

### 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВЕЛИЧИН И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

- Общие понятия и определения
- Воздействие оптического излучения на глаз
- Воздействие оптического излучения на бактерии
- Витальные (эритемные) системы величин и единицы их измерения
- Воздействие оптического излучения на зеленый лист

#### 3.1. Общие понятия и определения

Основной энергетической величиной является поток излучения  $\Phi$ , Дж/с = Вт:

$$\Phi = \frac{dW}{dt} = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} f(\lambda) d\lambda.$$

*Сила излучения*  $I$ , Вт/ср, — это отношение лучистого потока к величине телесного угла, в котором этот поток равномерно распространяется:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

*Телесный угол* — это коническое тело, вершиной которого служит центр сферы произвольного радиуса, а основанием — часть поверхности этой сферы, на которую этот конус опирается (рис. 12).

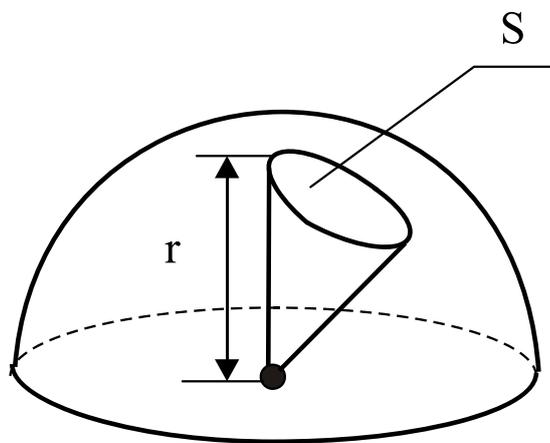


Рис. 12. К определению телесного угла

Величина телесного угла  $\omega$  определяется отношением площади основания сферической части конуса к квадрату радиуса:

$$\omega = \frac{S = r^2}{r^2}.$$

За единицу телесного угла принят такой угол, который вырезает на поверхности сферы участок площадью, равной квадрату радиуса сферы. Эта единица называется стерadianом (ср).

Разность двух телесных углов называется *зональным телесным углом* (рис. 13).

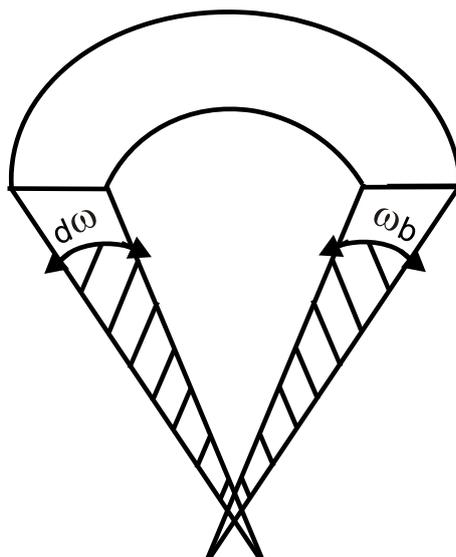


Рис. 13. Зональный телесный угол

За направление силы излучения принимается ось телесного угла, в пределах которого равномерно распространяется лучистый поток (рис. 14).

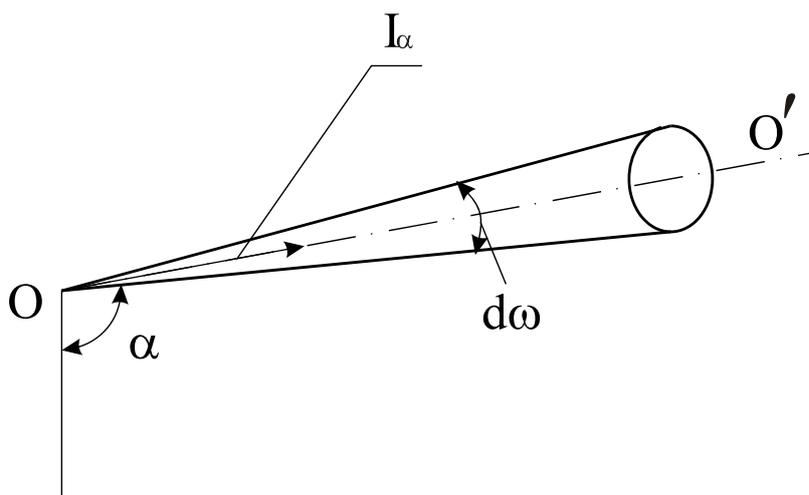


Рис. 14. Направление силы излучения

Несмотря на то, что все реальные источники излучения имеют размеры, часто пользуются понятием точечного источника излучения.

Под *точечным источником излучения* понимают такой источник, когда его видимые размеры из точки наблюдения меньше расстояния до него как минимум в пять раз.

Если от источника излучения отложить все силы излучения, то вся поверхность, образованная ими, называется фотометрическим телом.

*Фотометрическое тело* — часть пространства, ограниченная поверхностью, которая является геометрическим местом точек концов радиус-векторов сил излучения.

Симметричный источник излучения имеет ось симметрии, а несимметричный — нет. Если источник симметричный, то его фотометрическое тело является телом вращения.

*Кривая силы излучения* — это линия, полученная сечением фотометрического тела плоскостью, проходящей через центр симметрии этого тела (рис. 15).

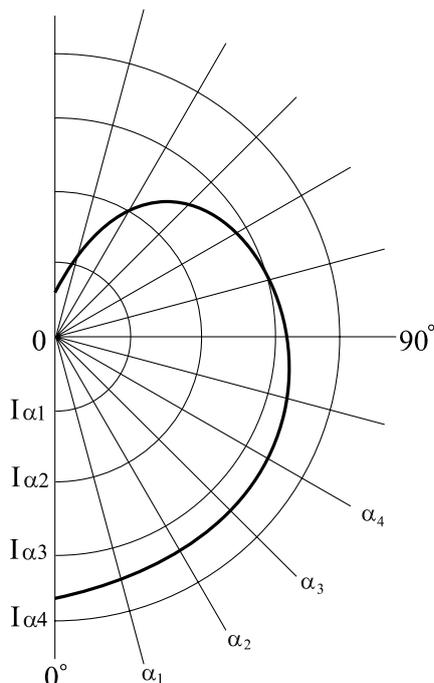


Рис. 15. Кривая силы излучения

Эта кривая характеризует распределение энергии излучения в пространстве.

По известной продольной кривой силы излучения можно легко получить лучистый поток источника, т.е.  $\Phi = f(I_\alpha)$ .

Действительно

$$d\Phi = I_\alpha d\omega; \quad \Phi = \int_{\alpha_i}^{\alpha_n} I_\alpha d\omega; \quad d\omega = \frac{dS}{r^2}, \quad (2)$$

где  $dS$  — площадь разности площадей двух сегментов, вырезанных на поверхности двумя вращающимися радиусами.

Известно, что площадь сегмента  $S_c = 2\pi r h$ , где  $h$  — высота сегмента.

Тогда разность сегментов (рис. 16):

$$S = S_{c1} - S_{c2} = 2\pi r(h_2 - h_1);$$

$$h_1 = r - r \sin \alpha; \quad h_2 = r - r \sin(\alpha + d\alpha); \quad h_1 - h_2 = r \sin \alpha d\alpha.$$

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

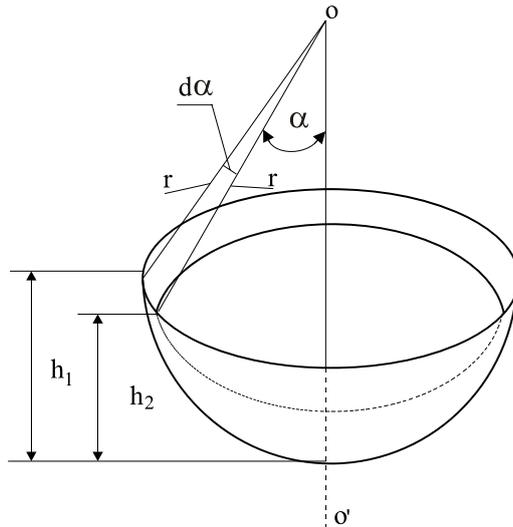


Рис. 16. К расчету потока излучения по кривой силы излучения

Подставляя в формулу (2), получим:

$$\Phi = \int_{\alpha_i}^{\alpha_n} 2\pi \sin \alpha d\alpha I_\alpha = 2\pi \int_{\alpha_i}^{\alpha_n} I_\alpha \sin \alpha d\alpha,$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_n$  — углы, определяющие ту часть пространства, в пределах которой источник излучает поток.

Таким образом, можно подсчитать поток в телесном угле  $\alpha_1 - \alpha_2$ , потом поток в зоне  $\alpha_2 - \alpha_3$  и т.д.

*Энергетическая светимость*  $m$ , Вт/м<sup>2</sup> (плотность излучения, излучательность), — это плотность потока излучения с поверхности элементарного участка излучающего (отражающего или пропускающего) тела. Энергетическая светимость численно равна отношению потока излучения к площади участка поверхности, излучающей этот поток:

$$m = \frac{d\Phi}{dS}.$$

где  $d\Phi$  — поток излучения с поверхности  $dS$ .

*Энергетическая яркость* (лучистость) — отношение силы излучения с поверхности в данном направлении к площади проекции этой поверхности на плоскость, перпендикулярную силе излучения (рис. 17). Энергетическая яркость участка поверхности  $S$  в направлении  $\alpha$  вычисляется:

$$L = \frac{I_\alpha}{S_\alpha} = \frac{I_\alpha}{S \cos \alpha},$$

где  $I_\alpha$  — сила излучения элемента поверхности  $S$  в направлении  $\alpha$ ;  
 $S_\alpha = S \cos \alpha$  — проекция участка поверхности  $S$  на плоскость, перпендикулярную силе излучения.

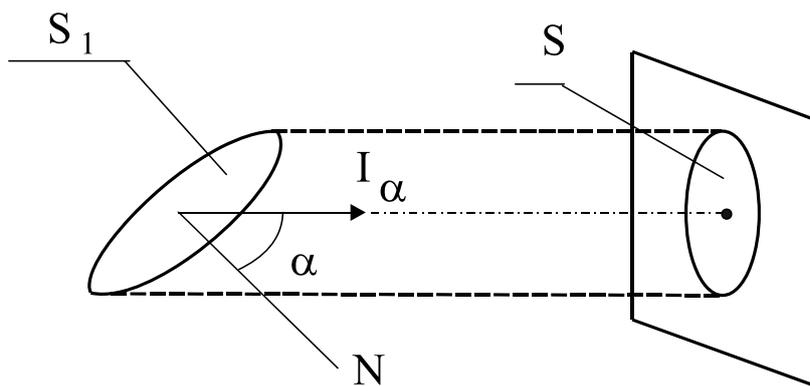


Рис. 17. К определению лучистости

За единицу измерения энергетической яркости принимают энергетическую яркость плоской поверхности в  $1 \text{ м}^2$ , которая в перпендикулярном направлении имеет силу излучения  $1 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$ .

Энергетическая освещенность  $E$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  (облученность), — это отношение потока излучения  $d\Phi$  к площади  $dS$ , на которую падает излучение:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Выразим связь между силой излучения и облученностью (рис. 18):

$$\begin{aligned} \Phi &= I_{\alpha} d\omega, \\ d\omega &= \frac{dS}{l^2} = \frac{dS \cos \beta}{l^2}, \\ E &= \frac{I_{\alpha} dS \cos \beta}{dS l^2} = \frac{I_{\alpha} \cos \beta}{l^2}. \end{aligned}$$

Это основной закон светотехники:

$$E = \frac{I_{\alpha} \cos \beta}{l^2}.$$

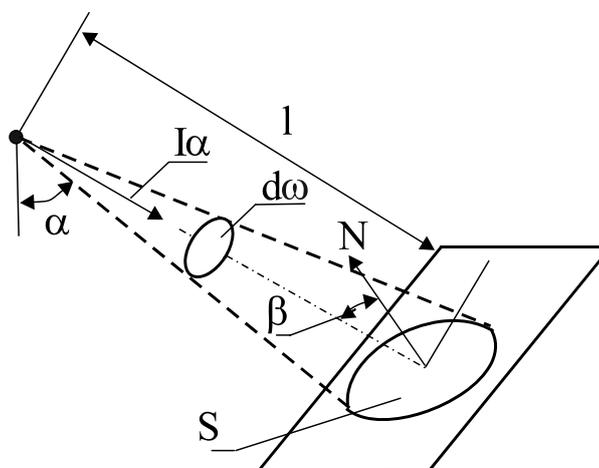


Рис. 18. Связь силы излучения и облученности

Поскольку процесс преобразования излучения в другие виды энергии определяется не только значением облученности приёмника и спектральным составом излучения, но и продолжительностью облучения, важное значение имеет величина, называемая количеством облучения.

Количество облучения  $H$ , Вт·с/м<sup>2</sup>, — это значение энергии излучения, упавшей на единицу облучаемой поверхности в течение времени облучения:

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E_t dt,$$

где  $E_t$  — мгновенное значение облученности, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_1$  и  $t_2$  — время начала и конца облучения.

### 3.2. Воздействие оптического излучения на глаз.

#### Световые величины

Зрительный аппарат человека состоит из приёмника лучистой энергии глаза и нервных волокон, соединяющих глаз с нервными центрами коры головного мозга (рис. 19).

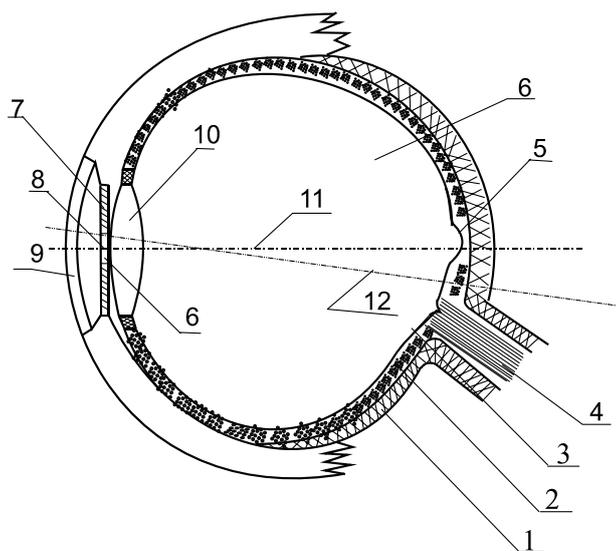


Рис. 19. Схема строения глаза человека:

- 1 — плотная белковая оболочка — склера, защищающая глаз; 2 — сосудистая оболочка, питающая глаз; 3 — сетчатая оболочка-сетчатка, соединяющая нервные клетки между собой; 4 — зрительный нерв; 5 — жёлтое пятно, в области которого расположены колбочки; 6 — стекловидное тело; 7 — радужная оболочка, определяющая цвет глаза; 8 — зрачок с радиальными мышечными волокнами; 9 — роговая оболочка-роговица, являющаяся частью склеры; 10 — хрусталик, обладающий способностью менять кривизну своей поверхности; 11 — оптическая ось; 12 — зрительная ось

Глаз представляет собой тело, заполненное прозрачным для видимых излучений веществом, — стекловидным телом. В задней части глаза расположена сетчатка, состоящая из нервных клеток и нервных волокон,

соединяющих нервные клетки между собой. В этой оболочке расположены приёмники энергии излучения. Эти приёмники делятся на два типа, которые называют колбочками и палочками. В сетчатке различают десять слоев, имеющих различное строение. Толщина её около 0,2 мм.

Колбочка — светочувствительный приёмник, в котором находится вещество — иодопсин, разлагающееся при поглощении лучистого потока. Колбочки сосредоточены в центральной области сетчатки. В этой области сетчатой оболочки глаза размещается жёлтое пятно, в середине которого имеется углубление, называемое центральной ямкой. В пределах жёлтого пятна расположены преимущественно колбочки, в центральной ямке — только колбочки, причём каждая из них может соединяться с корой головного мозга отдельным зрительным волокном.

Колбочковый аппарат работает при больших яркостях, что соответствует дневным условиям освещения, поэтому колбочковое зрение называют дневным.

Колбочковый аппарат глаза обладает способностью различать цвета.

Палочки — светочувствительный приёмник, в котором находится особое вещество родопсин, разлагающееся под действием поглощённого потока излучения. Палочки расположены в сетчатке неравномерно. Число палочек, приходящихся на единицу поверхности сетчатки, растёт по мере удаления от центральной части к периферии. Палочки соединяются с корой головного мозга одним волокном по несколько десятков штук.

Палочковый аппарат глаза имеет более высокую чувствительность, чем колбочковый, и работает при малых яркостях окружающего пространства. Зрение, при котором работает только палочковый аппарат, называется ночным. Известно, что при ночном зрении цвета не различаются. Это говорит о том, что палочковый аппарат не обладает способностью воспринимать цвета. Зрение, при котором работают оба аппарата глаза, называется сумеречным.

Поток излучения, поглощённый светочувствительным веществом палочек и колбочек, вызывает фотохимическую реакцию, в процессе которой разлагаются иодопсин и родопсин. В результате фотохимической реакции возникает разность потенциалов между элементами сетчатой оболочки и соединёнными с ними центрами коры головного мозга. Химическая энергия, возникающая при распаде светочувствительного вещества, превращается в электрическую энергию импульсов тока, протекающего по волокнам нерва между сетчатой оболочкой и корой головного мозга. Эта электрическая энергия преобразуется в затылочных долях коры головного мозга в биологическую энергию, под действием которой возникают зрительные ощущения.

Способность глаза приспособливаться к чёткому различению равноудалённых предметов называется аккомодацией. Чёткое обнаружение у нормального глаза получается автоматически изменением кривизны хрусталика.

Приспособление глаза к изменившимся условиям освещения называется адаптацией. Под адаптацией понимают процесс изменения чувствительности зрительного аппарата, вызываемый изменением уровня и распределения яркости в поле зрения.

Световая адаптация — это процесс уменьшения чувствительности органа зрения при повышении яркости поля зрения. При световой адаптации через 8-10 мин снижение чувствительности глаза прекращается.

Очень важной характеристикой усредненного человеческого глаза является его спектральная чувствительность. Максимальная спектральная чувствительность органа зрения имеет место при освещении сетчатки монохроматическим излучением с длиной волны  $\lambda = 555$  нм (жёлто-зелёный участок спектра) (рис. 20).

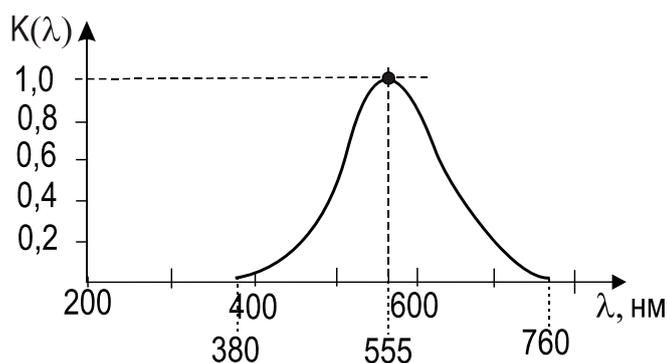


Рис. 20. Коэффициент спектральной чувствительности глаза человека

Световой поток — эффективный поток, т.е. та часть лучистого потока, которая пропорциональна реакции глаза на это излучение. Световой поток определяется соотношением

$$\Phi_{CB} = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} f(\lambda)k(\lambda) d\lambda .$$

Многочисленными измерениями установлено, что 1 Вт потока монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda = 555$  нм равен 680 лм светового потока, т.е. 1 лм равен 1/680 Вт. Следовательно, максимальное значение спектральной плотности излучения:

$$\varphi_{\max}(\lambda) = 680 \text{ лм/Вт};$$

$$\Phi_{CB} = 680 \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} f(\lambda) k(\lambda) d\lambda , \text{ лм.}$$

Существует другое определение: люмен — поток излучения абсолютно черного тела площадью  $0,5305 \text{ м}^2$  при температуре затвердевания платины (2046 К) и давлении 101325 Па.

При расчете светового потока источника с линейчатым спектром принимается  $\Delta\lambda = 1 \text{ нм}$ .

$$\Phi = 680 \sum_{380}^{760} f(\lambda)k(\lambda)\Delta\lambda.$$

Освещенность (облученность)  $E$ ,  $\text{лм/м}^2 = \text{лк}$  — это отношение светового потока к площади поверхности, по которой этот поток равномерно распределяется:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

За единицу освещенности принят люкс (лк). Освещенность в 1 лк имеет поверхность площадью в  $1 \text{ м}^2$ , на которой равномерно распределяется световой поток в 1 лм.

*Сила света*  $I$ ,  $\text{лм/ср} = \text{кд}$ , — это отношение светового потока к величине телесного угла, в котором он равномерно распространяется. Единицей силы света является 1 кандела. 1 кандела — световой поток в 1 лм, равномерно распространяющийся в единице телесного угла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

В системе СИ кандела — сила света, излучаемая в перпендикулярном направлении с  $1/600\,000 \text{ м}^2$  поверхности полного излучателя при температуре затвердевания платины (2046 К) и давлении 1 атм. (101 325 Па).

*Экспозиция*  $H_C$  (количество освещения) — количество световой энергии, падающей на  $1 \text{ м}^2$  за определенный промежуток времени:

$$H_C = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda)k(\lambda)d\lambda.$$

### 3.3. Воздействие оптического излучения на бактерии

УФ-излучение области С, с длинами волн менее 280 нм, имеющие большую энергию квантов, способно уничтожать бактерии. В бактериях под воздействием УФ-С-излучения происходит коагуляция белка, что приводит к их гибели.

Свойство излучения убивать бактерии называется бактерицидностью.

Максимальную чувствительность бактерий обнаруживают к однородным излучениям с длиной волны  $\lambda = 254 \text{ нм}$ , то есть максимальной эффективностью уничтожения бактерий обладает монохроматическое излучение при  $\lambda = 254 \text{ нм}$ . Коэффициент спектральной чувствительности бактерий представлен на рисунке 21.

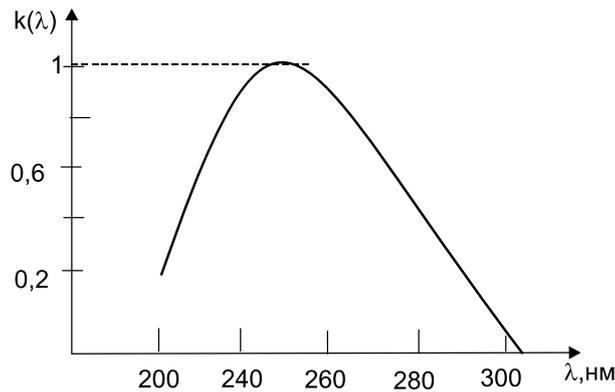


Рис. 21. Коэффициент спектральной чувствительности бактерий

Различные виды бактерий неодинаково чувствительны к УФ-лучам. Наименее чувствительны дифтерийные палочки. Наибольшей чувствительностью обладают бактерии коли — бактерии кишечной палочки, стафилококки, бациллы холеры, тифа. Поэтому за образцовый приемник принята кишечная палочка коли.

Исходной величиной в системе бактерицидных величин служит бактерицидный поток, который определяется как поток излучения, оцененный по его бактерицидному действию, то есть по эффективности уничтожения бактерий:

$$\Phi_B = \int_{\lambda_1=200}^{\lambda_2=280} \varphi(\lambda)k(\lambda)d\lambda.$$

Единицей измерения бактерицидного потока служит *бакт* (*бк*), численно равный излучению мощностью 1 Вт при длине волны  $\lambda = 254$  нм.

*Плотность бактерицидного потока*  $E_B$ , бк/м<sup>2</sup>, по поверхности облучаемого тела называется бактерицидной облучённостью:

$$E_B = \frac{d\Phi_B}{dS}.$$

Силой бактерицидного излучения  $I_B$ , бк/ср, называется пространственная плотность бактерицидного потока, равная отношению бактерицидного потока к значению телесного угла, в котором равномерно распространяется:

$$I_B = \frac{d\Phi_B}{d\omega}.$$

Весьма важной расчётной величиной является количество бактерицидного облучения, определяемое количеством энергии бактерицидного излучения, упавшей на единицу поверхности облучаемого тела за определенный промежуток времени  $H_B$ , (бк·с)/м<sup>2</sup>:

$$H_B = \int_{t_1}^{t_2} E_B dt.$$

### 3.4. Витальные (эритемные) системы величин и единицы их измерения

Вита — жизнь, эритема — покраснение.

Витальный (эритемный) поток — часть лучистого потока, пропорциональная реакции кожи человека на оптическое излучение:

$$\Phi_{\nu} = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{280}^{315} f(\lambda)k(\lambda)d\lambda = \varphi_{\max}(\lambda) \sum_{280}^{315} f(\lambda)\kappa(\lambda)\Delta\lambda.$$

Единицей эритемного потока служит  $\text{эр}$ , численно равный излучению мощностью в 1 Вт при длине волны  $\lambda = 297$  нм.

Коэффициент спектральной чувствительности кожи человека представлен на рисунке 22.

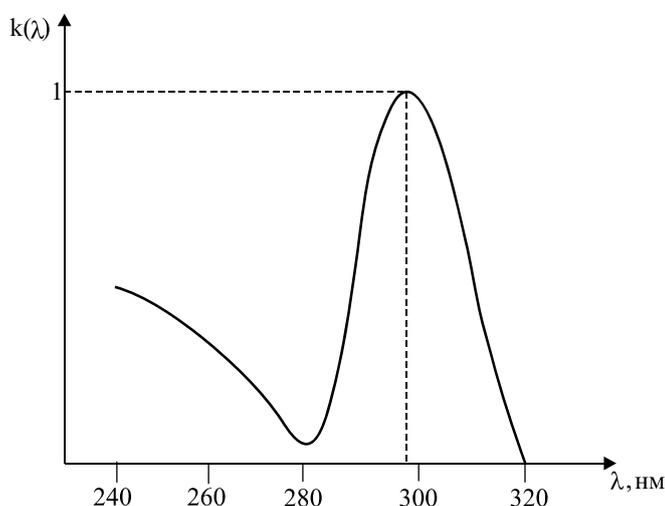


Рис. 22. Коэффициент спектральной чувствительности кожи человека

Под влиянием эритемного облучения в организме образуется биологически активное вещество  $D_3$ , которое оказывает положительное терапевтическое и тонизирующее действие на организм. В результате поглощения квантов УФ-излучения на коже человека образуется эритема (покраснение) и пигментация.

Плотность эритемного потока на поверхности облучаемого тела называется эритемной облученностью  $E_{\nu}$ ,  $\text{эр}/\text{м}^2$ :

$$E_{\nu} = \frac{d\Phi_{\nu}}{dS}.$$

Силой эритемного излучения  $I_{\nu}$ ,  $\text{эр}/\text{ср}$ , называется пространственная плотность эритемного потока, равная отношению эритемного потока к величине телесного угла, в котором он равномерно распространяется:

$$I_{\nu} = \frac{d\Phi_{\nu}}{d\omega}.$$

Количеством эритемного облучения  $H_э$ , (эр·с)/м<sup>2</sup>, называется количество энергии эритемного излучения, упавшей на единицу облучаемой поверхности за определенный промежуток времени:

$$H_э = \int_{t_1}^{t_2} E_э dt.$$

*Доза эритемного облучения* — количество витальной энергии, которое вызывает наибольшее благотворное воздействие на какой-либо живой организм. УФ-облучение влияет на обмен веществ, на процессы дыхания, активизацию кровообращения, увеличивает содержание гемоглобина в крови, активизирует деятельность желез внутренней секреции; образующийся витамин D<sub>3</sub> способствует лучшему усвоению корма, оздоровлению организма, сохранности молодняка. Переоблучение вызывает ожог кожи, выпадение пухо-перьевого покрова, а отсюда и отрицательное действие.

### 3.5. Воздействие оптического излучения на зеленый лист

Растения — это единственные организмы на нашей земле, способные самостоятельно преобразовывать энергию оптического излучения в химическую энергию органического вещества. Фотосинтез — сложная многоступенчатая реакция превращения углекислого газа и воды, под действием энергии оптического излучения, в органическое вещество.

Поглощенная растением энергия используется на фотосинтез, нагрев и испарение воды:

$$W = W_ф + W_{нагр.} + W_{испар.}$$

Фотосинтетическим действием обладает излучение с длинами волн от 300 до 750 мм.

Зеленый лист поглощает 80...90% падающего на него фотосинтетического активного излучения, отражает 5...10%. В естественных условиях всего 2% растения использует на фотосинтез, а остальная энергия идет на нагрев растения.

Спектральный состав излучения действует на различные растения по-разному, даже для одного и того же растения в различной фазе развития. Для создания специальных источников для искусственного облучения растений необходимо знать средний спектр действия фотосинтеза (рис. 23).

Одной из основных величин оптического излучения, используемого в растениеводстве, является *фитопоток* — эффективный поток излучения:

$$\Phi_э = q_{\max}(\lambda) \int_{\lambda=300}^{\lambda_2=750} \varphi(\lambda)k(\lambda)d\lambda,$$

где  $q_{\max}(\lambda)$  — максимальная спектральная фотосинтетическая эффективность оптического излучения, равная 0,95.

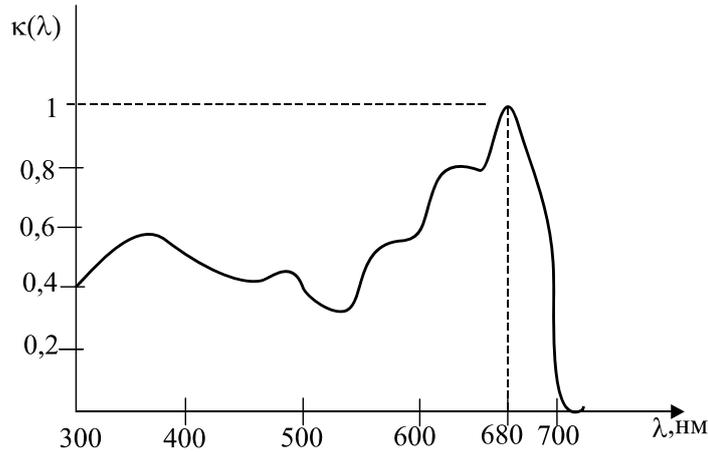


Рис. 23. Коэффициент спектральной чувствительности зеленого листа

Он характеризует содержание в интегральном излучении энергии, потенциально доступной растениям для осуществления фотосинтеза. За единицу фитопотока принят  $\text{фит}$ , численно равный монохроматическому потоку излучения в 1 Вт с длиной волны 680 нм.

Сила излучения фитопотока  $I_\phi$ , фит/ср, под которой понимается отношение фитопотока к телесному углу, в пределах которого он заключён и равномерно распределён:

$$I_\phi = \frac{d\Phi_\phi}{d\omega}.$$

Фитооблучённость — отношение фитопотока к облучаемой площади,  $E_\phi$ , фит/м<sup>2</sup>:

$$E_\phi = \frac{d\Phi_\phi}{dS}.$$

Количество фитооблучения  $H_\phi$ , (фит·с)/м<sup>2</sup>, — значение фотосинтетически активной энергии излучения, достигшей облучаемой поверхности в течение времени облучения:

$$H_\phi = \int_{t_1}^{t_2} E_{\phi t} dt.$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое телесный угол? 2. Физический смысл кривой силы излучения. 3. Дайте определение фотометрического тела. 4. Дайте определение энергетической светимости, яркости, освещенности. 5. Запишите выражение основного закона светотехники. 6. Опишите работу зрительного аппарата человека. 7. Что такое бактерицидность? 8. Что такое доза эритемного излучения? 9. Что такое фотосинтез? 10. Дайте определение величин потока излучения — люмен, бакт, фит.