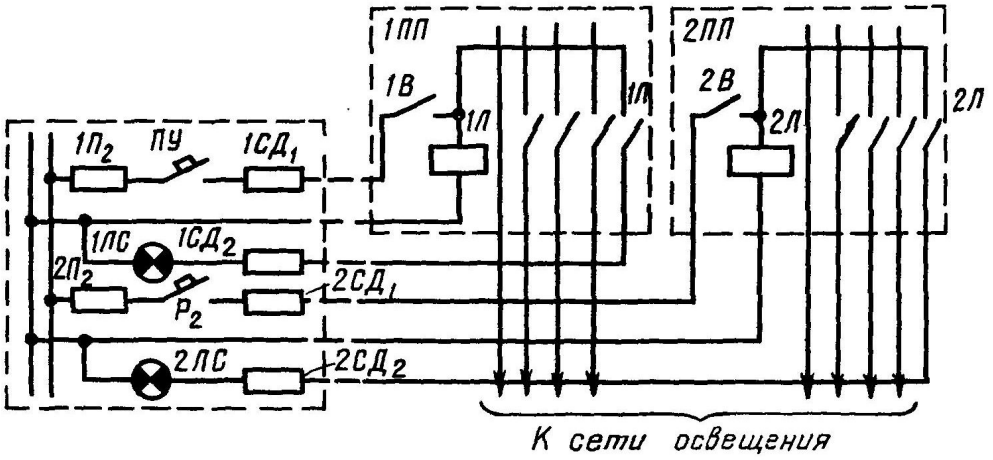


Рис. 7.10. Схема дистанционного управления по сильноточным проводам (при фазном напряжении)

При необходимости согласования подводимого напряжения с паспортными данными катушек устанавливают добавочные сопротивления *1СД, 2СД, ...,* выбираемые по характеристикам применяемых типов сигнальных ламп (рисунок 7.10). Установка избирателя управления на пунктах питания лишает возможности диспетчера с *ПДУ* определять режим работы осветительной установки. При установке избирателя управления в положение «местное управление» диспетчер не сможет включить или отключить освещение, что недопустимо для установок наружного освещения. В этом случае вместо переключателей *1ИУ, 2ИУ ...* устанавливают однополюсный рубильник или выключатель *IВ, 2В* (см. рис. 7.10). Автоматическое управление осуществляется с помощью автоматов с часовыми механизмами, фотоэлементами и фоторезисторами. Автоматы с часовыми механизмами включают и отключают освещение в определенное время суток, распространены реле *2РВ* (однопрограммные) и *2РВМ* (двухпрограммные). Принцип работы реле основан на вращении программного диска, в резьбовые отверстия которого ввертываются установочные штифты по заданной программе, вращение диска осуществляется пружинным двигателем с часовым механизмом. Штифты включают и отключают микровыключатель, а тем самым и освещение. При токе в линии более 10–15 А микровыключатель управляет катушкой пускателя или контактора.

Более удобными и перспективными в эксплуатации являются фотоэлектронные автоматы, включающие и отключающие искусственное освещение в зависимости от естественной освещенности. Основными элементами таких автоматов являются газонаполненные или вакуумные фотоэлементы или фоторезисторы. Значение их сопротивлений обратно пропорционально падающему на них световому потоку. С увеличением освещенности естественным светом сопротивление фотодатчиков уменьшается, и в цепи появляется ток. Так как значение тока недостаточно для включения катушки контактора, то в автомат к цепи сигнала подключается усилитель, усиливающий сигнал до значений, достаточных для срабатывания реле. В наиболее распространенных автоматах используется

устройство сравнения, сопоставляющее поступающие от фотопреобразователя данные об освещенности объекта с заданным уровнем освещенности и передающее сигналы последующим элементам схемы. Во избежание попадания прямых солнечных лучей на поверхность фотоэлементов и фоторезисторов автоматы устанавливают таким образом, чтобы отверстие в кожухе прибора, предназначенное для прохождения света, было ориентировано на север или затенялось каким-либо сооружением.

На рис. 7.11 приведена принципиальная схема автомата типа АО, состоящего из трех основных узлов: фотопреобразователя *ФП,* блока управления *БУ* и магнитного пускателя *ПМ.* Схема соединения этих узлов показана на рис. 7.11, *б*. В качестве фотопреобразователя в автомате используется фоторезистор *ФСКГ-Г1,* включенный в цепь базы транзистора, являющегося управляющим элементом для более мощного транзистора T_2, управляющего реле P_1, контакты которого включают или отключают выходное реле P_2 к замыкающим контактам последнего подключена катушка магнитного пускателя *ПМ.* Питание схемы выпрямленным напряжением осуществляется через диоды *Д* от делителей напряжения R_2–R_3 и R_6 – R_7. Настройка автомата на включение освещения при заданной освещенности осуществляется изменением сопротивления R_1. Отключается освещение при естественной освещенности, превышающей освещенность включения на 5–10 лк. Массово изготовленные автоматы настроены на включение при освещенности 5± 2 лк и отключение при освещенности 8–15 лк. Элементы временной задержки (конденсатор C_2 и резистор R_8 совместно с замедленным реле P_2) предотвращают срабатывание при кратковременных случайных изменениях освещенности.

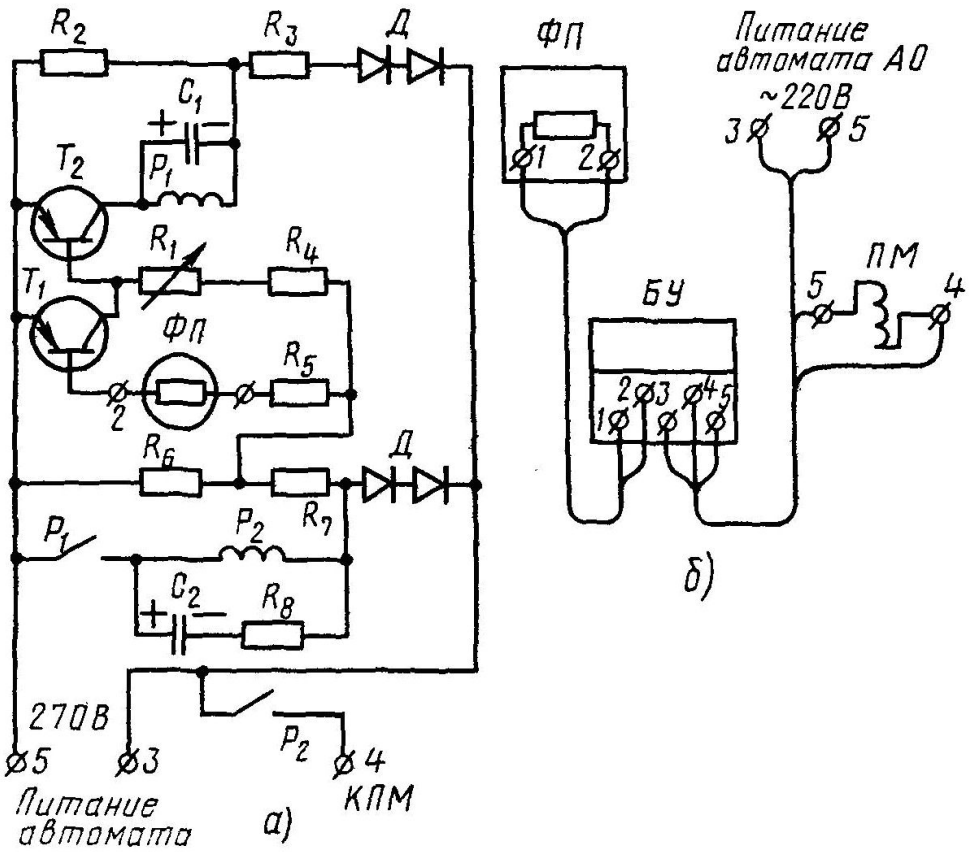


Рис. 7.11. Схема автомата АО:
а – принципиальная схема; б – схема соединения узлов

Максимально допустимый ток выходных контакторов блокауправления (контакты реле P_2) равен 0,5А, предельная мощность при напряжении сети 380 В, отключаемая магнитным пускателем *ПМ,* поставленным с автоматом, составляет 5 кВт.

Кроме автоматов АО промышленность выпускает типы автоматов Ф-2, ФРМ–62А и др.

Автоматическое управление является дополнением к ручному и необходимо для включения и отключения освещения в аварийных и специальных режимах.

Контрольные вопросы

1. Выбор напряжения и источников питания
2. Схемы питания
3. Групповые осветительные сети
4. Защита осветительных сетей и выбор аппаратов защиты
5. Управление освещением

8. ОСВЕЩЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

8.1. Общие требования

Каждое помещение производственного здания имеет определенное функциональное назначение, и электрическое освещение должно создавать условия работы, необходимые для успешного решения поставленных задач.

Выполнить это условие можно только при изучении технологии производства в той мере, которая необходима для устройства осветительных установок, особенно при работе с рельефными объектами, видимость которых в значительной мере определяется пространственным распределением светового потока. В этом случае выбор светораспределения осветительных приборов и их размещение в помещении могут быть решающими в создании наиболее благоприятных условий для работы зрения.

Это можно осуществить при соблюдении норм освещенности и показателей качества освещения, бесперебойности действия освещения, удобства обслуживания осветительных установок и управления ими, а также соответствия осветительных установок требованиям эстетики.

В основу проектирования осветительных установок промышленных предприятий положена «Инструкция по проектированию силового и осветительного электрооборудования промышленных предприятий» (СН 357-77).

Осветительные установки должны удовлетворять требованиям действующих ПУЭ, «Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭ и ПТБ).

8.2. Надежность работы установок в условиях окружающей среды

Выбор светильника определяется не только экономичностью осветительной установки, но и надежностью ее работы, определяемой соответствием характеристики светильника окружающей среде. При выборе светильников по степени их защиты от воздействия окружающей среды следует использовать ГОСТ «Светильники. Виды и обозначения» и ГОСТ «Электрическое оборудование напряжением до 1000 В. Оболочки. Степени защиты», а при выборе светильников для различных климатических районов необходимо руководствоваться также ГОСТ «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории и условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды».

Нормальные условия среды, в которой эксплуатируется светильник (работа светильника в закрытом отапливаемом помещении в районе умеренного климата), характеризуются рабочей температурой в пределах 35–1 °С (со средним значением 25 °С и предельным верхним значением

температуры 40 °С), относительной влажностью до 65 % при 20 °С в течение 12 месяцев (предельное верхнее значение влажности 80 % при 25 °С), содержанием пыли, дыма и копоти не более 15 мг/м^3, атмосферным давлением 0,085– 0,105 МПа.

В ПУЭ все помещения делятся на сухие (относительная влажность не более 60 % при 20 °С, температура не более 30 °С), влажные, сырые и особо сырые (относительная влажность не более 75 %, более 75 % и близка к 100 % при t<30 °С), жаркие (t >30 °С), пыльные, в которых по условиям производства выделяется технологическая пыль, при этом может быть токопроводящей и токонепроводящей.

Защищенность световых приборов от вредных воздействий окружающей среды – одна из важнейших характеристик, определяющих срок службы и надежность работы приборов. Защита от пыли, воды и агрессивных сред обеспечивается выбором соответствующих конструкций и светотехнических материалов, а также герметизацией всего объема прибора или отдельных его полостей (в основном полости расположения электрических контактов).

Согласно классификации электротехнического оборудования установлены степени защиты его от попадания пыли, защиты от соприкосновения с элементами, расположенными внутри оболочки изделий, находящихся под напряжением.

Степень защиты светильников в пыльных помещениях зависит от количества и характера пыли. В пыльных помещениях и с химически активной средой эффективно применение ламп накаливания с диффузной или зеркальной колбой, а также рефлекторных ламп типа ДРЛР и ЛБР. Их следует устанавливать в открытой арматуре со степенью защиты, рекомендуемой для данных условий среды.

В помещениях с техническими этажами (электронная, радиотехническая промышленность, точное приборостроение и т. д.) рекомендуется использовать совмещенные системы освещения, вентиляции и кондиционирования. Под нормальным исполнением светильников понимают открытые или перекрытые приборы, в которых отсутствует специальная защита от пыли и воды. Такие светильники предназначаются для работы в помещениях с нормальными условиями среды.

8.3. Требования к освещению взрывоопасных и пожароопасных помещений

В некоторых помещениях промышленных зданий выполнение технологических процессов сопровождается выделением паров и газов, образующих взрыво- и пожароопасные смеси. К взрывоопасным относятся помещения многих отраслей промышленности и особенно предприятий химической промышленности. Взрывы в ряде случаев могут привести к серьезным разрушениям и человеческим жертвам. Пожароопасность помещений характеризуется обрабатываемыми в них материалами и зависит от строительной конструкции. Взрыв или пожар могут произойти из-за

неосторожного обращения с огнем, самовозгорания, статического электричества, неисправности электропроводки и т. д. Значительное число пожаров и взрывов связано с электротехническими установками, в частности с осветительными. Причиной взрыва и пожара могут быть перегрев проводов, короткое замыкание, искрение и т. п.

Для устранения причин, вызывающих взрывы и пожары, необходимо применять оборудование и проводки в соответствии с условиями среды и указанным на нем напряжением; не допускать перегрева (сверх нормы) проводов, кабелей и оборудования, надежно обеспечивать защиту от короткого замыкания и перегрузок (правильно подбирать предохранители и автоматы); обеспечивать надежность соединения проводов между собой и присоединения их к контактам аппаратов (обеспечивать отсутствие искрения при длительной эксплуатации).

Согласно Правилам устройства электроустановок все взрывоопасные помещения в зависимости от условий среды (выделяются горючие газы или пары, обладающие способностью образовывать с воздухом или другим окислителем взрывоопасные смеси при нормальных недлительных режимах работы; взрывоопасные смеси образуются только в результате аварий и неисправностей и т. д.) делятся на классы по степени взрывоопасности, в зависимости от принадлежности к которым выбирается степень защиты от взрыва.

Основные требования к взрывозащищенным светильникам регламентируются «Правилами изготовления взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», а также ГОСТ 1227020-76 «Электрооборудование взрывозащищенное». К этим требованиям относятся: защита от внешних воздействий; максимально допустимая температура нагрева элементов (поверхностей) светильников; защита источника света от механических повреждений прочным светопропускающим элементом.

8.4. Установки искусственного ультрафиолетового облучения

Ультрафиолетовое излучение, содержащееся в естественном свете, оказывает биологическое воздействие на организм человека. Длительное отсутствие или недостаток ультрафиолетового облучения приводит к снижению защитных сил организма, ухудшению самочувствия, снижению работоспособности и т. д. При работе людей в помещениях без естественного света или с недостаточным освещением уменьшается ультрафиолетовая облученность организма и возникает необходимость компенсации ультрафиолетовой недостаточности.

В действующих «Санитарных нормах проектирования промышленных предприятий» (СН 245-71) содержится требование к установкам искусственного ультрафиолетового облучения (УФ). Проектирование установок ультрафиолетового облучения производится на основании утвержденных Министерством здравоохранения РК и согласованных с

Госстроем РК «Указаний по проектированию и эксплуатации установок искусственного ультрафиолетового облучения».

Установки УФ облучения предусматриваются на всех объектах, расположенных севернее Северного полярного круга. Их устанавливают в помещениях промышленных зданий без естественного света или с недостаточным освещением (КЕО менее 0,1 %). Искусственное облучение осуществляется эритемными лампами, спектр излучения которых содержит УФ-излучение с длиной волны более 280 нм, так как излучение с более короткими длинами волн отрицательно влияет на организм.

Ультрафиолетовое излучение в пределах от 280 до 400 нм называется эритемным, единицей измерения которого принят эр. 1 эр соответствует потоку излучения с длиной волны 297 нм мощностью 1 Вт. Это значение достаточно большое и для практических целей удобнее пользоваться 1/1000 эр, называемой миллиэром (мэр). Эритемная облученность определяется в мэр/м^2 и характеризуется не только плотностью излучения на единицу площади, но также и временем воздействия облученности, т. е. дозой облученности, определяемой количеством облучения в единицу времени (мэр·ч/м^2).

В эритемных облучательных установках источниками излучения являются эритемные лампы типа ЛЭ мощностью 15 и 30 Вт, по размерам и конструктивным особенностям аналогичные прямым трубчатым люминесцентным лампам мощностью 15 и 30 Вт, и типа ЛЭР мощностью 30 и 40 Вт, также аналогичные трубчатым люминесцентным рефлекторным лампам. Включаются в сеть эритемные лампы с помощью тех же приборов, что и люминесцентные. Основные характеристики эритемных ламп приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Тип лампы	Мощность, Вт	Эритемная облученность на расстоянии 1 м, мэр/м^2	Срок службы, ч	Размеры, мм	
				длина	диаметр
ЛЭ-15	15	35	5000	451,6	30
ЛЭЗО-1	30	85	5000	908,8	30
ЛЭР-30	30	120	3000	908,8	30
ЛЭР-40	40	140	3000	1214,4	38

Ультрафиолетовые облучательные установки действуют в осенне-зимний и ранний весенний периоды годы. Так, в районах севернее Северного полярного круга они должны работать с 1 ноября по 1 апреля; в средней полосе (50–60° северной широты) – с 1 ноября по 1 марта; в южных районах (45–50° северной широты) – с 1 декабря по 1 марта.

По времени воздействия эритемные установки делятся на установки длительного действия (облучение производится в течение всего рабочего дня ультрафиолетовым потоком небольшой интенсивности); кратковременного

действия (облучение осуществляется в специальных помещениях – фотариях в течение нескольких минут при высоких уровнях эритемной облученности). По своему воздействию на организм человека облучательные установки длительного действия являются более эффективными, чем фотарии. Облучательные установки длительного действия проектируются совместно с осветительными; их выполняют двух видов: прямого и отраженного облучения.

В установках *прямого* облучения выходные отверстия облучателей направляются вниз, и облучение осуществляется прямым потоком, а отраженного облучения облучатели направляют поток вверх на потолок и облучение производится потоком, отраженным от потолка. Применяемые облучатели должны иметь защитный угол 25° в поперечной и продольной плоскостях. Применение открытых ламп без отражателей не допускается.

Для помещений общественных зданий широко применяется светильник ЛСО 02Х40 (1Х30) Р с двумя люминесцентными лампами по 40 Вт и одной эритемной ЛЭ-30-1 мощностью 30 Вт, устанавливаемой над корпусом светильника для отраженного облучения (рис. 8.1).

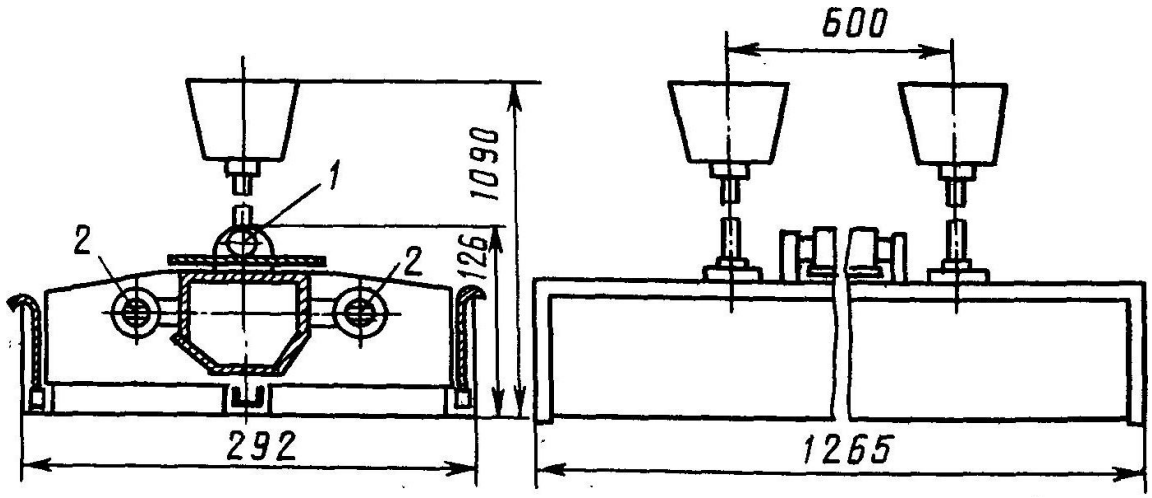


Рис. 8.1. Светильник ЛС002·30/Р:
1 – эритемная лампа мощностью 30 Вт; 2 – люминесцентная лампа мощностью 40 Вт

Облучательные установки длительного действия должны создавать определенную облученность и дозу в соответствии с нормами. Нормируемые уровни эритемного облучения указаны в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Длительность облучения, ч	Облученность, мэр/м^2			Доза за сутки, мэр·ч/м^2		
	минимальная	максимальная	рекомендуемая	минимальная	максимальная	рекомендуемая
8	1,5	7,5	5,0	12	60	40

Установки длительного действия рекомендуется применять в производственных помещениях, в которых одновременно работает не менее 10 человек при условии, что на одного работающего приходится не более 6 $м^2$ площади помещения. При большей площади, приходящейся на одного человека, и меньшем числе работающих устройство установок длительного действия экономически неэффективно, и тогда целесообразно предусмотреть установку кратковременного действия.

Расчет облучательных установок длительного действия сводится к определению мощности, числа и размещения эритемных облучателей. Расчет эритемной облученности производится точечным методом аналогично расчету освещенности установок общего люминесцентного освещения.

Установки длительного действия не рекомендуется применять в цехах с интенсивным пылевыделением, а также в производственных помещениях с химически активной средой и. материалами. При расчете установок отраженного света необходимо учитывать коэффициенты ультрафиолетового отражения различных материалов; из них наибольшие значения имеют следующие виды окраски: известковая побелка 0,3–0,4; меловая побелка – 0,4–0,8; белая силикатная краска –0,5–0,6.

Эритемные облучательные установки кратковременного действия (фотарии) предусмотрены в зданиях, где устройство установок длительного действия недопустимо по производственным технико-экономическим или гигиеническим показателям.

В фотариях люди подвергаются кратковременному и интенсивному ультрафиолетовому воздействию в те же месяцы, что и при использовании установок длительного действия. Для фотариев установлены время действия и дозы облучения. Источниками облучения являются эритемные лампы, используемые в установках длительного действия.

Фотарии являются специальными технологическими установками и их проектированием проектировщики-светотехники не занимаются.

8.5. Электрическая безопасность в осветительных установках

При нарушении изоляции и различных повреждениях оказаться под напряжением и стать источником опасности могут любые проводящие части осветительной установки. Опасным может стать прикосновение к металлическим корпусам светильников, аппаратов, защитным кожухам щитков, трансформаторов и различных коробок и т. д. Согласно требованиям ПУЭ все помещения в отношении поражения человека током разделяются на три группы.

1. Помещения с повышенной опасностью поражения током: сырые, имеющие токопроводящие полы или пыль; высокую температуру (свыше +30 °С), в которых, с одной стороны, не исключена возможность одновременного прикосновения рабочего к соединенным с землей металлоконструкциям здания, технологическим аппаратам, механизмам и т. д., а с другой – к металлическим корпусам электрооборудования.

2. Особо опасные помещения по поражению током, характеризуемые одним из следующих показателей: особо сырые (влажность близка к 100 %); химически активная среда, действующая разрушающе на изоляцию и токопроводящие части оборудования; одновременное наличие двух и более признаков, указанных в первой группе.

3. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, указанные в п. 1 и 2.

К «нормальным помещениям» согласно ПУЭ по условиям электробезопасности относятся сухие (относительная влажность не более 60 %), нежаркие, непыльные помещения без химически активной среды. Однако и «нормальные» по электробезопасности помещения также могут быть разделены на помещения без повышенной опасности; с повышенной опасностью и особо опасные.

В нормативных документах основной мерой защиты от поражения током при прикосновении к проводящим частям установки, нормально не находящимся под напряжением, является их заземление или зануление. Это необходимо во всех помещениях, относящихся к категориям с повышенной опасностью и особо опасных; а также в наружных установках при напряжении осветительной сети более 42 В (при постоянном токе более 110 В); во взрывоопасных помещениях они требуются при любом напряжении.

В помещениях без повышенной опасности не следует заземлять или занулять металлические нетокопроводящие части электроустановок. В этих случаях при прикосновениях к получившим напряжение металлическим частям ток через человека не достигает опасных значений. В то же время заземление или зануление всегда вносит дополнительную опасность при случайных одновременных прикосновениях к токоведущим и заземленным частям, которой в данном случае можно избежать.

Если устройство заземления или зануления невозможно или нецелесообразно, ПУЭ допускает обслуживание электрооборудования с изолирующих площадок или устройство защитного отключения. Заземление и зануление осветительных установок должно выполняться в соответствии с требованиями ПУЭ и Инструкции по устройству сетей заземления и зануления в электроустановках. Защитное заземление применяется в сетях с изолированной нейтралью, где опасность прикосновения обусловливается сопротивлениями путей утечки, сопротивлением изоляции сети и ее емкостью.

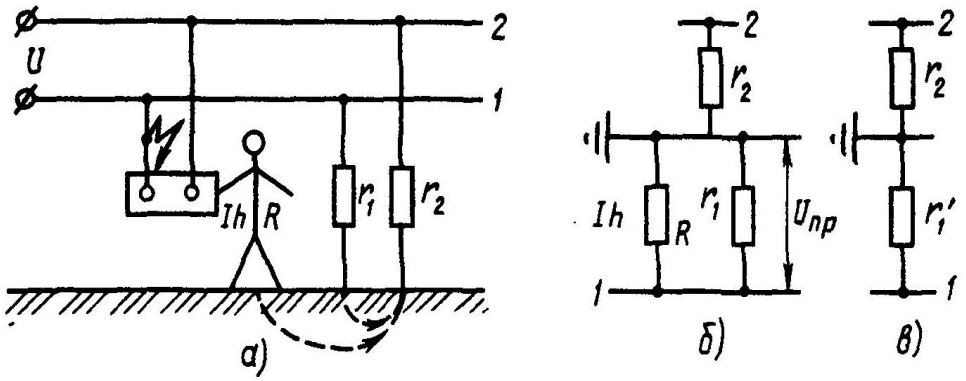


Рис. 8.2. Схема прикосновения к сети с изолированной нейтралью:
а – принципиальная; б, в – эквивалентные

В двухфазной сети (рис. 8.2) ток, проходящий через человека

$$I_h = \frac{Ur_1}{R(r_1 + r_2 + r_1 r_2)}, \tag{8.1}$$

а для трехфазной сети

$$I_h = \frac{\sqrt{3}Ur_1\sqrt{r_2^2 + r_2 r_3 + r_3^2}}{R(r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_2 r_3)}, \tag{8.2}$$

где r_1, r_2, r_3 – сопротивления соответствующих фаз по отношению к земле, Ом; R – сопротивление тела человека, Ом; U – фазное напряжение сети, В; I_h – ток, проходящий через человека, А.

При r_2 или $r_з = 0$ ток, проходящий через человека, в сетях однофазной

$$I_h = U / R, \tag{8.3}$$

трехфазной

$$I_h = (\sqrt{3}U) / R, \tag{8.4}$$

т. е. ток может достигнуть опасного значения.

Для устранения такой опасности применяется защитное заземление, т. е. преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей установки с заземлителем, имеющим определенное достаточно малое сопротивление растеканию r_3 (рис. 8.3). За счет введения параллельно R сопротивления r_3 уменьшается эквивалентное сопротивление r и снижается возможное напряжение прикосновения $U_{пр}$ до значения $U_{пр}=I_з r_з$, где $I_з$ – ток замыкания при аварийном пробое на корпус.

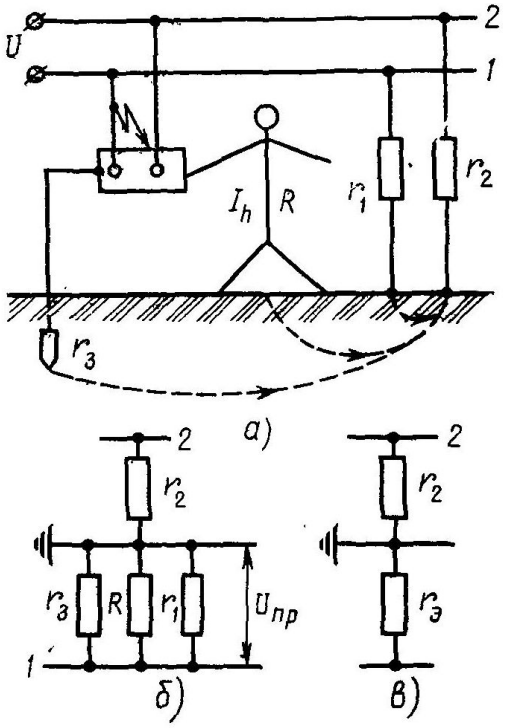


Рис. 8.3. Схема защитного заземления:
а – принципиальная; б, в – эквивалентная

Исходя из допустимого значения $U_{пр}$, можно подобрать значение r_3, обеспечивающее безопасность установки. Значение r_s по действующим нормам не должно превышать 4 Ом. При этом значении r_3 практически обеспечивается безопасность в осветительных установках. Если проверка r, по условиям безопасности при переходе высшего напряжения в цепь низшего дает меньшее значение, то его и принимают. В наружных установках металлические опоры и стальная арматура железобетонных опор должны быть заземлены. При устройстве заземлителей надо использовать естественные заземлители (металлические трубопроводы, обсадные трубы артезианских скважин и т. д.). Для сети заземления должны прокладываться специальные провода, а в удобных случаях использоваться естественные токопроводы (подкрановые пути, фермы, стальные трубы электропроводок и т. д.).

Сечения заземляющих проводников должны составлять не менее $^1/_3$ сечения фазных проводников, а при проводниках из разных металлов иметь проводимость не менее $^1/_3$ проводимости фазных проводников. Минимальные сечения составляют: I) *голые* проводники при открытой прокладке: алюминевые – 6 мм^2; медные – 4 мм^2. Стальные круглые проводники диаметром 5 мм; стальные трубы с толщиной стенки: водогазопроводные – 2,5 мм; тонкостенные – 1,5 мм; 2) *изолированные* провода: алюминиевые – 2,5 мм^2; медные 1,5 мм^2; 3) *заземляющие* жилы кабелей или многожильных проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами: алюминиевые – 1,5 мм^2, медные – 1 мм^2. 4) в любых случаях можно не применять сечения больше 100 мм^2 для стали, 35 мм^2 – для алюминия и 25 мм^2 – для меди.

В сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью защитное заземление не применяется, так как при пробое на корпус оно не обеспечивает

безопасного значения напряжения прикосновения и не в состоянии быстро ликвидировать опасное состояние установки. Вместо этого устраивают защитное зануление.

Если пренебречь сопротивлением фазного провода и переходным сопротивлением места замыкания, то ток замыкания при пробое на корпус и применении защитного заземления (рис. 8.4) можно определить по упрощенной формуле

$$I_З = U_Ф / (г_н + г_З), \qquad (8.5)$$

где $r_н$ — сопротивление рабочего заземления нейтрали, Ом (его значение по ПУЭ не должно превышать 4 Ом).

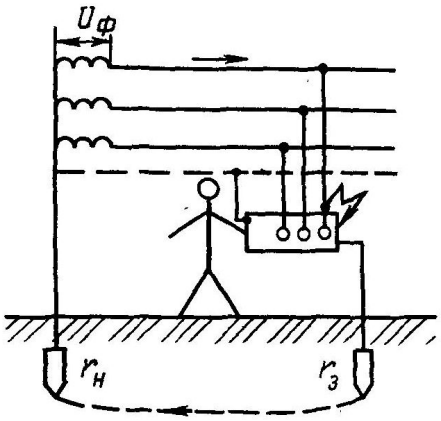


Рис. 8.4. К недопустимости применения защитного заземления в сетях с заземленной нейтралью

Для обеспечения защиты в осветительных сетях напряжением 1000 В и более $г_З$ следует принимать меньше 4 Ом. В сетях 380/220 В при $г_и = г_З = 4$ Ом получающиеся значения $I_З$ слишком малы ($I_З$ = 27,5 А) и не в состоянии обеспечить быстрое отключение аппаратов защиты. Следовательно, аварийный режим будет длительнее, причем в течение его $U_{пр}$ будет недопустимо большим (например, при $г_н = г_З$ значение $U_{пр} = 0{,}5\ U_ф$).

В сетях с глухозаземленной нейтралью применяется не защитное заземление, а исключительно защитное зануление, т. е. преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей с заземленным нулевым проводом (рис. 8.5). При занулении пробой на корпус приводит к короткому замыканию сети через фазный и нулевой провода. Относительно малые сопротивления проводов обеспечивают большие токи замыкания и быстрое срабатывание аппаратов защиты, чем ликвидируется опасное состояние установки. Обеспечение быстрого отключения электрической сети при пробоях на металлические нетоковедущие части установки является основной идеей защитного зануления.

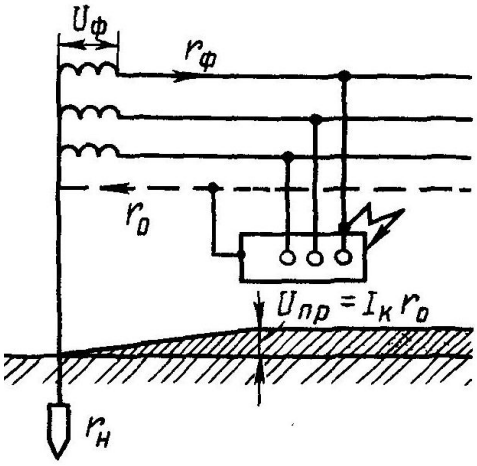


Рис. 8.5. Схема защитного зануления

Расчет достаточности сечения проводов по условиям безопасности производят по формуле

$$I_k = \frac{U_ф}{\sqrt{(r_a + r_0)^2 + r_x^2 + r_T / 3}} \geq I_в, \qquad (8.6)$$

где r_x – реактивное сопротивление петли фазный – нулевой провода, принимаемое для линий с проводами из цветных металлов из расчета 0,6 Ом/км; r_T – сопротивление трансформаторов, приведенное к напряжению низшей стороны для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей; $I_в$ – ток плавкой вставки предохранителя или уставки в автомате с тепловым расцепителем.

В сетях, где токи аппаратов защиты не превышают допустимых токов нагрузки, расчетную проверку обеспечения отключения сетей можно не производить.

Кратковременно, до отключения защиты на заземленных частях оборудования, могут создаваться опасные потенциалы, обусловливаемые соотношением сопротивлений фазного и нулевого проводов, определяемые в предельно неблагоприятном случае выражением

$$U_{пр} = I_к r_0. \qquad (8.7)$$

Теоретически, даже при равенстве сечений фазного и нулевого проводов, напряжение прикосновения имеет еще опасное значение $U_{пр} = 0,5U_ф$.

Практически в цехах с встроенными или близко расположенными подстанциями, достаточно насыщенных технологическим оборудованием, $U_{пр}$ при замыканиях на корпус не превышает 10–12 В вследствие дополнительной проводимости, создаваемой многочисленными связями с землей через зануленные металлические части электроустановок и имеющийся с ними электрический контакт и трубопроводы различных коммуникаций. Однако для

удаленных от подстанции небольших объектов без водопровода $U_{пр}$ сохраняет опасное значение. Для снижения опасности эффективно устройство дополнительных местных очагов повторного заземления нулевого провода, выполняемых в виде контурного заземления. Одновременно можно рекомендовать устройство защитного отключения при появлении потенциала на корпусе зануленного оборудования. В отдельных случаях опасность устраняется устройством дополнительных связей с заземлителем нейтрали. Безопасность в сетях с заземленной нейтралью обеспечивается только при непрерывности цепи нулевого провода. Обрыв нулевого провода в осветительных установках приводит к выносу потенциала на заземленное электрооборудование через нить лампы или сопротивление нагревательного прибора (рис. 8.6) даже при отсутствии пробоя на корпус. Поэтому в цепи нулевого провода, когда он используется в качестве зануляющего, не применяются разъединяющие аппаратуры или аппараты защиты.

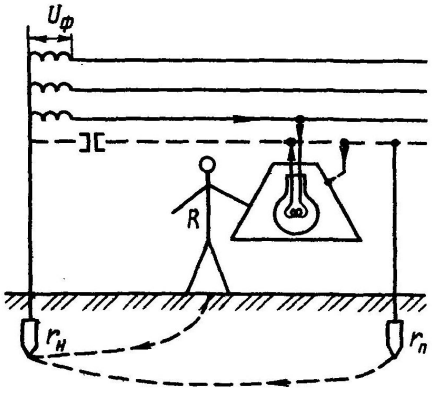


Рис. 8.6. Схема повторного заземления нулевого провода

Для снижения опасности при возможном обрыве нулевого провода должно предусматриваться его повторное заземление $r_п$ на концах воздушных линий и ответвлений протяженностью более 200 м, а также в середине линии и ответвления длиной 500 м. Сопротивление каждого повторного заземления принимается не более 10 Ом. **В** худшем случае при одном повторном заземлении и обрыве нулевого провода напряжение прикосновения $U_{пр}$ на металлических частях электроустановок не будет превышать значения:

$$U_{пр} = \frac{U_ф}{r_н + r_п} r_g. \qquad (8.8)$$

Для рабочего и повторных заземлений нейтрали рекомендуется использовать естественные заземлители, так же как при устройстве защитного заземления.

В производственных помещениях с нормальной средой (механические, сборочные и другие цехи) в групповых сетях 127–220 В в качестве нулевого провода рекомендуется использовать стальные трубы открытых

электропроводок, тросы для подвешивания проводов, металлические корпуса открыто установленных токопроводов и металлические конструкции зданий, а также конструкции производственного назначения (фермы, колонны, подкрановые пути) или механизмов.

В качестве рабочих нулевых проводов использование естественных токопроводов не разрешается в помещениях взрыво- и пожароопасных, с сильно агрессивной средой (электролизные цехи, агломерационные фабрики и т. п.), или же когда эти токопроводы находятся в непосредственной близости от сгораемых частей здания или конструкций. Не используют такие токопроводы тогда, когда они осуществимы только на отдельных участках трассы (на спусках и подъемах). Для безопасности нулевой провод должен присоединяться обязательно к винтовой гильзе патронов для ламп накаливания, ДРЛ, МГЛ, натриевых высокого давления и т. д., а для заземления корпусов светильников при открытой прокладке незащищенных проводов необходимо предусмотреть специальную гибкую перемычку между заземляющим контактом светильника и нулевым проводом в месте его крепления на ближайшей опоре. Зануление корпуса присоединением к ответвлению, питающему данный светильник, недопустимо, так как при нарушении контакта в цепи данного нулевого провода корпус светильника находится под напряжением без какой-либо защиты (рис. 8.7), а внешние признаки указывают только на перегорание лампы и необходимость ее замены.

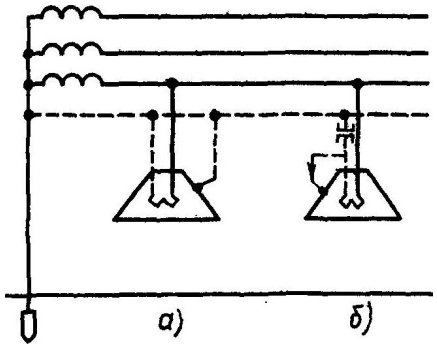


Рис. 8.7. Выполнение защитного зануления корпуса светильника:
а – правильное; б – неправильное

В линиях аварийного освещения, постоянно питаемых или переключаемых на питание от сети постоянного тока, для зануления используются нулевые провода близрасположенных линий рабочего освещения или прокладываются специальные проводники. Использовать для зануления нулевой провод аварийного освещения в данном случае нельзя, так как это приводит к заземлению одного из полюсов аккумуляторной батареи.

Согласно СН 357-77 заземление или зануление корпусов светильников общего освещения должно выполняться в сетях: а) с заземленной нейтралью при вводе в светильник кабеля, защищенного провода, незащищенных проводов в трубе или металлорукаве или при скрытой проводке без труб – ответвлением от нулевого рабочего провода внутри светильника; б) с

заземленной нейтралью при вводе в светильник открытых незащищенных проводов – гибким изолированным проводом, присоединенным к заземляющему винту корпуса светильника и рабочему нулевому проводу у ближайшей к светильнику неподвижной опоры или коробки; в) с изолированной нейтралью при любых способах ввода в светильник – гибким проводом, присоединяемым к заземляющему винту корпуса светильника и заземляющему проводнику.

Корпус светильника с газоразрядными лампами при вынесенных пускорегулирующих аппаратах допускается заземлять или занулять перемычкой между заземляющими винтами пускорегулирующего аппарата и светильника.

Контрольные вопросы

1. Надежность работы установок в условиях окружающей среды.
2. Требования к освещению взрывоопасных и пожароопасных помещений.
3. Установки искусственного ультрафиолетового облучения.
4. Электрическая безопасность в осветительных установках.

9. НОРМИРОВАНИЯ ОСВЕЩЕНИЯ. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОСВЕЩЕНИЯ. ЕСТЕСТВЕННОЕ И ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ. ОТРАСЛЕВОЕ НОРМИРОВАНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ

Основной целью нормирования осветительных установок является обеспечение единого подхода в осуществлении оптимальных условий работы зрения, достижение необходимой видимости объектов различения.

Для получения требуемого уровня видимости устанавливаются различные уровни освещенности для зрительных работ разной точности. Чем меньше размер объекта, его контраст с фоном и коэффициент отражения освещаемой поверхности, тем большим должен быть выбран уровень освещенности.

9.1. Выбор параметров нормирования

Нормирование осветительных установок любого назначения начинается с выбора параметров, определяющих их эффективность. При этом нормирование может быть *прямым и косвенным*.

При прямом нормировании регламентируются величины, непосредственно определяющие эффективность осветительной установки. К ним относятся производительность труда; уровень видимости или различимости, обеспечивающий решение зрительной задачи с заданной достоверностью; зрительная работоспособность; светлота окружающего пространства, определяющая уровень насыщенности помещения светом, и ряд других параметров. Это нормирование является наиболее совершенным.

Косвенное нормирование осветительных установок основано на регламентации фотометрических характеристик, а также их распределений и соотношений в освещаемом пространстве во времени и по спектру. Это нормирование менее совершенно, но более приемлемо для практики проектирования и имеет ряд особенностей: фотометрические характеристики (освещенность, яркость освещаемой поверхности и т. д.), определяющие эффективность осветительной установки, связаны с ней нелинейно; характер этой нелинейности неодинаков для различных производственных процессов; эффективность осветительной установки зависит как от количественного значения, так и от качественных показателей выбранной фотометрической характеристики.

Качество освещения определяется свойствами оптического излучения, используемого в осветительной установке, и характеризуется распределением в пространстве, во времени и по спектру.

От пространственного распределения излучения, падающего на освещаемый объемный предмет, зависит расположение света и теней на его поверхности и окружающем фоне. Это распределение определяет яркостной контраст и угловой размер освещаемого рельефного объекта.

Яркостной контраст и угловой размер рельефного объекта наблюдения, зависящие от условий освещения и наблюдения, называют *эквивалентным контрастом и эквивалентным угловым размером объекта наблюдения.*

Распределение излучения во времени также влияет на эффективность осветительной установки, так как зрение обладает инерционным свойством и имеют место процессы адаптации, возникающие при изменении яркости поля зрения.

В осветительной технике все показатели, определяющие эффективность освещения за счет качества излучения, попадающего в глаз наблюдателя, называют *качественными характеристиками освещения.*

К ним можно отнести распределение: яркости по поверхности объекта наблюдения и прилегающему к нему участку фона – микрораспределение; яркости в поле зрения наблюдателя – макрораспределение; светового потока во времени, зависящее от свойств источников света, способов их включения и качества питающей их электрической энергии; излучения по спектру.

Эффективность осветительной установки определяют не только количественные, но и качественные показатели (характеристики). Учитывая это, при нормировании и проектировании осветительных установок эти показатели рассматриваются как единые.

9.2. Классификация осветительных установок и основные требования к ним

Впервые в нашей стране нормы освещения промышленных предприятий были введены в 1928 г. Эти нормы были разработаны проф. П. М. Тиходеевым и распространялись только на искусственное освещение.

Строительные нормы и правила по проектированию естественного и искусственного освещения (СНиП II-4-79) объединены в одном документе.

Эти нормы должны отвечать нормам проектирования зданий, рассчитанным на широкое применение индустриальных способов строительства и дальнейшее его удешевление. Удешевление строительства зданий должно сопровождаться улучшением архитектурного качества интерьера и качества освещения. Поэтому и нормы освещения должны обязательно учитывать не только генеральную линию в проектировании (блокирование, большая протяженность зданий и т. д.), но также и соблюдение закона модуля при использовании осветительных устройств встроенного вида.

По приемам освещения установки подразделяют на установки естественного, искусственного и совмещенного освещения, а по назначению – на четыре основные группы: 1) для освещения производственных и вспомогательных помещений промышленных предприятии; 2) для освещения площадок промышленных предприятий и мест производства работ, расположенных вне зданий; 3) для освещения общественных и жилых зданий; 4) для освещения улиц, дорог и площадей населенных пунктов.

В разделе, включающем область распространения норм, приведено разделение помещений по условиям зрительной работы на четыре группы:

I – помещения, где производится различение объектов зрительной работы, при фиксированном направлении зрения на рабочую поверхность (производственные помещения рабочие кабинеты, конструкторские бюро, кабинеты врачей и т. д.); II – помещения, в которых производится различение объектов при нефиксированном зрении и обзор окружающего пространства (торговые залы магазинов, столовые, выставки, картинные галереи и т. п.); III – помещения, где производится обзор окружающего пространства при кратковременном различении объектов (концертные залы, фойе-театров и кинотеатров и др.); IV – помещения, где происходит общая ориентировка (проходы, коридоры, гардеробные производственных зданий и т. п.).

9.3. Естественное и совмещенное освещение

Естественное освещение необходимо во всех помещениях, предназначенных для постоянного пребывания людей. Без такого освещения допускается проектировать только помещения, разрешенные санитарными нормами проектирования промышленных предприятий и указанные в таблице освещенностей СНиПа для помещений общественных зданий.

Естественное освещение подразделяется на *боковое* (светопроемы – окна расположены в стене помещения), *верхнее* (светопроемы – фонари расположены на крыше здания), *комбинированное* (боковое + верхнее).

При одностороннем боковом естественном освещении нормируется минимальное значение КЕО в точке, расположенной на расстоянии 1 м от стены, наиболее удаленной от световых проемов.

При двустороннем симметричном боковом освещении нормируется минимальное значение КЕО в точке, расположенной посередине помещения на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности (или пола).

При верхнем и комбинированном естественном освещении нормируется среднее значение КЕО в точках, расположенных на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности (или пола). Первая и последняя точки принимаются на расстоянии 1 м от поверхности стен или перегородок. Норма КЕО зависит от расположения здания по отношению к поясу светового климата, что учитывается при его расчете коэффициентами: *m* – светового климата и с – солнечности климата:

$$e_н^{I,II,IV,V} = e_н^{III} mc,$$

где $e_н^{I,II,IV,V}$ – норма КЕО для зданий, расположенных в I, II, IV и V поясах светового климата; $e_н^{III}$ – норма КЕО для зданий, расположенных в III поясе светового климата; *m* – коэффициент светового климата, определяемый совокупностью условий естественного освещения в той или иной

местности; *с* – коэффициент солнечности климата, учитывающий дополнительный световой поток, проникающий через световые проемы в помещения за счет прямого и отраженного от подстилающей поверхности солнечного света в течение года.

Расчет естественного освещения помещений бывает *предварительный* и *проверочный.* При предварительном расчете определяют размеры световых проемов, при проверочном – расчетные значения КЕО в точках характерного разреза помещения (рис. 9.1). При этом расчетные точки следует выбирать на равных расстояниях друг от друга, располагая первую и последнюю точки на расстоянии 1 м от стен и перегородок.

Совмещенное освещение помещений производственных зданий допускается для производственных помещений, в которых выполняются работы I и II разрядов; для производственных и других помещений в случаях, когда по условиям технологии, организации производства или климата в месте строительства требуются объемно-планировочные решения, которые не позволяют обеспечить нормированные значения КЕО (многоэтажные здания большой ширины, одноэтажные многопролетные здания с пролетами большой ширины и т. п.); в соответствии с нормативными документами по строительному проектированию зданий и сооружений отдельных отраслей промышленности, утвержденных в установленном порядке.

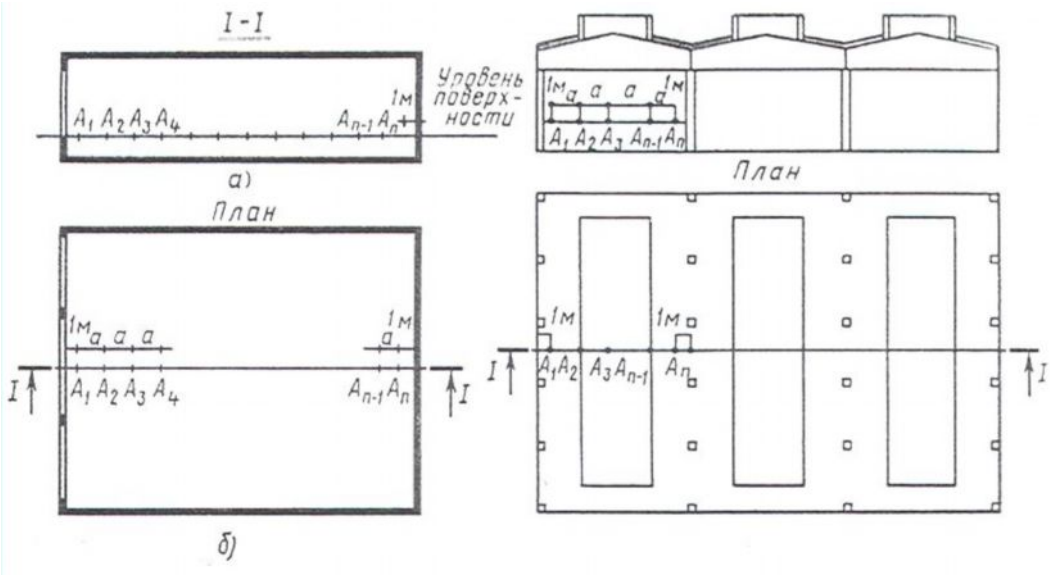


Рис. 9.1. Характерный поперечный разрез помещения для расчетов КЕО:
а) при боковом освещении; б) при верхнем освещении

Совмещенное освещение помещений жилых, общественных и вспомогательных зданий допускается в тех случаях, когда это требуется по условиям рациональных объемно-планировочных решений, за исключением жилых комнат и кухонь жилых домов, помещений для пребывания детей, учебных и учебно-производственных помещений школ и учебных заведений, кабинетов врачей и т. д.

При совмещенном освещении предъявляются требования к источникам света: общее искусственное освещение независимо от принятой системы освещения должно выполняться газоразрядными источниками света (в помещениях без особых требований к цветопередаче): лампами типа ЛБ, МГЛ, ДРЛ в промышленных зданиях и ЛБ в общественных.

Контрольные вопросы:

1. Для чего применяется нормирование осветительных установок?
2. Какие бывают виды нормирования?
3. Чем определяется качество нормирования?
4. Когда впервые введены нормы освещения?
5. На какие группы подразделяются установки по назначению?

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Адаптация – (от позднелатинского *adaptatio* – приспособление), в физиологии и медицине обозначает процесс привыкания; изменение чувствительности периферии и центра зрительного анализатора в процессе перехода от одного уровня его возбуждения на другой.

Адгезия (от латинского *adhaesio* – прилипание**),** сцепление поверхностей разнородных тел. Достигается при нанесении гальванических и лакокрасочных покрытий, склеивании, сварке и других, а также при образовании поверхностных плёнок (например, окисных, сульфидных).

Аккомодация – (от латинского *accomodatio* – приспособление, приноровление) аккомодация глаза – приспособление к ясному видению предметов, находящихся на различных расстояниях от глаза; аккомодация возбудимых тканей (нервной, мышечной) – приспособление к действию медленно нарастающего по силе раздражителя, и др.; увеличение преломляющей силы оптики глаза для обеспечения четкого изображения на сетчатой оболочке близко расположенных предметов.

Актиничность (фотогр.) – способность излучения оказывать фотографическое действие на светочувствительный материал.

Актино… (от греческого *aktis* – луч), часть сложных слов, соответствующая по значению слову «лучистый» (например, актинолит), словосочетанию «лучистая энергия» (например, актинометрия).

Актинометр (от *актино*… и …*метр*), прибор для измерения интенсивности прямой радиации (излучения) по степени нагрева поглощающей радиацию зачерненной поверхности.

Актинометрия, раздел метрологии, в котором изучается перенос и превращения солнечного, атмосферного и земного излучений в атмосфере Земли.

Ангстрем (обозначается Å), внесистемная единица длины, $1Å=10^{-10}$ м$=10^{-8}$ см$=0{,}1$ нм, введена шведским физиком А. Й. Ангстремом (1868), применяется в атомной физике, физике твердого тела и другие.

Антисептика (от *анти...* и греческого *sёptikos* – гнойный), метод предупреждения заражения ран и лечения инфицированных ран воздействием на патогенные микробы химическими (антисептические средства) или биологическими методами. Предложена Дж. Листером в 1867 г.

Астигматизм (от *а* – отрицательная частица и греческого *stigme* – точка), искажение изображения оптической системой, связанное с тем, что преломление (или отражение) лучей в различных сечениях проходящего светового пучка неодинаково. Вследствие астигматизма изображение предмета становится нерезким. Каждая точка предмета изображается размытым эллипсом. Астигматизм глаза устраняется с помощью очков с цилиндрическими стеклами, контактных линз.

Бактерицидность (от *бактерии* и латинского *caedo* – убиваю), свойство химических веществ (бактерицидов), физических и биологических факторов

(температура, ионизирующие излучения, фермент лизоцим и другие) вызывать гибель бактерий.

Бинокулярное зрение, иначе **стереоскопическое зрение** – позволяет судить не только о контуре наблюдаемого предмета, но и о его рельефе, что обеспечивает более полное его восприятие.

Блескость – свойство светящих тел изменять установившийся уровень видимости в результате чрезмерной освещенности, создаваемой ими на зрачке наблюдателя, или их чрезмерной яркости по сравнению с яркостью адаптации.

Болометр (от греческого *bole* – луч и *…метр*), прибор для измерений энергии электромагнитного излучения (главным образом ИК), основанный на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента в результате поглощения им энергии измеряемого излучения.

Быстрота обнаружения или **быстрота различения** – величина, обратная времени наблюдения, обеспечивающего при заданных трех остальных параметрах необходимую вероятность обнаружения или различения.

Верньер – устаревшее название нониуса. Нониус вспомогательная шкала, при помощи которой отсчитывают доли делений основной шкалы измерительного прибора.

Геометрическая оптика, раздел оптики, в котором распространение света в прозрачных средах рассматривается на основе представления о световом луче как геометрической линии, вдоль которой распространяется световая энергия. Законы геометрической оптики применяются для расчетов построения изображения при прохождении света через различные оптические системы.

Денситометр (от латинского *densitas* – плотность и *…метр*), прибор для измерения оптической плотности.

Денситометрия, измерение оптической плотности светопоглощающих сред, главным образом проявленных фотографических слоев.

Зрительное утомление – утомление организма, возникающее в результате производственной деятельности человека, связанный со зрительной работой.

Зрительный дискомфорт – неприятные ощущения, характерзующиеся чувством неудобства и напряженности.

Иррадиация – (от латинского *irradio* – сияю, испускаю лучи) в оптике, кажущееся увеличение размеров светлых фигур на чёрном фоне по сравнению с тёмными фигурами равной величины на белом фоне (положительная иррадиация) или при малых яркостях фона – обратная картина (отрицательная иррадиация).

Кандела (от латинского *candela* – свеча), единица силы света СИ, обозначается кд; – сила света, испускаемого с площадью 1/600 000 $м^2$ сечения полного излучателя в перпендикулярном к этому сечению направлении при температуре затвердевания платины (2042 К) и давлении 101 325 $Н/м^2$ (то же, что свеча).

Каустика (то же, что каустическая поверхность) – (от греческого *kaustikos* – жгучий, палящий), поверхность, являющаяся огибающей семейства

световых лучей, испущенных светящейся точкой и прошедших через оптическому систему.

Квазары, космические объекты чрезвычайно малых угловых размеров, имеющие значительные красные смещения линий в спектрах, что указывает на их большую удалённость от Солнечной системы, достигающую несколько тысяч Мпк. Квазары излучают десятки раз больше энергии, чем самые мощные галактики. Источник их энергии точно не известен.

Колориметр, прибор для измерения цвета.

Колориметрия (от латинского *color* – цвет и *…метрия*), методы измерения количественного выражения цвета, основанные на определении координат цвета в выбранной системе 3 основных цветов.

Конвекция (от латинского *convectio* – принесение, доставка), перемещение макроскопических частей среды (газа, жидкости), приводящее к переносу массы, теплоты и других физических величин. Различают естественную (свободную) конвенцию, вызванную внешним механическим воздействием на среду. С конвекцией в атмосфере Земли связано образование облаков, с конвекцией на Солнце – грануляция.

Критическая частота мелькания – минимальная частота проблесков, обеспечивающая впервые с достаточной достоверностью их слитное восприятие.

Латентный период (скрытый период) – в физиологии, время от момента воздействия какого-либо раздражителя на организм, орган, ткань или клетку до появления ответной реакции; длительность промежутка времени от начала действия излучения до момента возникновения зрительного ощущения.

Метрология (от греческого *metron* – мера и *…логия*), наука об измерениях, методах достижения их единства и требуемой точности; историческая, вспомогательная историческая дисциплина, изучающая развитие систем мер, денежного счёта и единиц налогового обложения у различных народов.

Монохроматическое излучение – это лучение одной длины волны.

Область оптических излучений – это область электромагнитных излучений, лежащая между областью рентгеновских излучений и областью радиоизлучений.

Ортохроматические материалы, фотографические пластинки и плёнки, чувствительные не только к УФ, фиолетовым и синим лучам, но также и зелёным и жёлтым. Содержат в эмульсионном слое, помимо галогенида серебра, специальные оптические сенсибилизаторы. Применяются при съемках объектов, в которых отсутствуют детали красного цвета, для микрофотосъёмки, репродуцирования чёрно-белых изображений и другие.

Освещенность – отношение светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности.

Ослепленность – снижение чувствительности зрительного анализатора в результате отрицательного индуктивного действия блескости.

Панхроматические материалы, фотографические пластинки и плёнки, чувствительные не только к УФ, фиолетовым и синим лучам, но также и

зелёным и жёлтым и красным. Содержат в эмульсионном слое, помимо галогенида серебра, специальные оптические сенсибилизаторы. Универсиальные материалы, применяемые в профессиональной и любительской фотографии, при репродуцировании, аэрофотосъёмке и др.

Пигменты – (от латинского *pigmentum* – краска) (хим.), окрашенные химические соединения, применяющиеся в виде тонких порошков для крашения пластмасс, резины, химических волокон, изготовления красок.

Поток излучения или лучистый поток – это мощность излучения, характеризующая количество энергии, излучаемой в единицу времени.

Приемники лучистой энергии – это тела, в которых происходит преобразование лучистой энергии.

Проблески или **проблесковые огни** – кратковременные вспышки, повторяющиеся периодически с заданным интервалом времени.

Психофизика, раздел психологии, изучающий количественные отношения между силой раздражителя и величиной возникающего ощущения. Основан Г. Фехнером во 2-ой половине XIX века. Охватывает две группы проблем: измерение порога ощущений, т. е. предела чувствительности сенсорной [(сенсорный от лат. sensus – восприятие, чувство, ощущение), чувствительный, чувствующий, относящийся к ощущениям; например, физиологию органов чувств часто называют сенсорной физиологией] системы человека (закон Вебера–Фехнера и др.), построение психофизических шкал (С. Стивенс и другие).

Рецепторы – (от латинского *receptor* – принимающий), (физиологический), окончания чувствительных нервных волокон или специализированные клетки (сетчатки глаза, внутреннего уха и др.), преобразующие раздражения, воспринимаемые извне (экстероцепторы) или из внутренней среды организма (интероцепторы), в нервное возбуждение, передаваемое в центральную нервную систему.

Светимость (светность), величина полного светового потока, испускаемого единицей поверхности источника света.

Световой поток – лучистый поток, оцениваемый по его действию на селективный приемник – глаз, относительная спектральная чувствительность которого определяется нормализованной функцией относительной спектральной световой эффективности излучения.

Светотехника, область науки и техники, занимающаяся исследованием принципов и разработкой способов генерирования, пространственного распределения, измерения характеристик оптического излучения (света), а также преобразования энергии света и другие виды энергии.

Сенситометр – прибор, применяемый в сенситометрии для освещения исследуемого фотоматериала в стандартных условиях выдержки, освещённости и спектрального состава света.

Сенситометрия (от позднелатинского *sensitivus* – чувствительный и *…метрия*), измерение светочувствительности и других фотографических свойств фотоматериалов.

Сенсибилизаторы – оптические, органические красители (главным образом полиметиновые), добавляемые в фотографическую эмульсию для придания ей светочувствительности к жёлто-зелёному, красному или ИК излучениям, к которым она нечувствительна.

Сила света – это пространственная плотность светового потока, определяемая отношением светового потока $d\Phi$ к телесному углу $d\omega$ с вершиной в точке расположения источника, в пределах которого равномерно распределен этот поток.

Скважность проблесков – отношение длительности затемнения к времени полного периода.

Сложное излучение – совокупность монохроматических излучений, которые могут образовывать линейчатый или сплошной спектр.

Сплошные спектры – бесконечно большие числа монохроматических излучений, примыкающих друг к другу.

Стандартизация, процесс установления и применение стандартов.

Стерадиан (от греческого *stereos* – телесный, пространственный и *радиан*), единица измерения телесного угля. Стерадиан – телесный угол, вырезающий на сфере, описанной вокруг вершины угла, поверхность, площадь которой равна квадрату радиуса сферы. Обозначается *стер*. Полная сфера образует телесный угол, равный 4π *стер*.

Субстанция (латинское слово *substantia* – сущность; то, что лежит в основе), объективная реальность; материя в единстве всех форм её движения; нечто относительно устойчивое; то, что существует само по себе, не зависит ни отчего другого.

Суспензии (от позднолатинского *suspensio* – подвешивание), грубодисперсные системы с жидкой дисперсной средой и твёрдой дисперсной фазой, частицы которой достаточно крупны, чтобы противостоять броуновскому движению.

Тест-объекты – предметы или искусственные, обычно плоские, равнояркие пятна (диск, прямоугольник, две полоски, кольцо с разрывом и пр.), используемые в качестве объектов наблюдения при пороговых измерениях.

Физиология (от греческого *physis* – природа и *…логия*), наука о жизнедеятельности целостного организма и его отдельных частей – клеток, органов, функциональных систем.

Фосфен (от греческого *phos* – свет и *phaino* – показываю), зрительное ощущение цветовых пятен, возникающее у человека без воздействия света на глаз, при механических, химических, электрических раздражениях сетчатки или зрительных участков коры головного мозга.

Фот (от греческого *phos*, родительный падеж *photos* – свет), единица освещённости, обозначается ф. 1 ф = 10^4 люкс.

Фотарий, помещение, оборудованное для проведения общих групповых УФ облучений.

Фотографическая бумага (фотобумага), предназначена для получения фотографии позитивов. Состоит из бумажной основы (подложки) и нанесённого на неё тонкого слоя фотографической эмульсии.

Фотографические материалы, светочувствительные материалы, применяемые в фотографии и кинематографии для получения изображений (кино- и фотоплёнки, фотопластинки, фотобумага); составы для химической обработки этих материалов (проявители, фиксажи и другие); вспомогательные средства (фотоклей, покровные лаки и др.).

Фотометр (от *фото…* и *…метр*), прибор для измерения фотометрических (в том числе световых) величин: освещённости, силы света, светового потока, яркости, коэффициент пропускания и коэффициент отражения, а также величин, характеризующих УФ и ИК излучения.

Фотометрия (от *фото…* и *…метрия*), 1) совокупность методов измерения энергетических характеристик электромагнитных излучения и световых величин: освещённости, силы света, светового потока, яркости и др. 2) измерение интенсивности излучений и потоков заряженных частиц по величине почернения, вызываемого ими в светочувствительном слое.

Фотон, квант электромагнитного поля, нейтральная элементарная частица с нулевой массой и спином 1; переносчик электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами. Фотон обладает энергией $\varepsilon = \hbar\omega$ и импульсом $p = \hbar\omega/c$, где $\hbar$ – *Планка постоянная,* c – скорость света в вакууме, ω – круговая частота соответствующего электромагнитного излучения.

Фусцин – темный пигмент, перемещающийся по направлению к светочувствительным клеткам по мере увеличения освещенности сетчатки в зоне изображения.

Экспозиция (от латинского *expositio* – выставление на показ, изложение) в музеях и на выставках – размещение экспонатов в определенной системе (хронологической, типологической и пр.).

Электрический фосфен – величина, обратная пороговому значению тока, при котором наблюдатель впервые (с определенной вероятностью) обнаружит вспышку.

Эмульсия (от латинского *emulsus* – выдоенный**)**, жидкая лекарственная форма; непрозрачная жидкость, в которой нерастворимые в воде эфирные масла, бальзамы и так далее находятся в диспергированном состоянии.

Эпителий (от *эпи…* и греческого *thëlë* – список), у животных и человека (эпителиальная ткань) – пласт тесно расположенных клеток, покрывающий поверхность организма (напр., кожу), выстилающий все их полости и выполняющий главным образом защитную, выделительную и высасывающую функции.

Эмиттеры – вторичные катоды.

Эритема (от греческого *erythema* – краснота), ограниченное или разлитое покраснение кожи при воздействии различных факторов (механических, химических, инфекционных и других).

Эритемное излучение – ультрафиолетовое излучение в пределах от 280 до 400 нм, единицей измерения которого принят эр. 1 эр соответствует потоку излучения с длиной волны 297 нм мощностью 1 Вт. Это значение достаточно

большое и для практических целей удобнее пользоваться 1/1000 эр, называемой миллиэром (мэр).

Яркость – это величина, равная отношению силы света, излучаемой элементом поверхности в данном направлении, к площади проекции этой поверхности на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению. В системе СИ измеряется в *нитах*.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота;
ДКсТ – трубчатые ксеноновые лампы;
ДРЛ – дуговые ртутные лампы;
ИИ – инфракрасное излучение;
ИИК – инфракрасное излучение космическое;
ИК – инфракрасное;
КЕО – коэффициент естественной освещенности;
КТП – комплектные трансформаторные подстанций;
ЛБ – лампы белые;
ЛД – лампы дневные;
ЛДЦ – лампы улучшенного спектрального состава;
ЛТБ – лампы тепло-белые;
ЛХБ – лампы холодно-белые;
МГЛ – металлогалогенные лампы;
НЛВД – натриевые лампы высокого давления;
НЛНД – натриевые лампы низкого давления;
Lux (лат.) – свет солнца, освещение;
ПТБ – правила техники безопасности;
ПТЭ – правила техники эксплуатации;
ПУЭ – правила устройства электроустановок;
РНК – рибонуклеиновые кислоты;
СНиП – строительные нормы и правила;
ТЭО – технико-экономическое обоснование;
УИ – ультрафиолетовое излучение;
УИК – ультрафиолетовое излучение космическое;
УИС – ультрафиолетовое излучение Солнца;
УФ – ультрафиолетовое;
ЦДУ – центральное дистанционное управление;
ШУ – шкаф управления;
ЩСУ – щит станций управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мешков В. В. Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия: Учеб. пособие для высш. техн. учеб. заведений). – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. –416 с.
2. Мешков В. В., Епанешников М. М. Осветительные установки: Учеб. пособие для вузов по специальности «Светотехника и источники света»). –М.: Энергия, 1972. –360 с.
3. Епанешников М. М. Электрическое освещение: Учеб. пособие для вузов по специальности «Электроснабжение пром. предприятий городов и сельск. хоз-ва». –М.: Энергия, 1973. –352 с.
4. Мешков В. В. Основы светотехники. Ч. 1.: Учеб. пособие для вузов по спец. «Светотехника источники света». – М.: Энергия, 1979. –368 с.
5. Кнорринг Г. М. Осветительные установки. –М.: Энергоиздат, 1981.
6. Гуторов М. М. Основы светотехники и источники света: Учеб. пособие для вузов по спец. «Светотехника источники света». –М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.
7. Тищенко Г. А. Осветительные установки: Учеб. пособие для вузов по специальности «Электросвет. приборы и установки». –М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
8. Кунгс Я. А. Автоматизация управления электрическим освещением. –М.: Энергоатомиздат, 1989, –108 с.
9. Козинский В. А. Электрическое освещение и облучение: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электрификация и автоматизация сельск. хоз-ва». –М.: Агропромиздат, 1991. –259 с.
10. Баев В. И. Практикум по электрическому освещению и облучению: Текст: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электрификация и автомат. сел. хоз-ва»/ *В. И. Баев* –М.: Агропромиздат, 1991. –174 с.
11. Справочная книга по светотехнике/*Под ред. М. Б. Айзенберга*. –М.: Энергоатомиздат, 1995.
12. Шашлов А. Б., Уарова Р. М., Чуркин А. В. Основы светотехники: Учебник для вузов. –М.: МГУП, 2002. –280 с.
13. СНиП РК 2.04-05-2002. Естественное и искусственное освещение. Государственные нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства. Строительные нормы и правила РК. –Астана, 2002.
14. Баев В. И. Практикум по электрическому освещению и облучению. –М.: КолосС, 2008. –191 с. ил: – (Учебники и учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений).
15. Егинбаев Ж. Е. Оптоэлектроника и сканирующие системы: Учеб. пособие.– Алматы: КазНТУ, 2009. –276 с.
16. Шашлов А. Б. Основы светотехники: Учебник для студентов высш. учеб. заведений. –М.: Логос, 2011. –255 с.
17. Егинбаев Ж. Е. «Основы светотехники». Учебно-методический комплекс (для специальности 5В072200 – Полиграфия) – Алматы: КазНТУ имени К. И. Сатпаева, 2011. – 81 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ …….. 3
1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОТОПРИЕМНИКОВ И ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ …….. 7
1.1. Взаимодействие фотоприемников с излучением …… 7
1.2. Светочувствительность ……..... 8
1.3. Виды эффективных потоков …….. 9
1.4. Фотофизические приемники …….. 10
1.5. Глаз – фотобиологический приемник излучения ……..... 12
1.6. Виды светочувствительных материалов ……..……. 20
1.7. Фотографическое действие оптического излучения …….. ….. 21
1.8. Характеристические кривые светочувствительных материалов ……..... 22
1.9. Общие сведения …… 23
1.10. Строение черно-белого фотографического материала ……24
1.11. Фотографическая эмульсия ……25
1.12. Образование скрытого изображения …… 26
1.13. Химико-фотографическая обработка галогенсеребряных материалов … 28
2. ЗРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР (ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ) …….. . 32
3. УСТАНОВИВШИЕСЯ И НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ЗРИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ..……37
3.1. Характеристики зрительного процесса ……..37
3.2. Спектральная чувствительность ..……39
3.3. Абсолютная световая чувствительность …… 40
3.4. Контрастная чувствительность ……40
3.5. Различимость формы и расстояния …….. . 41
3.6. Цветовая чувствительность …… 41
3.7. Зрительная адаптация ……. 42
3.8. Зрительная инерция …… 43
3.9. Зрительная индукция …… 44
3.10. Зрительный дискомфорт и утомление …….. 46
4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТНАЯ ПЛОТНОСТЬ СВЕТОВОГО ПОТОКА И СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛАМПЫ 48
4.1. Распределение светового потока в пространстве. Сила света …… 48
4.2. Освещеность и светимость .....……51
4.3. Яркость 53
4.4. Световые свойства тел ……..…….. 55
4.5. Теория теплового излучения ……59
4.6. Конструкция современных ламп накаливания ….……63
4.7. Световые и электрические характеристики ламп накаливания …...…….. 65
4.8. Процесс электрического разряда в газах и парах металлов ……..... 68
4.9. Механизм возникновения световых излучений …..…….. 71
4.10. Разрядные лампы массового применения …… 72
4.11. Специальные разрядные лампы …… 76

5. СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. УСЛОВИЯ РАССМАТРИВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА 80
5.1.Общие положения …… 80
5.2. Измерение освещенности …… 84
5.3. Измерение силы света ……..…… 86
5.4. Измерение светового потока ……88
5.5. Общие сведения о колориметрических системах …… 90
5.6. Принципы измерения цвета ..…….. 90
5.7. Основы построения колориметрических систем ……..……91
5.8. Основная физиологическая система КЗС …….. 92
5.9. Основы колориметрической системы (CIERGB) …… 92
5.10 Основы стандартной колориметрической системы XYZ (CIEXYZ) ……. 93
5.11. Условия рассматривания ……94
5.12. Классификация способов измерения цвета …… 95
5.13. Цветные денситометры, особенности измерения цветовых величин ….. 96
6. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СВЕТОВОМ ПОЛЕ И ВЕКТОРЕ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ……..…… 98
6.1. Светотехнические величины **с**ветового поля ……. 98
6.2. Интегральные характеристики светового поля …… 99
6.3. Световой вектор …… 101
7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ …. 104
7.1. Выбор напряжения и источников питания ……...104
7.2. Схемы питания ……106
7.3. Групповые осветительные сети ……109
7.4. Защита осветительных сетей и выбор аппаратов защиты ……. 114
7.5. Управление освещением …… 117
8. ОСВЕЩЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ …… 125
8.1. Общие требования ……...125
8.2. Надежность работы установок в условиях окружающей среды ……125
8.3. Требования к освещению взрывоопасных и пожароопасных помещений.126
8.4. Установки искусственного ультрафиолетового облучения ……127
8.5. Электрическая безопасность в осветительных установках ……130
9. НОРМИРОВАНИЯ ОСВЕЩЕНИЯ. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОСВЕЩЕНИЯ. ЕСТЕСТВЕННОЕ И ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ. ОТРАСЛЕВОЕ НОРМИРОВАНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ …… 138
9.1. Выбор параметров нормирования ……. 138
9.2. Классификация осветительных установок и основные требования к ним …….. 139
9.3. Естественное и совмещенное освещение …..…… 140
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ ……..…….. 143
Список сокращений 149
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ……. 150
СОДЕРЖАНИЕ …….. 151

Егинбаев Жетписбай Егинбаевич

ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

(для специальности 5В072200 – Полиграфия)

Редактор

Подписано в печать 2015 г.

Тираж ... экз. Формат 60х84 1/16. Бумага типографская №1
Объем ... п.л. Заказ № ... Цена договарная

Издание Казахского национального технического университета
имени К.И. Сатпаева,
Учебно-издательский центр
г. Алматы, ул. Сатпаева 22