

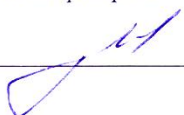
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт *высокоточных систем им. В.П. Грязева*  
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры  
«Приборы управления»  
« 22 » января 20 24 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой

  
В.В. Матвеев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по проведению практических (семинарских) занятий**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Основы фотоники»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**12.03.03 Фотоника и оптоинформатика**

с направленностью (профилем)  
**Интеллектуальные фотонные системы**  
Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Тула 2024 год

**Разработчик методических указаний:**

Алалуев В.В., доц. каф., к.т.н., \_\_\_\_\_



(подпись)

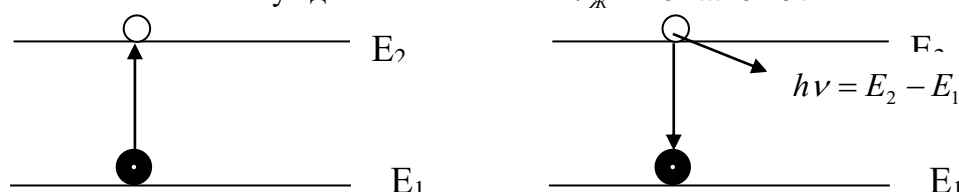
Практическое занятие №1. Оптическое излучение .....	4
Практическое занятие №2. Энергетические и световые параметры оптического излучения.....	8
Практическое занятие №3. Фотометрические параметры оптического излучения .....	15
Практическое занятие №4 Колориметрия .....	21
Практическое занятие №5. Расчет характеристик излучателей .....	40
Практическое занятие №6 Применение законов теплового излучения.....	45
Практическое занятие №7. Естественные источники излучения .....	48
Практическое занятие №8. Регистрация теплового излучения .....	53
Практическое занятие №9. Расчет ОСШ для ОЭС регистрации теплового излучения от малоразмерного объекта.....	59
Практическое занятие №10. Эквивалентные температуры АЧТ .....	62
Практическое занятие №11. Расчет энергетического коэффициента пропускания атмосферы.....	65
Практическое занятие 12. Расчет схемы фотоприемного устройства (ФПУ).....	67
Практическое занятие №13. Пересчет параметров приемников излучения .....	70

## Практическое занятие №1. Оптическое излучение

Цель работы: Изучение основных закономерностей и при расчетах оптического излучения.

Оптическое излучение возникает при поглощении атомами вещества того или иного вида энергии – тепловой, световой, электрической, химической.

В результате поглощения энергии атомы возбуждаются, т.е. приобретают дополнительную энергию, переходя с более низкого уровня энергии  $E_0$  на более высокий уровень  $E_1$ . Атомы находятся в возбужденном состоянии некоторое время – время жизни  $\tau_{ж}$  и затем возвращаются в невозбужденное состояние на уровень  $E_0$ . При этом выделяемая энергия  $\Delta E = E_1 - E_0$  может перейти в энергию ОИ. Время жизни атома в возбужденном состоянии  $\tau_{ж} = 10^{-8} \dots 10^{-2} \text{ с}$ .



Распространение ОИ в пространстве описывается двумя теориями.

### Волновая теория

При переходе из возбужденного состояния в невозбужденное атомы излучают электромагнитные волны.

**Электромагнитная волна (ЭМВ) – распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле.**

Время перехода (время излучения) – конечное и составляет  $10^{-8} \text{ с}$ . Поэтому волна – ограничена во времени (цуг), т.е. испускается не непрерывная волна, а ограниченная – цуг волны.

ОИ распространяется в виде электромагнитных (ЭМ) волн со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 3 \cdot 10^{14} \text{ мкм/с}$ .

**Энергия волны пропорциональна квадрату ее амплитуды.**

ЭМВ представляется в виде двух векторов – электрического и магнитного, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Плоскость магнитного вектора принята за плоскость поляризации.

Вектора ЭМВ поля совершают косинусоидальные (гармонические) колебания.

ЭМВ характеризуется пространственным  $\lambda$ , мкм и временным  $T$ , с периодами.

Пространственный период связан с временным через скорость света:

$\lambda = c \cdot T$  - пространственный период волны – длина волны излучения;

$\nu_z = \frac{1}{\lambda}$  – пространственная частота волны;

$\nu_t = \frac{1}{T}, \frac{1}{c} = \Gamma_{ц}$  – временная частота.

Пространственный период связан с временной частотой

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu_t}; \quad \frac{1}{\nu_z} = c \cdot T; \quad c = \frac{1}{\nu_z \cdot T} = \frac{\nu_t}{\nu_z};$$

$$\nu_z = \frac{\nu_t}{c}; \quad c = \frac{\nu_z}{\nu_t}.$$

Мгновенное значение амплитуды ЭМВ, распространяющейся вдоль оси  $z$  со скоростью, приблизительно равной скорости света, т.е.  $V \cong c$ , записывается в виде

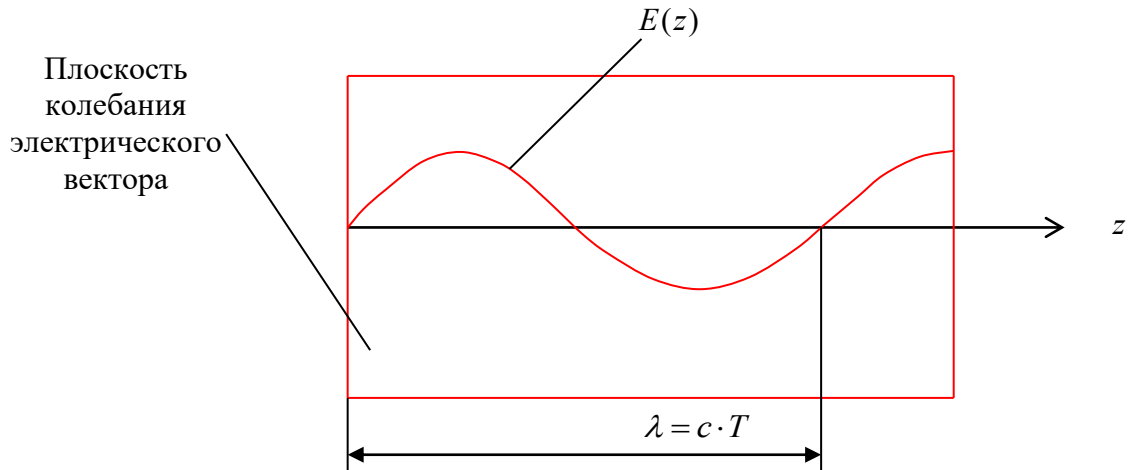
$$a(z, t) = A \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{z}{V}\right) + \varphi\right] \cong A \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{z}{c}\right) + \varphi\right].$$

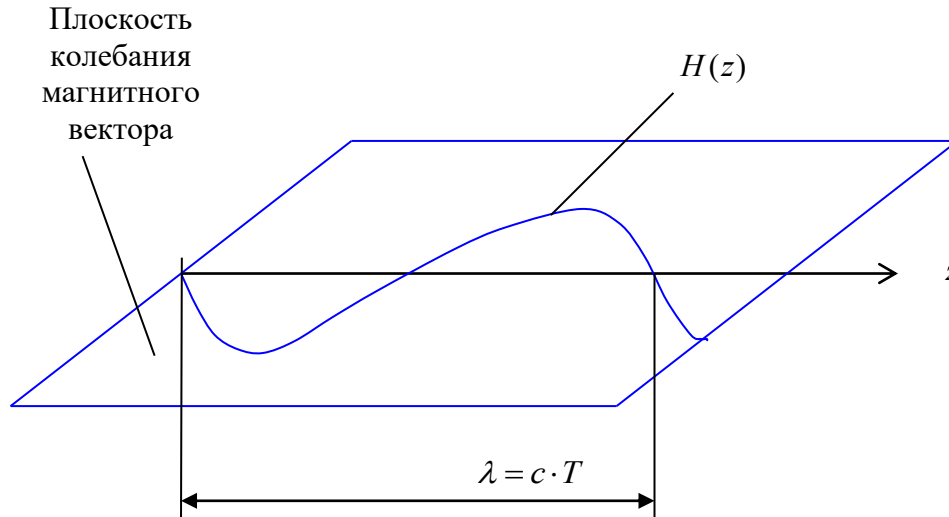
Если начальную фазу принять за  $\varphi = 0$ , то

$$\begin{aligned} a(z, t) &= A \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{z}{c}\right)\right] = A \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} z\right] = \\ &= A \cdot \sin(2\pi\nu_t t - kz) = A \cdot \sin[2\pi(\nu_t t - \nu_z z)] \end{aligned}$$

$A = E_{\text{МАКС}}$  – для электрического вектора;

или  $A = H_{\text{МАКС}}$  – для магнитного вектора.





Плоскость поляризации ЭМВ совпадает с плоскостью колебания магнитного вектора.

Плоскополяризованное ОИ – электрические (и магнитные) векторы всех электромагнитных волн колеблются в одной плоскости.

Неполяризованное излучение – электрические (и магнитные) векторы различных электромагнитных волн колеблются в различных плоскостях.

### Квантовая теория

**Энергия волны переносится в виде квантов (фотонов):**

$$E_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \text{ Джс (Джоуль), (эВ)(электрон-Вольт),}$$

где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ (Джс} \cdot \text{с} = \text{Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{с} = \text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{с}) =$

$$= (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{с}) \cdot 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ В} \cdot \text{с} =$$

$$= e \cdot 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ (В} \cdot \text{с)} = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ (э} \cdot \text{В} \cdot \text{с)};$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ (Джс} \cdot \text{с)} = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ (эВ} \cdot \text{с)}$  – постоянная Планка;

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ (к} = \text{А} \cdot \text{с}).$$

$$E_{\phi} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Джс} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^{14} \frac{\text{мкм}}{\text{с}}}{\lambda} = \frac{2 \cdot 10^{-19} \text{ Джс} \cdot \text{мкм}}{\lambda},$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 10^{-19} \text{ Джс} \cdot \text{мкм}}{E_{\phi} \text{ Джс}}, \text{ мкм}$$

$$E_{\phi} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{4,13 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot c \cdot 3 \cdot 10^{14} \frac{\text{мкм}}{c}}{\lambda} = \frac{1,239 \text{ эВ} \cdot \text{мкм}}{\lambda},$$

$$\lambda = \frac{1,239 \text{ эВ} \cdot \text{мкм}}{E_{\phi} \text{ эВ}}, \text{ мкм}$$

Таким образом, ОИ – это поток отдельных частиц – квантов, распространяющихся со скоростью света, и одновременно – это ЭМ волна с длиной  $\lambda$ .

**При оценке энергии ОИ пользуются квантовой теорией, при описании процесса распространения ОИ в пространстве – волновой теорией.**

Задание:

1.1. Вычислить поток излучения на участке от 0,45 до 0,75 мкм, если спектральная плотность потока излучения (СППИ) постоянна и равна 1,5 Вт/мкм.

1.2. Вычислить монохроматические световые потоки  $d\Phi_{v,1}$ ,  $d\Phi_{v,2}$ ,  $d\Phi_{v,3}$  источника излучения с линейчатым спектром на длинах волн 0,45, 0,55, 0,65 мкм, если каждый из соответствующих потоков излучения равен 2 Вт.

1.3. Найти световой поток гелий-неонового лазера, если его поток излучения равен 10 мВт, а длина волны излучения составляет 632,8 нм.

1.4. Найти монохроматическую облучённость в фотонах поверхности площадью 5 см<sup>2</sup>, если на неё падает монохроматический поток излучения 1 мВт с длиной волны 600 нм.

1.5. Источник с линейчатым спектром испускает монохроматическое излучение на длинах волн 200, 300, 2000 и 3000 нм с энергией излучения по 1020 фотонов в минуту. Определить монохроматические потоки излучения, испускаемые источником в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной частях спектра.

1.6. Определить относительное изменение числа квантов, излучаемых в единицу времени, при изменении длины волны излучения от 1 мкм до 5 мкм, если мощность излучения на обеих длинах волн одинакова.

## Практическое занятие №2. Энергетические и световые параметры оптического излучения

**Цель работы:** Изучение энергетических и фотометрических параметров оптического излучения.

### 1. Энергетические параметры оптического излучения

#### 1.1. Энергия ОИ

Энергия ОИ, падающего на поверхность (ПИ) площадью  $A_{\text{ПИ}}$  за время  $T$

$$Q = n_{\phi} \cdot E_{\phi} \cdot A_{\text{ПИ}} \cdot T, \text{ Дж(ЭВ)},$$

где  $n_{\phi}$  - количество фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени ( $1/\text{м}^2\text{с}$ ),

$$E_{\phi} = h\nu - \text{энергия фотона.}$$

#### 1.2. Энергетический поток ОИ (мощность ОИ)

Энергетический поток ОИ (мощность ОИ)  $\Phi_e$  – отношение энергии, выделяемой за время  $T$ , к этому времени.

Средняя мощность лучистой энергии за период времени  $T$

$$\Phi_e = Q/T, \text{ Дж/с} = \text{Вт.}$$

Мгновенное значение мощности

$$\Phi_e = dQ/dt, \text{ Вт.}$$

Поток ОИ распространяется в пространстве от источника излучения (ИИ) с размером  $r$  и площадью  $A_{\text{ИИ}}$  к приемнику излучения (ПИ) с площадью  $A_{\text{ПИ}}$ , образуя волновую поверхность.

#### 1.3. Энергетическая сила излучения

Энергетическая сила излучения  $I_e$  – отношение потока ОИ  $d\Phi_e$ , распространяющегося от источника внутри малого телесного угла  $d\Omega$ , к этому телесному углу (пространственная плотность потока излучения)

$$I_e(\theta, \varphi) = \frac{d\Phi_{\Omega}}{d\Omega}, \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}.$$

для равномерной силы излучения

$$I_e = \frac{\Phi_{\Omega}}{\Omega}.$$

Поток ОИ в телесном угле  $d\Omega = \sin\theta d\varphi d\theta$  равен



$$d\Phi = I_e(\theta, \varphi)d\Omega = I_e(\theta, \varphi) \sin \theta d\varphi d\theta.$$

Поток излучения в телесном угле  $\Omega$

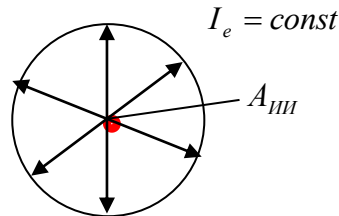
$$\Phi = \int \int I_e(\theta, \varphi)d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} I_e(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta.$$

При  $I_e = const$   $\Phi = 4\pi I_e$ .

Или средняя сила излучения  $I_{ср} = \frac{\Phi}{4\pi}$ .

При неравномерном пространственном распределении потока ОИ сила излучения задается в направлении, определяемом углами  $\theta, \varphi$ , т.е.  $I_e(\theta, \varphi)$ .

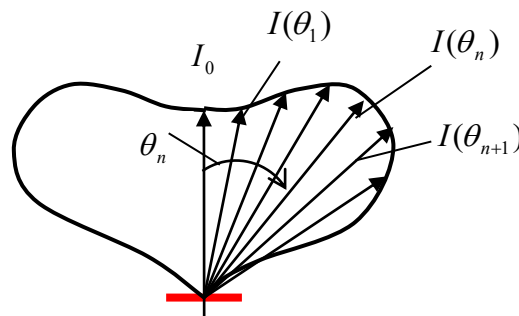
Индикатриса силы излучения – поверхность, образованная концами векторов силы излучения  $I_e(\theta, \varphi)$ .



Если ИИ имеет одинаковую силу излучения по всем направлениям (симметричную по углам  $\theta, \varphi$ )  $I_e(\theta, \varphi) = I_e = const$ , – индикатриса силы излучения – сфера с центром,

совпадающим с ИИ, и радиусом  $I_e$ :

Расчет потока излучения ИИ с индикатрисой силы излучения, симметричной по углу  $\varphi$ , но несимметричной по углу  $\theta$ :



Индикатриса силы излучения- поверхность, образованная концами векторов силы излучения в разных направлениях.

Индикатриса силы излучения разбивается по углу  $\theta$  на  $N$  зон и в каждой зоне сила излучения принимается постоянной и равной среднему значению сил излучения по краям зоны

$$I_{ср} = \frac{I_n + I_{n+1}}{2}.$$

Зональный телесный угол – телесный угол, ограниченный плоскими углами  $\theta_n$  и  $\theta_{n+1}$ :

$$d\Omega = \frac{dA_{\text{пл}}}{l^2} = \sin\theta d\varphi d\theta;$$

$$\Delta\Omega_n = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} \sin\theta d\theta = 2\pi(\cos\theta_n - \cos\theta_{n+1}).$$

Поток излучения, распространяющийся в зональном телесном угле, равен

$$\Delta\Phi_n = I_{\text{срн}} \cdot \Delta\Omega_n = \pi(I_n + I_{n+1})(\cos\theta_n - \cos\theta_{n+1});$$

Полный поток излучения равен

$$\Phi = \sum_{n=1}^{n=N} \Delta\Phi_n = \pi \sum_{n=1}^{n=N} (I_n + I_{n+1})(\cos\theta_n - \cos\theta_{n+1}).$$

#### 1.4. Энергетическая освещенность поверхности

**Энергетическая освещенность поверхности  $E_e$**  – отношение потока ОИ  $d\Phi_e$ , падающего на малую площадку поверхности  $dA_{\text{пл}}$ , к площади этой площадки (**поверхностная плотность падающего потока излучения**)

$$E_e = \frac{d\Phi}{dA_{\text{пл}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$d\Omega = \frac{dA_{\text{пл}} \cos\theta}{l^2};$$

$$E_e = \frac{I_e d\Omega}{dA_{\text{пл}}} = \frac{I_e dA_{\text{пл}} \cos\theta}{dA_{\text{пл}} \cdot l^2} = \frac{I_e \cos\theta}{l^2}.$$

Для равномерно освещенной поверхности

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A_{\text{пл}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

#### 1.5. Энергетическая светимость поверхности

**Энергетическая светимость поверхности  $M_e$**  – отношение потока ОИ  $d\Phi_e$ , испускаемого во все стороны с малой площадки излучающей поверхности  $dA_{\text{пл}}$ , к площади этой площадке (**поверхностная плотность испускаемого потока излучения**)

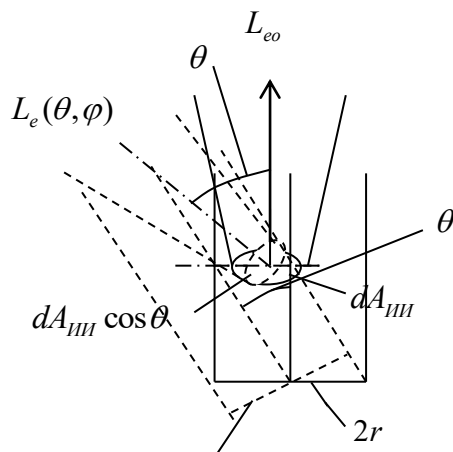
$$M_e = \frac{d\Phi}{dA_{\text{пл}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Связь светимости с освещенностью отражающего объекта с коэффициентом отражения  $\rho_{\text{об}}$

$$M_e = E_e \cdot \rho_{\text{об}}.$$

#### 1.6. Энергетическая яркость поверхности

Энергетическая яркость поверхности в направлении под углом  $\theta$  к нормали поверхности  $L_e(\theta, \varphi)$  – отношение потока излучения  $d\Phi_e$ , испускаемый с малой площадки поверхности  $dA_{III}$ , в малом телесном угле  $d\Omega$ , к произведению площади этой площадке и этого телесного угла и косинуса угла между рассматриваемым направлением и нормалью к площадке  $dA_{III}$



$$L_e(\theta, \varphi) = \frac{2r \cos \theta}{dA_{III} \cos \theta d\Omega} \frac{d\Phi}{m^2 \text{cp}}$$

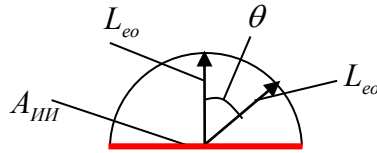
$$\Phi = \iint_{A \Omega} L_e(\theta, \varphi) \cos \theta dA_{III} d\Omega,$$

$$I_e(\theta, \varphi) = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \int_A L_e(\theta, \varphi) \cos \theta dA_{III},$$

$$M_e = \frac{d\Phi}{dA_{III}} = \int_{\Omega} L_e(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega.$$

**Диффузные источники (поверхности)** -  $L_e(\theta, \varphi) = L_{eo} = const$  - равноркие поверхности .

**Индикатриса яркости диффузного объекта-полусфера**, касающаяся излучающей площадки:

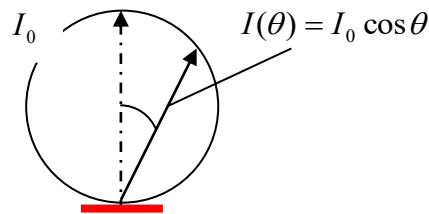


$$dI_{e\theta} = L_{e0} \overline{dA_{III}} \cos \theta,$$

$$I_{e\theta} = \int_A L_{e0} \cos \theta dA_{III} = L_{e0} \cos \theta \cdot A_{III} = I_{e0} \cos \theta;$$

$$I_{e0} = L_{e0} \cdot A_{III}.$$

**Индикатриса силы излучения диффузного объекта - сфера, касающаяся излучающей площадки:**



Для излучающей площадки угол  $\theta$  изменяется от  $\theta = 0$  до  $\theta = \frac{\pi}{2}$ .

Светимость диффузного объекта

$$M_e = \int_{\Omega} L_e \cos \theta d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} L_e \cos \theta \sin \theta d\theta.$$

$$M_e = 2\pi L_{e0} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi L_e. \quad L_e = \frac{M_e}{\pi},$$

$$\text{т.к.} \quad \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{1}{4} \int_0^{\pi/2} \sin 2\theta d2\theta = \frac{1}{4} (-\cos 2\theta) \Big|_0^{\pi/2} = \frac{1}{2}.$$

Яркость изображения диффузного объекта, формируемого ОС

Энергетическая светимость объекта –  $M_{OB}$ .

Энергетическая яркость диффузного объекта

$$L_{OB} = \frac{1}{\pi} \cdot M_{OB}.$$

Входной апертурный угол ОС –  $\sigma$ .

Выходной апертурный угол ОС –  $\sigma'$ .

Увеличение ОС –  $\beta$

Поток излучения от диффузного объекта с яркостью  $L_{OB}$  и площадью  $A_{OB}$ , формирующий изображений

$$\Phi_{из} = L_{OB} \cdot A_{OB} \cdot \frac{\pi D^2_{OC}}{4l^2}.$$

Светимость изображения площадью  $A'_{OB}$  диффузного объекта

$$M_{из} = \frac{\Phi_{из}}{A'_{OB}} = L_{OB} \cdot \frac{A_{OB}}{A'_{OB}} \cdot \frac{\pi D^2_{OC}}{4l^2}$$

Яркость изображения диффузного объекта равна яркости объекта

$$L'_{OB} = \frac{M_{OB}}{\Omega} = L_{OB} \cdot \frac{A_{OB}}{A'_{OB}} \cdot \frac{\pi D^2_{OC}}{4l^2 \cdot \frac{\pi D^2_{OC}}{4l'^2}} = L_{OB} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot \beta^2 = L_{OB}.$$

### Задания

1. Вычислить поток излучения, поступающий на плоскость площадью  $5 \text{ мм}^2$ , расположенную на расстоянии  $2 \text{ м}$  от точечного источника, если его сила излучения равна  $2 \text{ Вт/ср}$ , а угол падения излучения на плоскость составляет  $30^\circ$ .

2. Найти энергетическую яркость диффузно отражающей по закону Ламберта поверхности площадью  $5 \text{ мм}^2$  с коэффициентом отражения  $0,7$ , расположенной на расстоянии  $2 \text{ м}$  от точечного источника, если сила излучения источника равна  $2 \text{ Вт/ср}$ , а угол падения излучения на поверхность составляет  $45^\circ$ .

Указание. Воспользоваться следствием из закона Ламберта.

3. Энергетическая яркость источника равна  $100 \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{ср)}$ . Рассчитать поток излучения, падающий на ПОИ диаметром  $1 \text{ см}$ , находящийся на расстоянии  $10 \text{ м}$  от источника площадью  $1 \text{ см}^2$  и расположенный нормально к падающему излучению.

4. Вычислить поток излучения, падающий нормально на плоскость площадью  $3 \text{ мм}^2$ , находящуюся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от ЧТ в форме отверстия площадью  $1 \text{ мм}^2$  с энергетической светимостью  $0,5 \text{ Вт/мм}^2$ . Плоскость отверстия и облучаемая плоскость параллельны.

Указание. Воспользоваться следствием из закона Ламберта.

5. Найти поток излучения и облучённость, создаваемую этим потоком на плоскости площадью  $3 \text{ мм}^2$ , находящейся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от излучателя площадью  $1 \text{ мм}^2$  с энергетической яркостью  $1,3 \text{ Вт/(мм}^2 \cdot \text{ср)}$ , одинаковой во всех направлениях. Поверхность излучателя параллельна поверхности площадки и перпендикулярна линии, их соединяющей.

6. Найти поток излучения и облучённость, создаваемую этим потоком на плоскости, находящейся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от излучателя площадью  $1 \text{ мм}^2$  с энергетической яркостью  $1,3 \text{ Вт/(мм}^2 \cdot \text{ср)}$ . Излучающая поверхность проектируется на плоскость объективом, имеющим диаметр  $50 \text{ мм}$  и коэффициент пропускания  $1$  и расположенным на расстоянии  $150 \text{ мм}$  от плоскости.

Указание. Воспользоваться приближённым равенством:  $\sin \alpha \approx \text{tg } \alpha$  при малых  $\alpha$ .

7. Найти поток излучения и облучённость, создаваемую этим потоком на плоскости, находящейся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от излучателя площадью  $1 \text{ мм}^2$  с энергетической яркостью  $1,3 \text{ Вт/(мм}^2 \cdot \text{ср)}$ . Излучающая поверхность располагается в

фокальной плоскости объектива с диаметром 60 мм и фокусным расстоянием 200 мм, а облучаемая плоскость - в фокальной плоскости объектива с диаметром 50 мм и фокусным расстоянием 150 мм. Коэффициенты пропускания объективов равны 1.

### Практическое занятие №3. Фотометрические параметры оптического излучения

Это реакции глаза на энергетические параметры ОИ. Световой поток – реакция глаза на энергетический поток излучения

$$\Phi_{v\lambda} = K_{\lambda} \cdot \Phi_{e\lambda},$$

где  $K_{\lambda}$  – коэффициент пропорциональности (монохроматическая чувствительность глаза).

**Чувствительность нервных клеток** – это отношение реакции клетки (т.е. светового потока) к падающему на нее энергетическому потоку:

$$K_{\lambda} = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}}.$$

Спектральный диапазон чувствительности глаза – 0,38...0,78 мкм.

Спектральная характеристика чувствительности глаза

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_v(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)};$$

**Световой поток** – интегральная реакция глаза, т.е. всех светочувствительных элементов (во всем видимом диапазоне) на энергетический поток излучения (в видимом диапазоне)  $\Phi_e$  т.е.  $\Phi_v$ ,

$$\Phi_v = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_e(\lambda) K(\lambda) d\lambda,$$

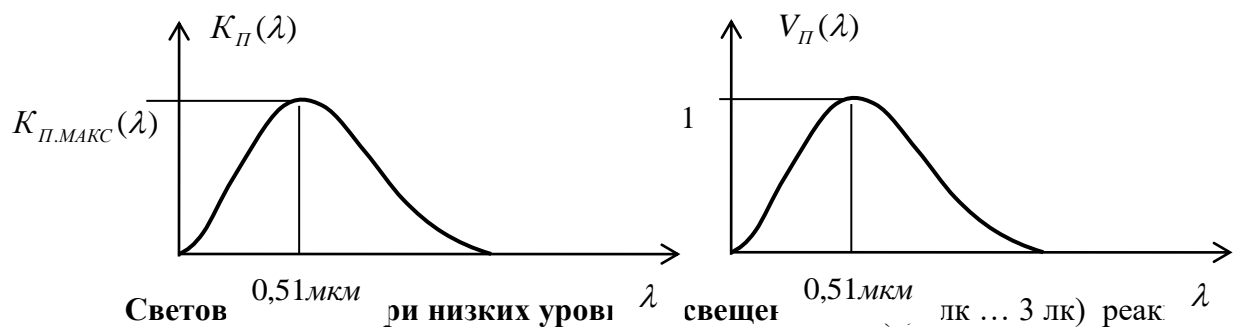
где  $K(\lambda) = K_{II}(\lambda) + K_K(\lambda)$ .

Спектральная характеристика чувствительности палочек

$$K_{II}(\lambda) = K_{\text{МАКС.П}} \cdot V_{II}(\lambda),$$

где  $K_{\text{МАКС.П}}$  – максимальная чувствительность палочек на длине волны  $\lambda = 0,51 \text{ мкм}$ ;

$V_{II}(\lambda)$  – относительная чувствительность палочек.



$$\Phi_{vII} = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) K_{II}(\lambda) d\lambda.$$

**Спектральные чувствительности колбочек** (освещенность > 3 лк) :

$$\bar{r}(\lambda), \quad \bar{g}(\lambda), \quad \bar{b}(\lambda)$$

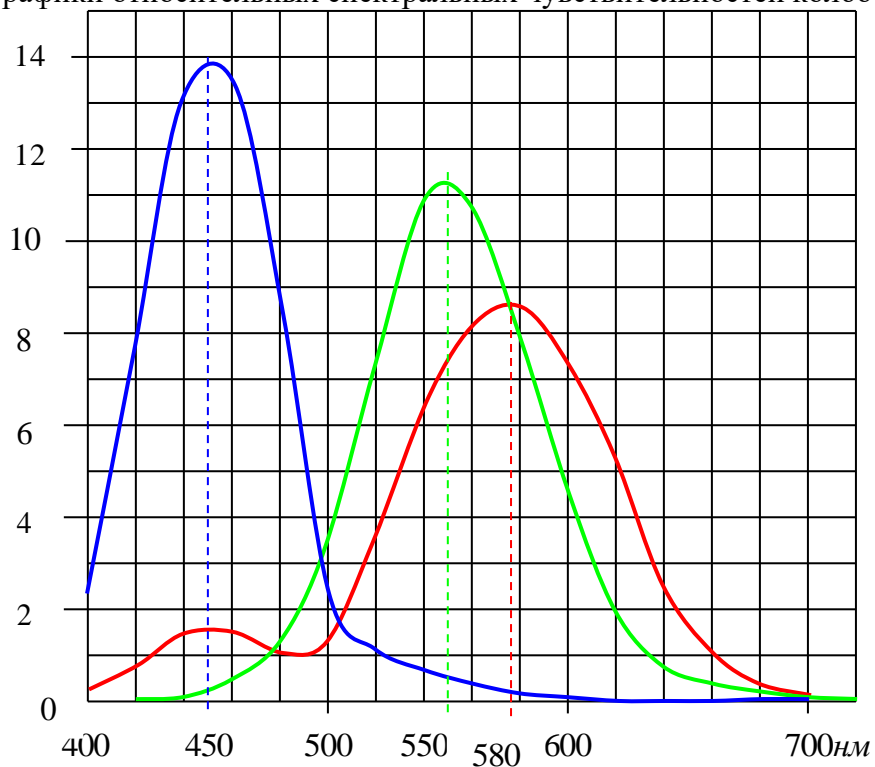
приведены в таблице.

$\lambda$ , нм	$\bar{r}(\lambda)$	$\bar{g}(\lambda)$	$\bar{b}(\lambda)$	$K_K(\lambda)$
----------------	--------------------	--------------------	--------------------	----------------

400	0,24	0	2,1	2,34
420	0,9	0	7,9	8,8
440	1,4	0	13	14,4
460	1,35	0,37	13,4	15,12
480	1,0	1,3	8,3	10,6
500	1,2	3,35	2,33	6,7
520	3,47	7,3	1,1	11,87
540	6,75	11	0,52	18,27
560	8,1	10,9	0,18	19,18
580	8,4	7,9	0,06	16,36
600	7,25	4,5	0,02	11,77
620	5,25	1,98	0	7,23
640	2,7	0,78	0	3,48
660	1,05	0,2	0	1,25
680	0,31	0,04	0	0,35
700	0,23	0,03	0	0,26
	$\Sigma = 49,6$	$\Sigma = 49,65$	$\Sigma = 48,9$	

$$\Sigma = 49,6 = \Sigma = 49,65 = \Sigma = 48,9.$$

Графики относительных спектральных чувствительностей колбочек:



Основной цвет R – интегральная чувствительность красных колбочек

$$\int_{0,38}^{0,78} \bar{r}(\lambda) d\lambda = R;$$

Основной цвет G – интегральная чувствительность зеленых колбочек



$$\int_{0,38}^{0,78} \bar{g}(\lambda) d\lambda = G;$$

Основной цвет В – интегральная чувствительность синих колбочек

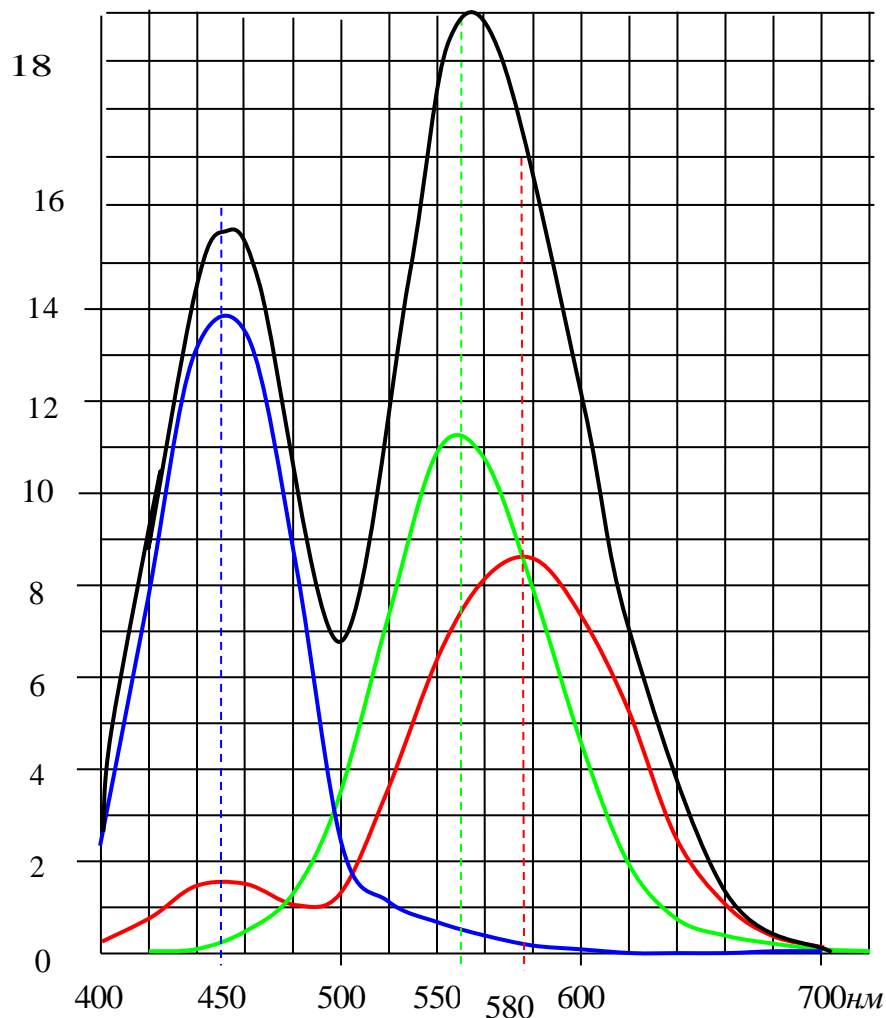
$$\int_{0,38}^{0,78} \bar{b}(\lambda) d\lambda = B,$$

и  $R = G = B$ .

**Спектральные чувствительности колбочек называют спектральными характеристиками основных цветов.**

**Суммарная спектральная чувствительность колбочек**

$$K_K(\lambda) = \bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda).$$



Суммарная спектральная чувствительность колбочек имеет провал в области 500 нм.

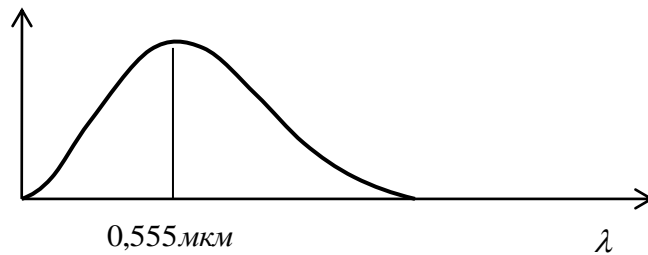
**Спектральная чувствительность глаза (палочек и колбочек)**

$$K(\lambda) = K_{\Pi}(\lambda) + K_K(\lambda) = K_{\text{МАКС}(\Pi+K)} \cdot V_{\Pi+K}(\lambda),$$

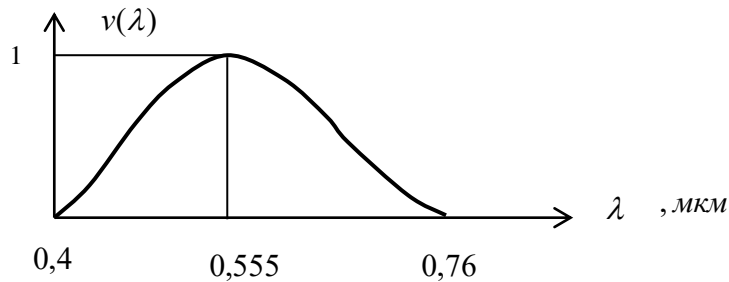
где  $K_{\text{МАКС}(\Pi+K)} = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$  – максимальная чувствительность глаза (световой эквивалент);

$V_{\Pi+K}(\lambda) = V(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность глаза (относительная световая эффективность монохроматических излучений).

$$K(\lambda) = K_{\Pi}(\lambda) + K_K(\lambda)$$



$V(\lambda)$  - относительная спектральная чувствительность глаза



**Световой поток** при средних уровнях освещенности (3 лк ... 100 лк) – реакция палочек и колбочек на ОИ:

1.  $\Phi_V$

$$\Phi_V = \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda}(\lambda) K(\lambda) d\lambda, \text{ лм (люмен)}$$

$$\Phi_V = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \text{ лм (люмен)}$$

где 683 лм/Вт – световой эквивалент;

2. **Сила света**  $I_V$ , лм/ср = кд (кандела).

3. **Освещенность**  $E_V$ , лм/м<sup>2</sup> = лк (люкс).

4. **Светимость**  $M_V$ , лм/м<sup>2</sup>.

5. **Яркость**  $L_v$ , лм/(м<sup>2</sup> ср) = кд/м<sup>2</sup>.

Для оценки световой эффективности ОИ используется:

**коэффициент использования оптического излучения глазом** (отношение светового потока к падающему энергетическому потоку)

$$K_{ГЛ} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda}.$$

**Приближенный метод расчета  $K_{ГЛ}$**

$$K_{ГЛ} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\sum_{n=1}^N \Phi_{e0}(\lambda_n) V(\lambda_n)}{\sum_{n=1}^N \Phi_{e0}(\lambda_n)},$$

$$N = \frac{\lambda_B - \lambda_H}{\Delta\lambda} = \frac{0,78\text{мкм} - 0,38\text{мкм}}{0,02\text{мкм}} = \frac{0,4\text{мкм}}{0,02\text{мкм}} = 20,$$

обычно  $\Delta\lambda = 0,02\text{мкм}$ .

**Для монохроматического излучения**

$$K_{ГЛ\lambda} = V_{\lambda}.$$

Для стандартных источников излучения значения  $K_{ГЛ}$  приводятся в справочниках (Криксунов, Усольцев. Справочник по ИК технике).

**Связь светового и энергетического потоков через коэффициент использования  $K_{ГЛ}$**

$$\Phi_v = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \Phi_{e\lambda\text{МАКС}} \int_{\lambda} \Phi_{e0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda;$$

$$\Phi_v = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \Phi_{e\lambda\text{МАКС}} \int_{\lambda} \Phi_{e0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \cdot \frac{\int_{\lambda} \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda};$$

$$K_{ГЛ} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{e0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda};$$

$$\Phi_e = \Phi_{e\lambda\text{МАКС}} \int_{\lambda} \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda;$$

$$\Phi_v = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \Phi_{e\lambda\text{МАКС}} \int_{\lambda} \Phi_{e0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \Phi_e K_{\text{ГЛ}}.$$

Задания:

1. Найти освещённость искусственного спутника Земли Солнцем, если яркость Солнца равна  $1,5 \text{ Гкд/м}^2$ , а угловой размер Солнца при наблюдении от спутника составляет  $9 \text{ мрад}$ .

2. При серповидной форме Луны можно различить остальные её очертания, так как Луна освещается Землёй. Определить: 1) яркость ночной стороны Луны, освещённой Землёй; 2) яркость дневной стороны Луны, освещённой Солнцем, если коэффициент отражения Луны равен  $0,07$ , Земли -  $0,4$ , яркость Солнца составляет  $1,5 \text{ Гкд/м}^2$ , угловой размер Земли со стороны Луны равен  $34 \text{ мрад}$ , угловой размер Солнца -  $9 \text{ мрад}$ .

Указания: 1. Расстояние от Земли до Солнца считать равным расстоянию от Луны до Солнца.

2. Воспользоваться следствием из закона Ламберта.

3. На высоте  $200 \text{ км}$  над Землёй летит спутник диаметром  $2 \text{ м}$ . Коэффициент отражения корпуса спутника равен  $0,7$ . Спутник освещается Солнцем. Яркость Солнца составляет  $1,5 \text{ Гкд/м}^2$ , а угловой размер Солнца равен  $9 \text{ мрад}$ . Определить освещённость Земли от спутника, освещённого Солнцем, если он рассеивает излучение по закону Ламберта.

Указания: 1. Поглощением в атмосфере пренебречь.

2. Воспользоваться следствием из закона Ламберта.

4. Луна облучается лазером с диаметром пучка  $10 \text{ мм}$ , углом расходимости  $20'$  и мощностью в импульсе  $10^9 \text{ Вт}$ . Излучение лазера проходит через телескоп с диаметром входного зрачка  $10 \text{ мм}$  и выходного -  $250 \text{ см}$ . Расстояние от Земли до Луны равно  $400000 \text{ км}$ .

Определить: 1) потоки излучения, отражённые от поверхности Луны и от уголкового отражателя, доставленного на неё, если коэффициент отражения Луны равен  $0,07$ , а диаметр отражателя составляет  $50 \text{ см}$ ;

2) потоки излучения, попадающие в зрачок телескопа ( $250 \text{ см}$ ) от Луны и от уголкового отражателя, если Луна отражает излучение по закону Ламберта, а расходимость пучка после уголкового отражателя равна  $4''$ .

Указания: 1. Потерями в атмосфере и телескопе пренебречь.

2. Воспользоваться следствием из закона Ламберта.

5. Лампа накаливания имеет яркость  $30 \text{ Мкд/м}^2$  и площадь нити  $1 \text{ см}^2$ . Найти дистанцию, на которой лампа ещё видна глазом, если пороговая освещённость для глаза равна  $0,025 \text{ мклк}$ .

Указание. Поглощением в атмосфере пренебречь.

6. На каком расстоянии видна простым глазом в космосе лампа накаливания с яркостью  $50 \text{ Мкд/м}^2$  и с площадью тела накала  $2 \text{ см}^2$ , если пороговая освещённость для глаза равна  $0,025 \text{ мклк}$ ?

## Практическое занятие №4 Колориметрия

Цель работы: изучение теории цветного зрения и колориметрических систем.

### Основные цвета R, G, B

Основной цвет R – интегральная чувствительность красных колбочек

$$R = \int_{0,38}^{0,78} \bar{r}(\lambda) d\lambda;$$

Основной цвет G – интегральная чувствительность зеленых колбочек

$$G = \int_{0,38}^{0,78} \bar{g}(\lambda) d\lambda;$$

Основной цвет B – интегральная чувствительность синих колбочек

$$B = \int_{0,38}^{0,78} \bar{b}(\lambda) d\lambda;$$

$$R = G = B.$$

**Оптическое излучение произвольного цвета S со спектральной характеристикой  $\Phi_{eS}(\lambda)$**

**Реакция R колбочек на цвет S (красный световой поток) или красная координата цвета**

$$r'_S = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda;$$

**Реакция G колбочек на цвет S (зеленый световой поток) или зеленая координата цвета**

$$g'_S = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda;$$

**Реакция B колбочек на цвет S (синий световой поток) или синяя координата цвета**

$$b'_S = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda.$$

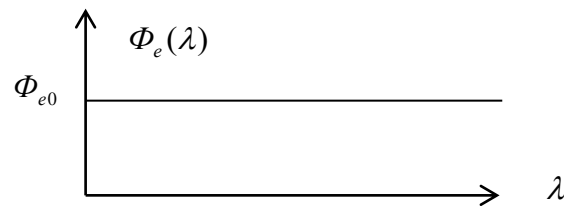
Цвет S оптического излучения, т.е. суммарная реакция трех типов колбочек на поток излучения со спектральной характеристикой  $\Phi_{eS}(\lambda)$ , равен сумме координат цвета

$$S = r'_S + g'_S + b'_S.$$

**Световой поток  $\Phi_{vS}$  оптического излучения произвольного цвета S со спектральной характеристикой  $\Phi_{eS}(\lambda)$  – есть суммарная реакция палочек и колбочек на оптическое излучение**

$$\Phi_{vS} = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \int \Phi_{eS}(\lambda) V(\lambda) d\lambda.$$

Равноэнергетическое излучение  $\Phi(\lambda) = \Phi_0 = const$  характеризуется белым цветом  $W$ , когда координаты цвета (т.е. реакции трех типов колбочек)  $r'_w, g'_w, b'_w$  равны



$$r'_w = \Phi_{e0} \int_{0,38}^{0,78} \bar{r}(\lambda) d\lambda = \Phi_{e0} \cdot R;$$

$$g'_w = \Phi_{e0} \int_{0,38}^{0,78} \bar{g}(\lambda) d\lambda = \Phi_{e0} \cdot G;$$

$$b'_w = \Phi_{e0} \int_{0,38}^{0,78} \bar{b}(\lambda) d\lambda = \Phi_{e0} \cdot B$$

$$r'_w = g'_w = b'_w ;$$

$$W = r'_w + g'_w + b'_w = \Phi_0 (R + G + B).$$

**Световой поток равноэнергетического излучения**

$$\Phi_{vw} = 683 \frac{\text{лМ}}{\text{Вт}} \cdot \Phi_{e0} \int V(\lambda) d\lambda .$$

Белый цвет будет восприниматься «белым» независимо от величины  $\Phi_{e0}$ . Множитель  $\Phi_{e0}$  определяет лишь мощность (световой поток) излучения белого цвета.

### 3 – х компонентная теория цветового зрения

Ломоносовым и Ньютоном была разработана трехкомпонентная теория цветового зрения, которая заключается в том, что любой цвет может быть представлен в виде определенной комбинации трех определенных (основных)  $R, G, B$  цветов.

Соответственно этой теории разработан ряд колориметрических систем, в которых цвет представляется в виде точки с определенными пространственными координатами в цветовом пространстве – координатами цветности.

1) Основным свойством всех колориметрических систем является равенство основных цветов  $R = G = B$ , что соответствует физиологии зрения человека, т.к. белый цвет вызывает одинаковые реакции колбочек.

2) Точка цветности суммы двух цветов лежит на прямой, соединяющей точки цветности двух цветов и делит прямую на отрезки, обратно пропорциональные весам цветов, т.е. координатам цвета.

3) Свойство метамерности заключающееся в том, что один и тот же цвет может быть получен от ОИ с разной спектральной характеристикой (т.е. спектральная характеристика однозначно не определяет цвет ОИ).

Колориметрические системы отличаются между собой выбором спектральных характеристик основных цветов, с помощью которых выражаются остальные цвета.

### Физиологическая колориметрическая система $R, G, B$

В колориметрической системе  $R, G, B$  в качестве основных  $R, G, B$  цветов выбраны реакции колбочек на равноэнергетическое излучение (белый свет) единичной мощности ( $\Phi_e(\lambda) = const = 1$ ).

Таким образом, в данной системе спектральными характеристиками основных цветов являются спектральные характеристики колбочек.

Основные  $R, G, B$  цвета при  $\Phi_e(\lambda) = const = 1$ :

$$R = 1 \cdot \int_{0,38}^{0,78} \bar{r}(\lambda) d\lambda;$$

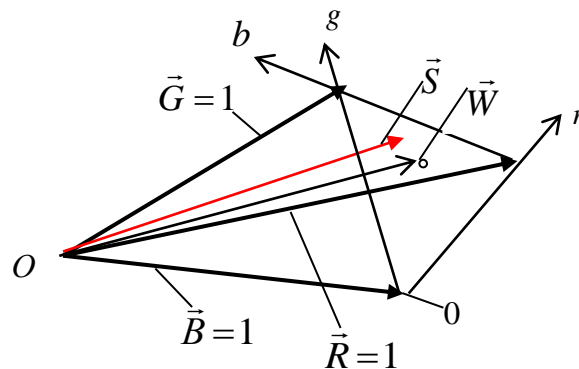
$$G = 1 \cdot \int_{0,38}^{0,78} \bar{g}(\lambda) d\lambda;$$

$$B = 1 \cdot \int_{0,38}^{0,78} \bar{b}(\lambda) d\lambda.$$

Поскольку  $R = G = B$ , то в относительных единицах приняли

$$R = G = B = 1.$$

$R = 1, G = 1, B = 1$  – единичные основные цвета.



Графически единичные основные цвета  $R = 1, G = 1, B = 1$  – могут быть представлены в виде трех некопланарных (не лежащих в одной плоскости) **единичных (равной длины) векторов**, исходящих из одной точки:

При соединении концов одинаковых векторов  $\vec{R} = 1, \vec{G} = 1, \vec{B} = 1$  образуется треугольник – **цветовой треугольник** с системой координат  $r, g$ .

При одинаковых углах между векторами цветовой треугольник получается равносторонним (треугольник Ньютона).

Точки пересечения векторов основных цветов с плоскостью цветового треугольника – вершины цветового треугольника.

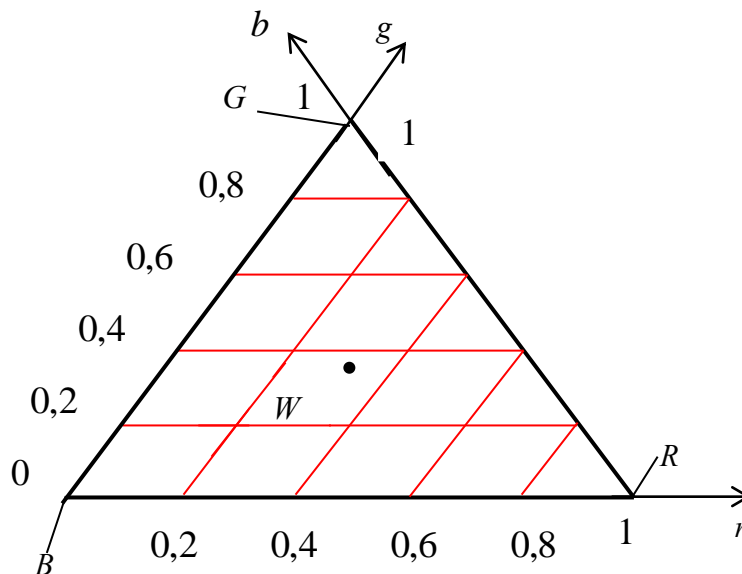
Координаты вершин цветового треугольника – **координаты цветности основных  $R, G, B$  цветов.**

**Пространство, ограниченное векторами основных цветов и цветовым треугольником – цветное пространство или цветовой охват.**

Вектора произвольных цветов лежат между векторами основных цветов.

Точка пересечения вектора цвета с цветовым треугольником – точка цветности, положение которой в цветовом треугольнике зависит от соотношения основных цветов  $R, G, B$  и не зависит от их абсолютных величин. Координаты точки – координаты цветности.

### Равносторонний цветовой график Ньютона



Рассмотрим, каким образом отобразится конец вектора белого цвета  $W$  на равностороннем цветовом треугольнике.

**Т.к. координаты белого цвета**

$$r'_w = g'_w = b'_w,$$

то и длины векторов координат цвета равны

$$R = G = B = 1.$$

Суммарный вектор 2-х координат цвета  $\vec{g}'_w = 1$  и  $\vec{b}'_w = 1$  равен

$$\vec{g}'_w + \vec{b}'_w = \vec{G} + \vec{B} = 2$$

и пересечет сторону цветового треугольника  $GB$  посередине.





$$r_w = \frac{1}{3}; \quad g_w = \frac{1}{3}; \quad b_w = \frac{1}{3}.$$

### Координаты произвольного цвета $S$

$$r'_s = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda;$$

$$g'_s = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda;$$

$$b'_s = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda.$$

откладываются на векторах основных цветов и последовательно суммируются.  
Можно показать, что координаты цветности на цветовом графике равны

$$r_s = \frac{r'_s}{r'_s + g'_s + b'_s};$$

$$g_s = \frac{g'_s}{r'_s + g'_s + b'_s};$$

$$b_s = \frac{b'_s}{r'_s + g'_s + b'_s},$$

причем  $r'_s + g'_s + b'_s = 1$ .

Координаты  $r, g$  определяются только соотношением длин векторов (не зависят от абсолютных значений), т.е. определяют цветность ОИ и называются координатами цветности.

**Определим координаты цветности белого цвета равноэнергетического ОИ, координаты цвета которого равны**

$$r'_w = \Phi_{e0} R; \quad g'_w = \Phi_{e0} G; \quad b'_w = \Phi_{e0} B;$$

по формулам

$$r_w = \frac{R}{R + G + B} = \frac{1}{3};$$

$$g_w = \frac{G}{R + G + B} = \frac{1}{3}.$$

$$b_w = \frac{B}{R+G+B} = \frac{1}{3}.$$

Относительный световой поток (яркость) цвета  $S$  – световой поток цвета  $S$ , нормированная на световой поток белого цвета, из которого образуется цвет  $S$ .

$$\tau_S = \frac{\Phi_{VS}}{\Phi_{VW}} = \frac{\int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eW}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}.$$

Координаты цветности монохроматических излучений  $\Phi_{e\lambda}$ :

$$r'_\lambda = \Phi_{e\lambda} \bar{r}_\lambda;$$

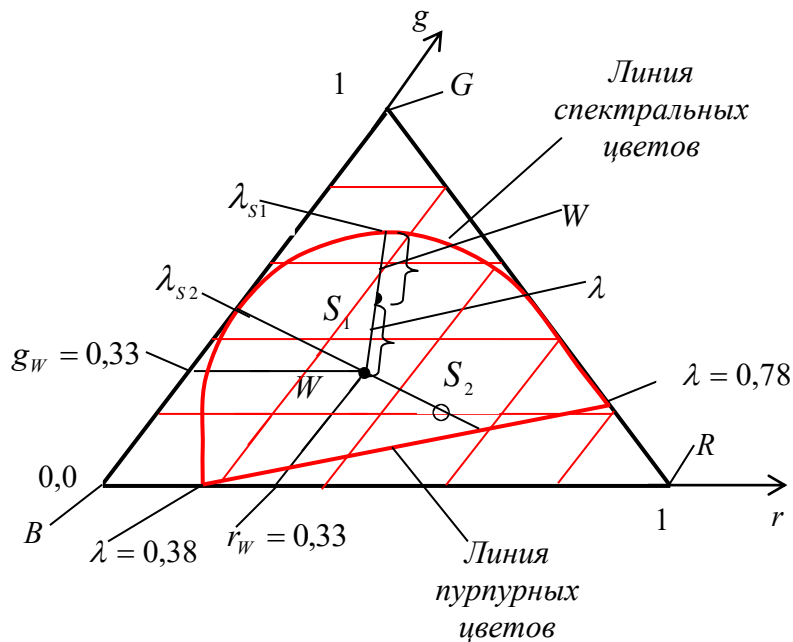
$$g'_\lambda = \Phi_{e\lambda} \bar{g}_\lambda;$$

$$b'_\lambda = \Phi_{e\lambda} \bar{b}_\lambda;$$

$$r_\lambda = \frac{r'_\lambda}{r'_\lambda + g'_\lambda + b'_\lambda} = \frac{\bar{r}_\lambda}{\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda};$$

$$g_\lambda = \frac{g'_\lambda}{r'_\lambda + g'_\lambda + b'_\lambda} = \frac{\bar{g}_\lambda}{\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda}.$$

На цветовом графике координаты цветности монохроматических излучений образуют линию цветности монохроматических излучений (линию цветности спектральных цветов)

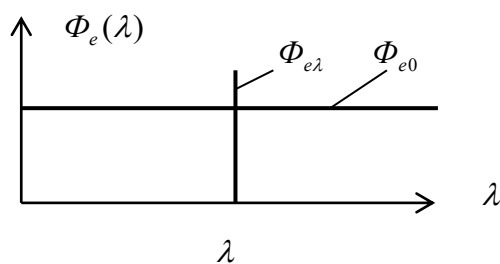


Линия спектральных цветов – совокупность координат цветности монохроматических излучений.

Точка пересечения прямой, соединяющей точку цветности белого цвета с точкой цветности цвета  $S$ , с линией спектральных цветов, определяет доминирующую длину волны цвета -  $\lambda_{S_{дом}}$ .

Доминирующая длина волны пурпурных цветов -  $\lambda_{S_{дом}}$  определяется  $\lambda_{S_{дом}}$  цвета, дополняющего пурпурный цвет до белого цвета.

Любой цвет может быть представлен как смесь светового потока белого (равноэнергетического) ОИ и светового потока монохроматического ОИ, взятых в определенных пропорциях:



$$S = mW + n\lambda$$

Когда количество белого цвета  $m = 0$ , цвет – монохроматический, когда количество монохроматического цвета  $n = 0$ , цвет – белый.

Все цвета, образованные такой смесью, взятой в различных пропорциях, лежат на прямой, соединяющей точку цветности белого цвета и точку цветности монохроматического излучения.

Количество монохроматического излучения  $n$  в смеси с белым определяется отрезком  $WS$ , а количество белого  $m$  – отрезком  $S\lambda_s$ . Отношение отрезка  $WS$  (от точки цветности белого цвета до точки цветности цвета  $S$ ) к

полному отрезку  $W\lambda_s$  (от точки цветности белого цвета до точки цветности монохроматического излучения) определяет чистоту цвета

$$p_s = \frac{WS}{W\lambda_s} = \frac{r_w - r_s}{r_w - r_{\lambda s}} = \frac{g_w - g_s}{g_w - g_{\lambda s}},$$

Для белого цвета  $p_w = 0$ ;

Для монохроматического цвета  $p_\lambda = 1$ .

Таким образом, цвет характеризуется тремя физиологическими параметрами –

- доминирующей длиной волны  $\lambda_{\text{доо}}$ ,
- чистотой цвета  $p_s$ ,
- относительной яркостью  $\tau_s$ .

Недостатки колориметрической системы  $R, G, B$ :

- большое количество вычислений при определении параметров цвета, т.к. отдельно вычисляются координаты цвета  $r'_s, g'_s, b'_s$  и относительная яркость цвета  $\tau_s$ .
- неудобства, связанные с использованием цветового треугольника с непрямоугольной координатной сеткой.

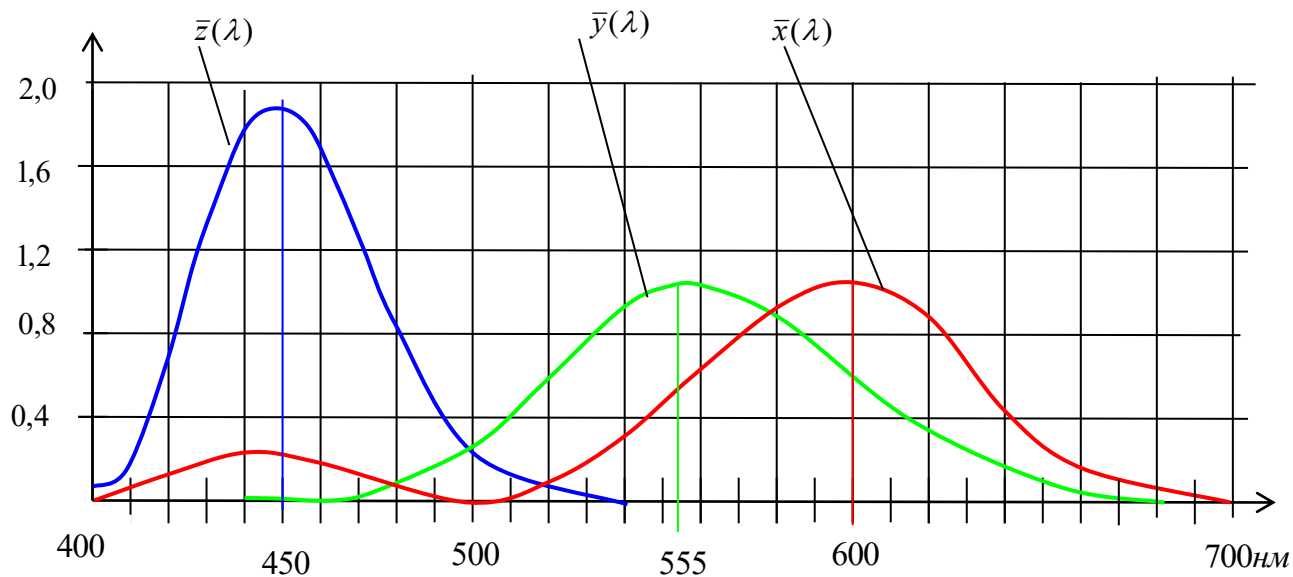
Эти недостатки устранены в колориметрической системе  $X, Y, Z$ , предложенной международной комиссией по освещению МКО в 1931 г. и широко применяющейся до настоящего времени.

### Колориметрическая система $X, Y, Z$ (МКО, 1931)

В данной системе за основные цвета приняты цвета искусственные цвета  $X, Y, Z$ , спектральные характеристики (удельные цветовые координаты) которых получены в результате линейных преобразований спектральных характеристики колбочек:

$$\begin{aligned}\bar{x}(\lambda) &= 1,782\bar{r}(\lambda) - 0,987\bar{g}(\lambda) + 0,205\bar{b}(\lambda); \\ \bar{y}(\lambda) &= V(\lambda) - \text{функция видности глаза}; \\ \bar{z}(\lambda) &= \bar{b}(\lambda).\end{aligned}$$

Спектральные характеристики основных  $X, Y, Z$  цветов



То, что удельная координата  $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$  равна спектральной чувствительности глаза, позволяет сократить количества вычислений, так как в процессе вычисления координат цветности вычисляется и яркость цвета.

$$X = 1 \cdot \int_{0,38}^{0,78} \bar{x}(\lambda) d\lambda;$$

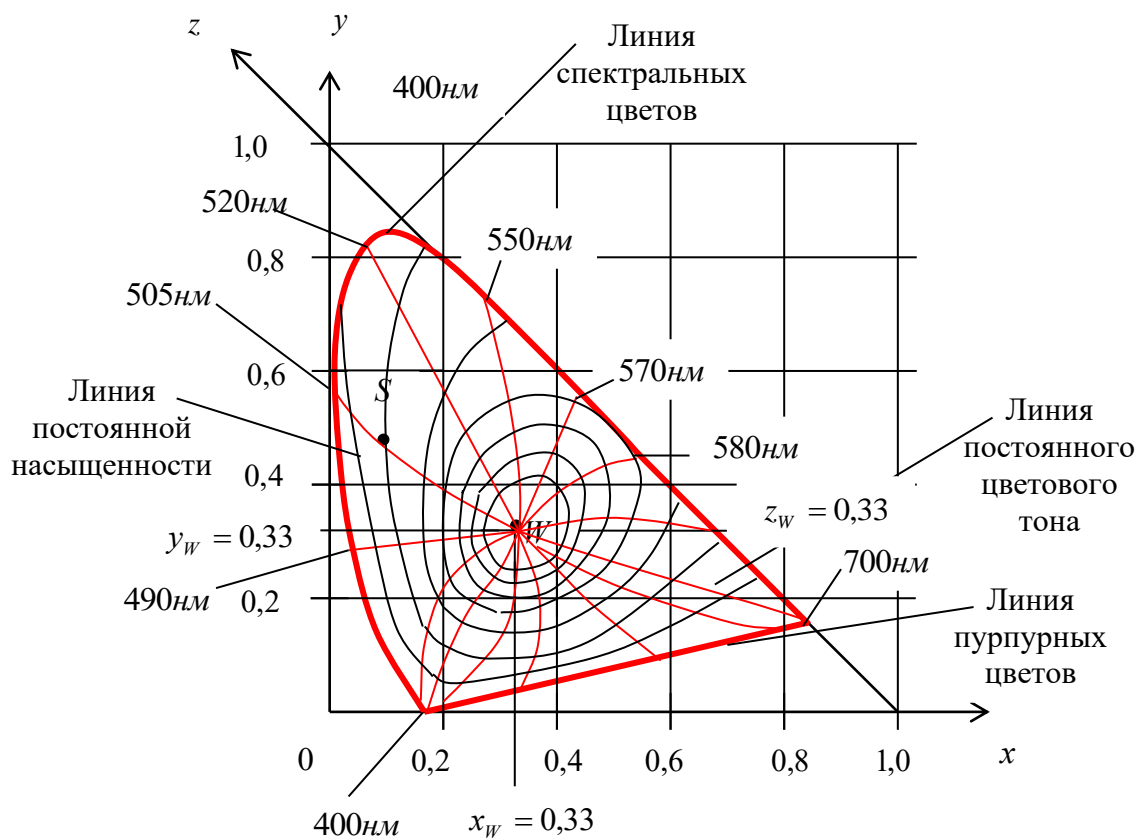
$$Y = 1 \cdot \int_{0,38}^{0,78} \bar{y}(\lambda) d\lambda;$$

$$Z = 1 \cdot \int_{0,38}^{0,78} \bar{z}(\lambda) d\lambda.$$

$$X = Y = Z$$

$$x'_w = \Phi_{e0} X; \quad y'_w = \Phi_{e0} Y; \quad z'_w = \Phi_{e0} Z;$$

Цветовой график системы  $X, Y, Z$ - прямоугольный, что более удобно для использования:



**Физиологические параметры цвета** – доминирующая длина волны, чистота цвета и относительная яркость, определяются в системе  $X, Y, Z$  аналогично системе  $R, G, B$ :

координаты цвета

$$x_s' = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda;$$

$$y_s' = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda;$$

$$z_s' = \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda;$$

координаты цветности

$$x_s = \frac{x_s'}{x_s' + y_s' + z_s'}; \quad y_s = \frac{y_s'}{x_s' + y_s' + z_s'}; \quad z_s = \frac{z_s'}{x_s' + y_s' + z_s'};$$

$$x_s + y_s + z_s = 1;$$

световой поток цвета

$$\Phi_{VS} = 683 \int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda;$$

относительная яркость цвета

$$\tau_S = \frac{\int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eS}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{0,38}^{0,78} \Phi_{eW}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda};$$

чистота цвета

$$p_S = \frac{x_W - x_S}{x_W - x_{\lambda S}} = \frac{y_W - y_S}{y_W - y_{\lambda S}};$$

доминирующая длина волны цвета -  $\lambda_S$ .

Рассчитаем и нанесем на цветовой график  $x, y$  координаты цветности монохроматических излучений  $\Phi_{e\lambda}$ :

Координаты цвета монохроматического излучения

$$x'_{\lambda} = \Phi_{e\lambda} \bar{x}_{\lambda};$$

$$y'_{\lambda} = \Phi_{e\lambda} \bar{y}_{\lambda};$$

$$z'_{\lambda} = \Phi_{e0} \bar{z}_{\lambda};$$

координаты цветности

$$x_{\lambda} = \frac{x'_{\lambda}}{x'_{\lambda} + y'_{\lambda} + z'_{\lambda}} = \frac{\bar{x}_{\lambda}}{\bar{x}_{\lambda} + \bar{y}_{\lambda} + \bar{z}_{\lambda}};$$

$$y_{\lambda} = \frac{y'_{\lambda}}{x'_{\lambda} + y'_{\lambda} + z'_{\lambda}} = \frac{\bar{y}_{\lambda}}{\bar{x}_{\lambda} + \bar{y}_{\lambda} + \bar{z}_{\lambda}}.$$

### Психофизиологические параметры цвета

Психофизиологические параметры цвета – параметры, которые описывают цвет с учетом психологии человека, т.е. с учетом работы мозга. Таким образом, психофизиологические параметры цвета – это ощущения человеком физиологических параметров цвета.

Психофизиологические параметры цвета – параметры, которые описывают цвет с учетом психологии человека, т.е. с учетом работы мозга.



Таким образом, психофизиологические параметры цвета – это ощущения человеком физиологических параметров цвета.

Психофизиологические параметры цвета:

- цветовой тон  $\lambda_T$  – ощущение доминирующей длины волны;
- насыщенность  $H$  – ощущение чистоты цвета;
- светлота  $L$  – ощущение яркости цвета.

Цветовой порог – это ощущение минимального изменения цвета – минимальная разница между цветами.

Если известна величина этого порога, то можно определить различие между цветами (цветовое различие) числом порогов между ними.

Цветовой тон – ощущение доминирующей длины волны.

На цветовом графике  $x, y$  нанесены линии постоянного цветового тона. Из графика видно, что линии постоянного цветового тона являются прямыми в области желто-зеленых цветов и наиболее сильно искривлены в области синих и красных цветов, т.е. в области максимального числа порогов по насыщенности. При этом в синей области спектра цветовой тон смещается в более коротковолновую область, а в красной – в длинноволновую область.

## ЗАДАЧА 1

Построить цветовой график и линию спектральных цветов (цветности монохроматических излучений) на цветовом графике в колориметрической системе  $X, Y, Z$  по координатам цветности излучений с длинами волн  $\lambda_1 = 400\text{нм}$ ;  $\lambda_2 = 450\text{нм}$ ;  $\lambda_3 = 500\text{нм}$ ;  $\lambda_4 = 550\text{нм}$ ;  $\lambda_5 = 600\text{нм}$ ;  $\lambda_6 = 650\text{нм}$ ;  $\lambda_7 = 700\text{нм}$ ;

Обозначить координату цветности равноэнергетического излучения  $W$ .

Рассчитаем и нанесем на цветовой график  $x, y$  координаты цветности монохроматических излучений с мощностью  $\Phi_{e\lambda}$ :

Координаты цвета монохроматического излучения

$$x'_\lambda = \int_0^\infty \Phi_e(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda = \Phi_{e\lambda} \bar{x}_\lambda;$$

$$y'_\lambda = \int_0^\infty \Phi_e(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = \Phi_{e\lambda} \bar{y}_\lambda;$$

$$z'_\lambda = \int_0^\infty \Phi_e(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda = \Phi_{e\lambda} \bar{z}_\lambda;$$

координаты цветности монохроматических излучений

$$x_\lambda = \frac{x'_\lambda}{x'_\lambda + y'_\lambda + z'_\lambda} = \frac{\bar{x}_\lambda}{\bar{x}_\lambda + \bar{y}_\lambda + \bar{z}_\lambda};$$

$$y_{\lambda} = \frac{y'_{\lambda}}{x'_{\lambda} + y'_{\lambda} + z'_{\lambda}} = \frac{\bar{y}_{\lambda}}{\bar{x}_{\lambda} + \bar{y}_{\lambda} + \bar{z}_{\lambda}}.$$

### ЗАДАЧА 2

Определить координаты цветности излучения ртутной лампы, имеющей линейчатый спектр излучения. Определить чистоту цвета излучения лампы.

$\lambda_n, \text{мкм}$	$\Phi_e(\lambda_n)$	$\bar{x}(\lambda_n)$	$\bar{y}(\lambda_n)$	$\bar{z}(\lambda_n)$	$x'(\lambda_n)$	$y'(\lambda_n)$	$z'(\lambda_n)$
0,404	0,3	0,0232	0,0006	0,1102	0,007	0,0007	0,033
0,436	1,0	0,3285	0,0168	1,623	0,3285	0,0168	1,623
0,546	0,7	0,3597	0,9803	0,0134	0,2511	0,6862	0,0094
0,578	0,47	0,9163	0,87	0,0017	0,4307	0,4089	0,008

$$x' = \sum_{n=1}^{N=4} x'(\lambda_n) = 1,0173;$$

$$y' = \sum_{n=1}^{N=4} y'(\lambda_n) = 1,1121;$$

$$z' = \sum_{n=1}^{N=4} z'(\lambda_n) = 1,6734;$$

$$\sum_{n=1}^{N=4} x'(\lambda_n) + \sum_{n=1}^{N=4} y'(\lambda_n) + \sum_{n=1}^{N=4} z'(\lambda_n) = 3,8028;$$

$$x = 0,2675;$$

$$y = 0,2924.$$

### ЗАДАЧА 3

Определить цветовой охват трех монохроматических излучений :

$$R(\lambda = 700\text{нм}); \quad G(\lambda = 546,1\text{нм}); \quad B(\lambda = 435,8\text{нм})$$

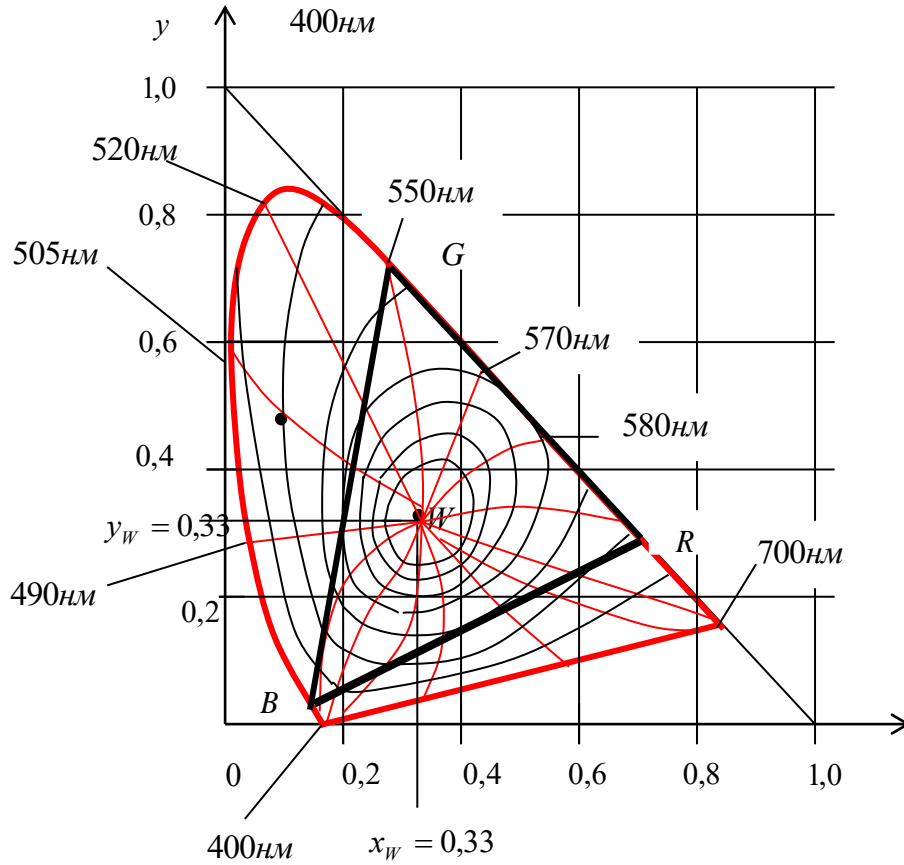
$$x_{\lambda} = \frac{\bar{x}_{\lambda}}{\bar{x}_{\lambda} + \bar{y}_{\lambda} + \bar{z}_{\lambda}};$$

$$y_{\lambda} = \frac{\bar{y}_{\lambda}}{\bar{x}_{\lambda} + \bar{y}_{\lambda} + \bar{z}_{\lambda}};$$

$\lambda_n, \text{нм}$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
435,8	0,3285	0,0168	1,623
546,1	0,3597	0,9803	0,0134

700	0,0114	0,0041	0
-----	--------	--------	---

$$\begin{aligned}
 x_R &= 0,755 & x_G &= 0,265 & x_B &= 0,167 \\
 y_R &= 0,265 & y_G &= 0,7245 & y_B &= 0,085
 \end{aligned}$$



**ЗАДАЧА 4**

Определить цветовой охват трех R, G, B люминофоров TV, имеющих спектральные характеристики излучения:

**1. Координаты цветности красного люминофора**

$\lambda_n, \text{мкм}$	$\Phi_{eR}(\lambda_n)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x_R'(\lambda)$	$y_R'(\lambda)$	$z_R'(\lambda)$
0,38							
0,40							
0,42							
0,44							
0,46							
0,48							
0,50							
0,52							
0,54	0						

0,56	0,25						
0,58	0,75						
0,60	1,5						
0,62	3,5						
0,64	4,5						
0,66	5,0						
0,68	5,0						
0,70	4,5						
0,72	3,5						
0,74	0						
					$x_R'$	$y_R'$	$z_R'$
					$m_R = x_R' + y_R' + z_R'$		
					$x_R = \frac{x_R'}{x_R' + y_R' + z_R'}$		
					$y_R = \frac{y_R'}{x_R' + y_R' + z_R'}$		

### Координаты цветности красного цвета

$$x_R = 0,68$$

$$y_R = 0,34$$

$$\lambda_R = ; p_R =$$

### 2. Координаты цветности зеленого люминофора

$\lambda_n, \text{мкм}$	$\Phi_{eG}(\lambda_n)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x_G'(\lambda)$	$y_G'(\lambda)$	$z_G'(\lambda)$
0,38							
0,40	0						
0,42	0,05						
0,44	0,20						
0,46	0,50						
0,48	1,00						
0,50	3,00						
0,52	5,00						
0,54	4,70						
0,56	2,20						
0,58	1,25						
0,60	0,90						
0,62	0,50						
0,64	0,25						
0,66	0,05						
0,68	0						
0,70							
0,72							
0,74							

					$x_G'$	$y_G'$	$z_G'$
					$m_G = x_G' + y_G' + z_G'$		
					$x_G = \frac{x_G'}{x_G' + y_G' + z_G'}$ $y_G = \frac{y_G'}{x_G' + y_G' + z_G'}$		

### Координаты цветности зеленого цвета

$$x_G = 0,28$$

$$y_G = 0,6$$

$$\lambda_G =$$

$$p_G =$$

### 3. Координаты цветности синего люминофора

$\lambda_n, \text{мкм}$	$\Phi_{eB}(\lambda_n)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x_B'(\lambda)$	$y_B'(\lambda)$	$z_B'(\lambda)$
0,38	0						
0,40	0,70						
0,42	2,30						
0,44	4,50						
0,46	5,00						
0,48	3,00						
0,50	1,00						
0,52	0,50						
0,54	0,25						
0,56	0,05						
0,58							
0,60							
0,62							
0,64							
0,66							
0,68							
0,70							
0,72							
0,74							
					$x_B'$	$y_B'$	$z_B'$
					$m_B = x_B' + y_B' + z_B'$		

					$x_B = \frac{x_B'}{x_B' + y_B' + z_B'}$ $y_B = \frac{y_B'}{x_B' + y_B' + z_B'}$

Координаты цветности синего цвета

$$x_B = 0,15$$

$$y_B = 0,07$$

$$\lambda_B =$$

$$p_B =$$

#### 4. Координаты цветности белого цвета

Белый цвет получается при соотношении излучений R, G, B люминофоров:

$$\Phi_{eR}(\lambda) : \Phi_{eG}(\lambda) : \Phi_{eB}(\lambda) = 0,51 : 1,0 : 0,19.$$

$\lambda_n, \text{мкм}$	$0,51\Phi_{eR}(\lambda_n)$	$\Phi_{eG}(\lambda_n)$	$0,19\Phi_{eB}(\lambda_n)$	$\Phi_{e\Sigma}(\lambda_n)$
0,38			0	0
0,40		0	0,01	0,01
0,42		0,05	0,44	0,49
0,44		0,20	0,85	1,05
0,46		0,50	0,95	1,45
0,48		1,00	0,57	1,57
0,50		3,00	0,19	3,19
0,52		5,00	0,10	5,1
0,54	0	4,70	0,05	4,75
0,56	0,13	2,20	0,01	2,34
0,58	0,38	1,25		1,63
0,60	0,76	0,90		1,66
0,62	1,78	0,50		2,28
0,64	2,29	0,25		2,54
0,66	2,55	0,05		2,6
0,68	2,55	0		2,55
0,70	2,29			2,29
0,72	1,78			1,78
0,74	0			0

$\lambda_n, \text{мкм}$	$\Phi_{e\Sigma}(\lambda_n)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x_w'(\lambda)$	$y_w'(\lambda)$	$z_w'(\lambda)$
0,38	0						

0,40	0,01						
0,42	0,49						
0,44	1,05						
0,46	1,45						
0,48	1,57						
0,50	3,19						
0,52	5,1						
0,54	4,75						
0,56	2,34						
0,58	1,63						
0,60	1,66						
0,62	2,28						
0,64	2,54						
0,66	2,6						
0,68	2,55						
0,70	2,29						
0,72	1,78						
0,74							
					$x_w'$	$y_w'$	$z_w'$
					$m_w = x_w' + y_w' + z_w'$		
					$x_w = \frac{x_w'}{x_w' + y_w' + z_w'}$		
					$y_w = \frac{y_w'}{x_w' + y_w' + z_w'}$		

**координаты цветности белого цвета:**

$$x_w = 0,31;$$

$$y_w = 0,316.$$

$$\lambda_w =$$

$$p_w =$$

## Практическое занятие №5. Расчет характеристик излучателей

Цель работы: Решение задач на расчет излучения различных объектов.

### Основные понятия

Телесный угол 
$$\Omega = \frac{A_{\text{пр}} \cos \theta}{l^2}, \quad \text{ср}$$

При  $\sigma \leq 22^\circ$   $\Omega = \pi \sigma^2$ .

При малых  $d\sigma$  
$$d\Omega = \frac{\pi D^2}{4l^2}.$$

Сила излучения 
$$I_e = \frac{d\Phi_\Omega}{d\Omega}, \quad \text{Вт/ср}.$$

Поток ОИ 
$$\Phi = \int_\Omega J_e d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_e(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta, \quad \text{Вт};$$

Освещенность поверхности 
$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_{\text{пр}}} = \frac{I_e \cos \theta}{l^2}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

Светимость поверхности 
$$M_e = \frac{d\Phi}{dA_{\text{пр}}}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

Связь светимости с освещенностью 
$$M = E \cdot \rho;$$

Яркость поверхности 
$$L_e = \frac{d^2\Phi}{dA_{\text{пр}} \cos \theta d\Omega}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ср}};$$

$$\Phi = \iint_{A \Omega} L_e(\theta, \varphi) \cos \theta dA_{\text{пр}} d\Omega,$$

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \int_A L_e(\theta, \varphi) \cos \theta dA_{\text{пр}},$$

$$M_e = \frac{d\Phi}{dA_{\text{пр}}} = \int_\Omega L_e(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega.$$



Диффузные источники  $I_{e\theta} = I_{e0} \cos \theta$ ;  $L_e = \frac{M_e}{\pi}$ .

### Задача 1

Определить полный поток излучения от диффузного (равнояркого) круглого диска с яркостью  $L_{e0}$  и поток излучения в оптическую систему с диаметром зрачка  $D_{3P}$ , расположенную на расстоянии  $l$  от диска под углом  $\theta$  к нормали излучающего диска.

**Сила излучения равнояркого диска в направлении  $\theta$**

$$I_e(\theta) = \int_{A_{III}} L_{e0} \cdot \cos \theta \cdot dA_{III} = L_{e0} \cdot \cos \theta \cdot A_{III} = I_{e0} \cdot \cos \theta;$$

$$I_{e0} = L_{e0} \cdot A_{III} = L_{e0} \cdot \frac{\pi D_{III}^2}{4} \quad \text{сила излучения по нормали к диску.}$$

**Полный поток (в полусфере)**

$$\Phi_e = \int_{\Omega} I_e(\theta, \varphi) d\Omega$$

Индикатриса силы излучения – симметричная относительно угла  $\varphi$

$$\Phi_e = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_e(\theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta =$$

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{e0} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta = 2\pi \cdot I_{e0} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta;$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{1}{4} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin 2\theta \cdot d2\theta = \frac{1}{4} (-\cos 2\theta) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = -\frac{1}{4} (\cos \pi - \cos 0) = \frac{1}{2};$$

$$\Phi_e = 2\pi \cdot I_{e0} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta = 2\pi \cdot I_{e0} \cdot \frac{1}{2} = \pi \cdot I_{e0} = \pi \cdot L_{e0} \cdot \frac{\pi D_{III}^2}{4} = L_{e0} \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_{III}^2}{4}.$$

Поток в оптическую систему, расположенную под углом  $\theta$  к нормали диска

$$\Phi_{eOC} = I_e \cdot \Omega = I_{e0} \cdot \cos \theta \cdot \frac{\pi D_{3P}^2}{4l^2} =$$

$$= L_{e0} \cdot \frac{\pi D_{III}^2}{4} \cdot \frac{\pi D_{3P}^2}{4l^2} \cdot \cos \theta = L_{e0} \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_{III}^2 \cdot D_{3P}^2}{16 \cdot l^2} \cdot \cos \theta.$$

## Задача 2

Определить силу излучения и полный поток излучения от диффузного (равнорядкого) шара с яркостью  $L_{e0}$  диаметром  $D = 2r$ .

Площадь элементарной площадки поверхности шара

$$dA_{III} = r \cdot d\theta \cdot r \cdot \sin \theta \cdot d\varphi = r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\varphi \cdot d\theta.$$

Силу излучения в вертикальном направлении (по вертикальной оси, относительно которой задан угол  $\theta$ ) получаем путем интегрирования яркости по углу  $\varphi$  в пределах от  $0$  до  $2\pi$  (т.к. индикатриса симметричная) и по углу  $\theta$  в пределах от  $0$  до  $\frac{\pi}{2}$ , т.к. вклад яркости в силу излучения дают площадки от полусферы):

$$\begin{aligned} I_e &= \iint_{A_{III}} L_{e0} \cdot \cos \theta \cdot dA_{III} = \\ &= L_{e0} \cdot r^2 \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \\ &= L_{e0} \cdot r^2 \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{4} (-\cos 2\theta) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = L_{e0} \cdot r^2 \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{4} \cdot 2 = L_{e0} \cdot \pi \cdot r^2 = L_{e0} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = I_{e0}. \end{aligned}$$

Сила излучения равнорядкого шара такая же как и у круглого равнорядкого диска в направлении нормали, но потоки излучения разные, т.к. у шара – сила излучения постоянна, а у диска изменяется по  $\cos \theta$ .

Поэтому для шара можно сразу написать

$$\Phi_{\text{ПОЛН}} = 4\pi \cdot I_{e0};$$

$$\Phi_{0,5} = 2\pi \cdot I_{e0}.$$

Тот же результат получим путем интегрирования:

**поток в полусферу**

$$\Phi_{0,5} = \int_{\Omega} I_{e0} d\Omega = I_{e0} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta d\theta = 2\pi \cdot I_{e0} \cdot (-\cos \theta) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = 2\pi \cdot I_{e0}.$$

**полный поток**

$$\Phi_{\text{ПОЛН}} = \int_{\Omega} I_{e0} d\Omega = I_{e0} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta = 2\pi \cdot I_{e0} \cdot (-\cos \theta) \Big|_0^{\pi} = 4\pi \cdot I_{e0}.$$

## Задача 3

Определить полный поток излучения от диффузного (равнояркого) цилиндра высотой  $H$  и диаметром  $2r$  с яркостью  $L_{e0}$  и поток излучения в оптическую систему с диаметром зрачка  $D_{3P}$ , расположенную на расстоянии  $l$  от диска под углом  $\theta$  к нормали поверхности цилиндра.

Площадь элементарной площадки поверхности цилиндра

$$dA_{III} = r \cdot d\varphi \cdot H;$$

Каждая элементарная площадка наклонена к нормали поверхности цилиндра под

углом  $\varphi$  в пределах углов  $\varphi$  от  $-\frac{\pi}{2}$  до  $+\frac{\pi}{2}$ .

Найдем силу излучения (по известной яркости  $L_{e0}$ ) по нормали к излучающей поверхности от всех элементарных площадок, т.е. интегрируем по  $\varphi$  в пределах углов

$\varphi$  от  $-\frac{\pi}{2}$  до  $+\frac{\pi}{2}$ :

$$I_{e0} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} L_{e0} \cdot \cos\varphi \cdot dA_{III} =$$

$$= L_{e0} \cdot r \cdot H \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\varphi \cdot d\varphi = L_{e0} \cdot r \cdot H \cdot \sin\varphi \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = 2L_{e0} \cdot r \cdot H = L_{e0} \cdot D \cdot H.$$

Таким образом, сила излучения равнояркого цилиндра диаметром  $D$  и высотой  $H$  равна силе излучения плоской пластины шириной  $D$  и длиной  $H$ .

Поток излучения в оптическую систему, расположенную под углом  $\theta$  к оси цилиндра, и под углом  $(90^\circ - \theta)$  к нормали поверхности цилиндра (при малом телесном угле в пределах малого телесного угла силу излучения можно считать постоянной):

$$\Phi_{eOC} = I_{e0} \cdot \cos(90^\circ - \theta) \cdot d\Omega = I_{e0} \cdot \sin\theta \cdot \frac{\pi D_{3P}^2}{4l^2}.$$

Полный поток (во все стороны) излучения от равнояркого цилиндра получим при интегрировании по углу  $\varphi$  в пределах от  $0$  до  $2\pi$  и по углу  $\theta$  в пределах от  $0$  до  $\pi$ :

$$\Phi_e = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_{e0} \cdot \cos(90^\circ - \theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_{e0} \cdot \sin\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta;$$

$$\int_0^\pi \sin^2\theta \cdot d\theta = \int_0^\pi \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \cdot d\theta = \frac{1}{2} \theta \Big|_0^\pi - \frac{1}{4} \sin 2\theta \Big|_0^\pi = \frac{\pi}{2};$$

$$\Phi_e = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_{e0} \cdot \sin^2\theta \cdot d\theta = I_{e0} \cdot 2\pi \cdot \frac{\pi}{2} = \pi^2 \cdot I_{e0} = \pi^2 \cdot L_{e0} \cdot D \cdot H.$$

#### Задача 4

Диффузный объект освещается лазерным излучением передающей ОС

мощностью  $\Phi_{e\lambda} = 20 \text{ Вт}$  с угловой расходимостью  $2W_{\text{ПЕР}} = 1^\circ$  расположенной на расстоянии  $l = 50 \text{ м}$ .

Определить поток излучения, попадающий в приемную ОС с  $D_{3P} = 20 \text{ мм}$ , расположенную на том же расстоянии  $l = 50 \text{ м}$  с угловым полем  $2W_{\text{ПР}} = 1^\circ$ .

Угол между осями визирования  $\theta$  – пренебрежимо мал.

Диаметр освещенной поверхности диффузного объекта на расстоянии  $l$  от ОЭП равен

$$D_{\text{ОСВ}} = l \cdot 2W_{\text{ПЕР}}.$$

Площадь освещенной поверхности объекта

$$A_{\text{ОСВ}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ОСВ}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot l^2 \cdot W_{\text{ПЕР}}^2}{4}.$$

Освещенность объекта

$$E_{e\lambda} = \frac{\Phi_{e\lambda}}{A_{\text{ОСВ}}}.$$

Светимость объекта с коэффициентом отражения  $\rho$

$$M_{e\lambda} = \rho \cdot E_{e\lambda} = \frac{\Phi_{e\lambda} \rho}{A_{\text{ОСВ}}}.$$

Яркость диффузного объекта

$$L_{e\lambda} = \frac{M_{e\lambda}}{\pi} = \frac{\Phi_{e\lambda} \rho}{\pi \cdot A_{\text{ОСВ}}}.$$

Так как угловые поля передающей и приемной систем равны, то площадь, видимая приемной системой и освещенная площадь равны:  $A_{\text{ПР}} = A_{\text{ОСВ}}$

Сила излучения от этой площадки равна

$$I_{e\lambda} = L_{e\lambda} \cdot A_{\text{ПР}} = L_{e\lambda} \cdot A_{\text{ОСВ}} = \frac{\Phi_{e\lambda} \rho \cdot A_{\text{ОСВ}}}{\pi \cdot A_{\text{ОСВ}}} = \frac{\Phi_{e\lambda} \rho}{\pi}.$$

Поток излучения, собираемый ОС на ПИ

$$\Phi_{e\lambda \text{ ПИ}} = I_{e\lambda} \cdot d\Omega = I_{e\lambda} \cdot \frac{\pi \cdot D_{3P}^2}{4l^2} = \frac{\Phi_{e\lambda} \rho}{\pi} \cdot \frac{\pi \cdot D_{3P}^2}{4l^2} = \Phi_{e\lambda} \cdot \rho \cdot \frac{D_{3P}^2}{4l^2}$$

При  $\Phi_{e\lambda} = 20 \text{ Вт}$ ;  $l = 50 \text{ м} = 50 \cdot 10^3 \text{ мм}$ ;  $\rho = 0,1$ ;  $D_{3P} = 20 \text{ мм}$

$$\Phi_{e\lambda \text{ ПИ}} = \Phi_{e\lambda} \cdot \rho \cdot \frac{D_{3P}^2}{4l^2} = \frac{20 \text{ Вт} \cdot 0,1 \cdot (20 \text{ мм})^2}{4 \cdot (50 \cdot 10^3 \text{ мм})^2} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}$$

# Практическое занятие №6 Применение законов теплового излучения

## 1. Закон Планка (универсальный закон)

Спектральная плотность энергетической светимости АЧТ

$$M_e^o(\lambda; T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1}, \text{Вт/м}^3,$$

$$C_1 = 2\pi h c^2 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_2 = hc/k = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К} = 1,4388 \text{ мкм} \cdot \text{К},$$

$$h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \text{ (Вт} \cdot \text{с}^2) \text{ - постоянная Планка,}$$

$$k = 1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \text{ - постоянная Больцмана,}$$

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с} \text{ - скорость света,}$$

$T$  - абсолютная температура АЧТ,  $K$  (Кельвин).

Для малых  $\lambda$  (УФ, V)

$$M_e^o(\lambda; T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(-C_2/\lambda T)]^{-1}, \text{Вт/м}^3.$$

### Частные законы:

## 2. Законы Вина

а)  $\lambda_{\text{макс}} = b/T, \text{ мкм}$

$$b = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К},$$

например, температура живого тела  $T=300\text{К}$ ,

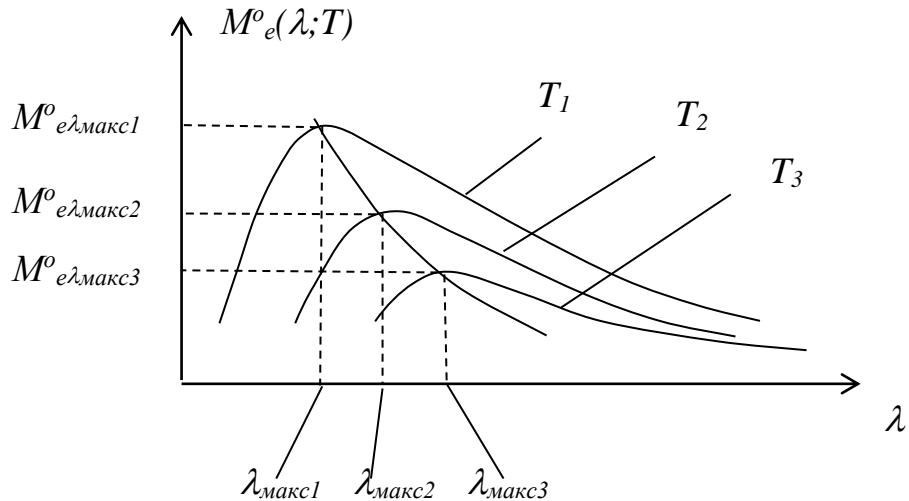
$$\lambda_{\text{макс}} = b/T = 2898/300 \approx 10 \text{ мкм}.$$

б)  $M_{e\lambda_{\text{макс}}}^o(T) = CT^5,$

$$C = 1,2864 \cdot 10^{-15} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-5}.$$

для живого тела

$$M_{e\lambda_{\text{макс}}}^o(T) = CT^5 = 1,2864 \times 10^{-15} 300^5 = 0,003 \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{мкм)},$$



При увеличении  $T$   $\lambda_{\text{макс}}$  смещается в сторону коротких длин волн, а  $M_e^o \lambda_{\text{макс}}(T) = \sigma T^5$  уменьшается.

### 3. Закон Стефана-Больцмана

$$M_e^o(T) = \int_0^{\infty} M_e^o(\lambda, T) d\lambda,$$

$$M_e^o(T) = \sigma T^4, \text{ Вт/см}^2,$$

Энергетический поток излучения человека составляет 500 Вт.

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{K}^4)$  - постоянная Стефана-Больцмана.

### 4. Относительная энергетическая светимость, приведенная к одной переменной

$$M_{\text{со}}^o(\lambda, T) = y(x),$$

где  $x = \lambda / \lambda_{\text{макс}}$  - нормированная длина волны;  $\lambda_{\text{макс}} = 2898/T$ ,

$$x = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{макс}}} = \frac{\lambda \cdot T}{2898};$$

$$y(x) = \frac{M_e^o(\lambda, T)}{M_e^o(\lambda_{\text{макс}}, T)} = \frac{C_1 \lambda^{-5} [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]^{-1}}{C_1 \lambda_{\text{макс}}^{-5} [\exp(\frac{C_2}{\lambda_{\text{макс}} T}) - 1]^{-1}} =$$

$$\begin{aligned}
& \frac{x^{-5} \cdot \lambda_{\text{МАКС}}^{-5} \cdot [\exp(\frac{C_2}{x\lambda_{\text{МАКС}}T}) - 1]^{-1}}{\lambda_{\text{МАКС}}^{-5} \cdot [\exp(\frac{C_2}{2898}) - 1]^{-1}} = \frac{x^{-5} [\exp(\frac{C_2}{x2898}) - 1]^{-1}}{[\exp(\frac{C_2}{2898}) - 1]^{-1}} = \\
& = 143,2x^{-5} [\exp(\frac{4,965}{x}) - 1]^{-1}.
\end{aligned}$$

В справочниках приводятся таблицы функции  $y(x)$ .

Для заданной температуры  $T$  вычисляется  $\lambda_{\text{МАКС}}$ ,  $x = \lambda/\lambda_{\text{МАКС}}$ , и из таблицы находятся  $y(x)$ .

Энергетическая светимость АЧТ

$$M_{\text{e}}^{\circ}(\lambda, T) = M_{\text{e}\lambda_{\text{МАКС}}}^{\circ} M_{\text{e}\text{o}}^{\circ}(\lambda, T) = M_{\text{e}\lambda_{\text{МАКС}}}^{\circ} y(x) = CT^5 y(x).$$

Задания:

2.1. Отопительная батарея имеет площадь  $0,8 \text{ м}^2$  и температуру  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Найти теплоотдачу батареи излучением, если температура окружающей среды равна  $300 \text{ K}$ .

Указание. Батарею и среду считать ЧТ.

2.2. Найти СПЭС ЧТ: 1) с температурой  $1450 \text{ K}$  на длинах волн  $1$  и  $3 \text{ мкм}$ ;

2) с температурой  $1000 \text{ K}$  на длинах волн  $1,5$  и  $2,5 \text{ мкм}$ .

2.3. Найти СПЭЯ серого тела, излучающего по закону Ламберта, с температурой  $3900 \text{ K}$  и коэффициентом теплового излучения  $0,8$  на длинах волн  $0,5$  и  $2 \text{ мкм}$ .

2.4. Найти коэффициенты пропускания светофильтров, выделяющих длины волн  $450$ ,  $550$  и  $750 \text{ нм}$ , которые, будучи установлены в фотоувеличитель с лампой накаливания, имеющей температуру  $3300 \text{ K}$ , создадут одинаковую освещённость фотобумаги.

Указание. Считать лампу ЧТ.

2.5. Построить изотермы ЧТ при температурах: 1)  $2900 \text{ K}$  в диапазоне от  $0,4$  до  $3 \text{ мкм}$  с шагом  $0,2 \text{ мкм}$ ; 2)  $5800 \text{ K}$  в диапазоне от  $0,2$  до  $1,6 \text{ мкм}$  с шагом  $0,2 \text{ мкм}$ ; 3)  $300 \text{ K}$  в диапазоне от  $5$  до  $20 \text{ мкм}$  с шагом  $1 \text{ мкм}$ .

2.6. Построить изотерму серого тела с коэффициентом теплового излучения  $0,8$  при температуре  $6000 \text{ K}$  в диапазоне длин волн от  $1$  до  $6 \text{ мкм}$  с шагом  $0,25 \text{ мкм}$ . Определить долю излучения в диапазоне от  $1$  до  $6 \text{ мкм}$ .

2.7. ЧТ имеет температуру  $2898 \text{ K}$  и площадь излучающей поверхности  $10 \text{ см}^2$ . Определить: 1) энергетическую светимость, энергетическую яркость, поток излучения, силу излучения; 2) светимость, яркость, силу света, световой поток; 3) поток излучения в интервале от  $0,38$  до  $0,78 \text{ мкм}$ .

2.8. ЧТ имеет температуру  $1273 \text{ K}$  и площадь излучающей поверхности  $1 \text{ см}^2$ . Определить: 1) долю излучения ЧТ, приходящуюся на интервал от  $1$  до  $5 \text{ мкм}$ ; 2) поток излучения, падающий на ПОИ с площадью ФЧЭ  $1 \text{ см}^2$  в заданном спектральном интервале, если ПОИ находится на расстоянии  $10 \text{ м}$  от ЧТ.

## Практическое занятие №7. Естественные источники излучения

### 1. Солнце, Земля, Луна, планеты, звезды

При наблюдении планеты из космоса ее излучение складывается из

1) Отраженное солнечное излучение

2) Собственное тепловое излучение.

Применительно к планетам энергетический коэффициент отражения солнечного излучения называется **альбедо** (отношение отраженного потока излучения к падающему потоку)

$$\rho_e = \frac{\Phi_{ep}}{\Phi_e}$$

Для Земли альбедо  $\rho_e = 0,1 \dots 0,8$ . Разброс обусловлен разными метеоусловиями на отдельных участках земной поверхности.

При удалении от Земли ее альбедо усредняется и при наблюдении из космоса  $\rho_e = 0,39$  (усреднен для всего диска Земли).

Коэффициент излучения Земли

$$\varepsilon = 1 - \rho = 1 - 0,39 = 0,61.$$

**Эквивалентная радиационная температура** отраженного Землей солнечного излучения  $T_r = 7725K$  с  $\lambda_{МАКС} = 0,37 \text{ мкм}$ ;  $M_e^0(\lambda; 7725K)$ .

Температура Солнца, выраженная через эквивалентную радиационную температуру

$$T = \frac{T_r}{\sqrt[4]{\varepsilon}} = \frac{7725}{\sqrt[4]{0,61}} = \frac{7725}{0,9} = 8500K.$$

**Собственное излучение Земли с  $T_3 = 280K$ .**

Радиационная температура Земли

$$T_r = T_3 \sqrt[4]{\varepsilon} = 280 \sqrt[4]{0,61} = 248K.$$

$$\lambda_{МАКС} = \frac{2898}{248} = 10 \text{ мкм}.$$

Планета	Альбедо	$T_r$
Земля	0,39	248
Луна	0,07	400-120
Марс	0,148	255
Венера	0,76	329
Меркурий	0,058	450
Юпитер	0,51	1,22
Сатурн	0,5	90
Уран	0,66	64
Нептун	0,62	51
Плутон	0,16	45

**Солнце** – АЧТ с эквивалентной цветовой температурой  $T_c = 6000K$ ; на поверхности Земли  $T_c = 5600K$ ; угловой размер -  $32'$ .



Энергетическая светимость Солнца -  $M_e = 6,2 \times 10^7 \frac{Вт}{м^2}$ .

Энергетическая освещенность на площадке, перпендикулярной оси визирования на Солнце  $E_e = 1360 \frac{Вт}{м^2}$  – среднее значение; диапазон апогей – перигей

$$E_e = (1316...1407) \frac{Вт}{м^2}.$$

Освещенность поверхности Земли  $E_e = (616...913) \frac{Вт}{м^2}$ .

Световая освещенность  $E_v = 1,37 \times 10^5 лк$ .

Яркость солнечного диска  $L_v = 2 \times 10^9 л \frac{кд}{м^2}$ .

Луна –  $T_r = 120...400K$ ;  $\lambda_{МАКС} = 24...7 мкм$ ; угловой размер 33'.

**Естественная ночная освещенность ЕНО** – создается отраженным от Луны солнечным излучением и светом звезд.

При полнолунии  $E_{ЕНО} = 0,38 лк$ .

Цветовая температура отраженного Луной солнечного излучения  $T_C = 5900K$ ;  $\lambda_{МАКС} = 0,5 мкм$ .

В полнолуние  $E_{МАКС} = 0,38 лк$ ;

На 12 ночь -  $E_{МАКС} = 2 \times 10^{-3} лк$  – звездный свет.

Затем в течении 1-2-х дней Луна не видна, а затем происходит нарастание в том же порядке, но в обратном направлении.

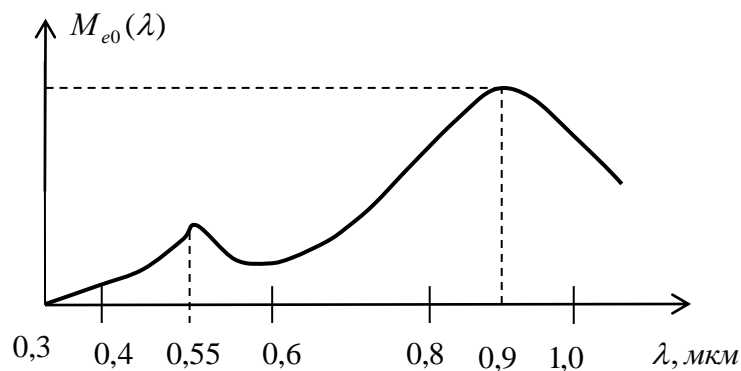
### Звездный свет.

Все звезды разделены на 10 классов в соответствии с их цветовыми температурами.

Класс звезды	Цвет звезды	Цветовая температура тыс.К
О	Голубые	25..35
В	Бело-голубые	15...25
А	Белые	11...15
Ф	Желто-белые	8...11
Г	Желтые	7,5
К	Желто-оранжевые	5...6
М	Оранжевые	4...4,5
Р	Оранжево-красные	4...3,5
Н	Красные	2...3,5
Р	Темно-красные	1,5...2,5

В безлунную ночь источником излучения, создающего ЕНО, является солнечный свет, отраженный от других планет, и звездный свет.

Спектральная плотность звездного излучения формируется излучениями от разных звезд с разными цветовыми температурами.



Максимальная светимость звездного излучения  $\lambda_{МАКС} = 0,9 мкм$ .

Визуальная светимость звезд оценивается параметром «звездная величина», принятым в астрономии.

Звездная величина принята для характеристики светимости звезд в видимом диапазоне.

### 1. Относительная звездная величина

$$m_0 = -2,5 \lg E + C, \text{ отн. ед.}$$

где  $E$  - освещенность в лк, которая создается звездой на поверхности Земли, перпендикулярной к падающему излучению;

$C$  - константа, которая соответствует звездной величине звезды, создающей освещенность, равную 1лк:

При  $E=1лк$

$$m_0 = C = -13,89 - \text{на границе атмосферы;}$$

$$m_0 = C = -14,2 - \text{на поверхности Земли.}$$

$$E = 10^{\frac{m-C}{2,5}}, \text{ лк} - \text{освещенность, соответствующая звездной величине } m.$$

Большой звездной величине соответствует менее яркая звезда.

Звездная величина Солнца:

Освещенность земной поверхности -  $E \cong 10^5 лк$ .

$$m_{0c} = -2,5 \lg E + C = -2,5 \cdot \lg 10^5 - 14,2 = -12,5 - 14,2 = -26,7.$$

Звезды с  $m_0 \leq 6$  — видны невооруженным глазом. Таких звезд 4860.

**Поток излучения звезды**

$$\Phi_e(T) = M_e(T) \cdot A_{зв} = \sigma T^4 \cdot 4\pi R_{зв}^2.$$

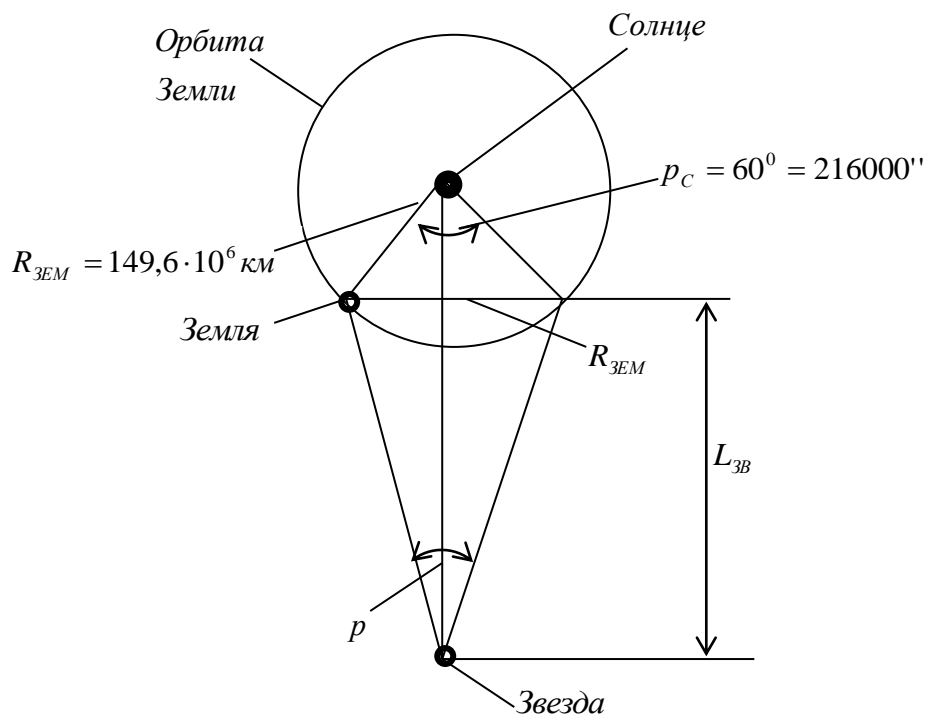
**Абсолютная звездная величина** учитывает удаленность звезды от Земли в виде углового параллакса (парсека).

Парсек равен отношению радиуса орбиты Земли вокруг Солнца  $R_{зем}$  к расстоянию до звезды  $L_{зв}$

$$p = \frac{R_{зем}}{L_{зв}}, \text{ угл.сек.}$$

**Абсолютная звездная величина**

$$m_a = m_0 + 5 + 5 \lg p, \text{ отн.ед.}$$



Относительная звездная величина Солнца

$$m_{0c} = -26,7;$$

**Абсолютная звездная величина Солнца**

$$\begin{aligned} m_{ac} &= m_{0c} + 5 + 5 \lg p = -26,7 + 5 + 5 \lg 216000 = \\ &= -26,7 + 5 + 5 \cdot 5,3 = +4,8 \end{aligned}$$

### Задания

1. Найти СПЭЯ Солнца (как ЧТ с температурой  $5800\text{ K}$ ) на длинах волн  $0,5$  и  $1\text{ мкм}$ .

2. Температура поверхности Солнца равна  $5800\text{ K}$ . Угловой размер Солнца при наблюдении с Земли составляет  $32'$ . Определить облучённость, создаваемую Солнцем на границе земной атмосферы.

3. Температура Луны равна  $400\text{ K}$ . Угловой размер Луны в полнолуние при наблюдении с Земли равен  $32'$ . Определить облучённость, создаваемую собственным излучением Луны на границе земной атмосферы.

4. Температура поверхности Солнца равна  $5800\text{ K}$ . Угловой размер Солнца при наблюдении с Луны составляет  $32'$ . Коэффициент отражения Луны равен  $0,07$ . Угловой размер Луны при наблюдении с Земли составляет  $32'$ . Определить облучённость Земли отражённым от Луны солнечным излучением.

Указание. Считать Солнце и Луну ламбертовскими источниками.

5. Найти световой поток, падающий на входной зрачок прибора площадью  $100\text{ см}^2$  от звезды нулевой звёздной величины.

6. Найти световой поток, падающий на входной зрачок прибора диаметром  $10\text{ см}$  от звезды пятой звёздной величины.

## Практическое занятие №8. Регистрация теплового излучения

Интегральный коэффициент пропускания атмосферы позволяет определить сигнальный поток излучения от объекта с температурой  $T$ , принимаемый ОС, без учета ПИ

$$\Phi_{OC}(T) = \tau_{eA} \cdot \Phi_{OB};$$

$$\Phi_{OC}(T) = \tau_{eA} \cdot \frac{M_{eOB}(T)}{\pi} \cdot A_{OB} \cdot \frac{\pi D_{OC}^2}{4L_D^2}.$$

Эффективный поток излучения – сигнальный поток излучения, используемый ПИ с  $S_0(\lambda)$

$$\Phi_{\text{эфф}}(\lambda; T) = \frac{\varepsilon \cdot M_{e\lambda\text{МАКС}}^0(T) \cdot A_{OB} \cdot D_{3P}^2}{4L_D^2} \cdot M_{e0}^0(\lambda; T) \cdot S_0(\lambda) \cdot \tau(\lambda);$$

$$\Phi_{\text{эфф}}(T) = \frac{\varepsilon \cdot M_{e\lambda\text{МАКС}}^0(T) \cdot A_{OB} \cdot D_{3P}^2}{4L_D^2} \cdot \int_0^{\infty} M_{e0}(\lambda, T) \cdot S_0(\lambda) \cdot \tau_A(\lambda) d\lambda =$$

$$= \frac{\varepsilon \cdot CT^5 \cdot A_{OB} \cdot D_{3P}^2}{4L_D^2} \cdot \int_0^{\infty} y(x) \cdot S_0(\lambda) \cdot \tau_A(\lambda) d\lambda \cong$$

$$\cong \frac{\varepsilon \cdot CT^5 \cdot A_{OB} \cdot D_{3P}^2}{4L_D^2} \cdot \sum_{n=1}^N y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) \cdot \tau_A(\lambda_n) \cdot \Delta\lambda.$$

### Задача 1

Определить с помощью методов Эльдера-Стронга и Эльзассера эффективный поток излучения, регистрируемый ОЭС с ПИ  $S_0^{\text{InSb}}(\lambda)$  от объекта с коэффициентом излучения  $\varepsilon = 0,8$ , площадью  $A_{\text{об}} = 1\text{м}^2$ , и температурой  $T = 500\text{К}$ , на горизонтальной трассе длиной  $L_D = 10\text{км}$  на высоте  $H = 2\text{км}$  при  $\chi = 60\%$ ,  $t_A = 20^\circ\text{C}$ ,  $D_{OC} = 30\text{мм}$ .

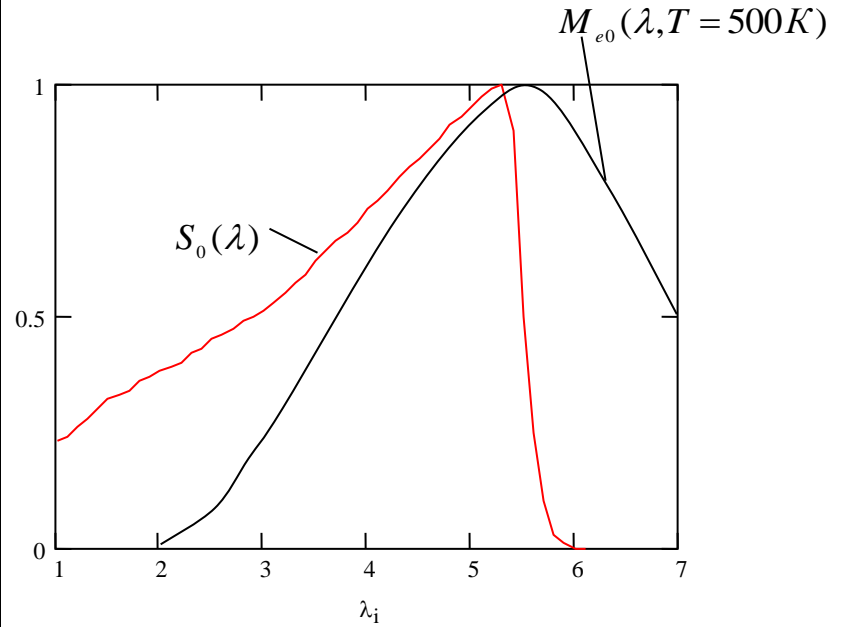
$$h_{\text{ЭКВ}} = 17,2 \frac{\text{с}^2}{\text{м}^3} \cdot 0,6 \cdot 10\text{км} \cdot \exp\left(-0,5154 \frac{1}{\text{км}} \cdot 2\text{км}\right) = 36,8\text{мм} \cong 37\text{мм}.$$

$$L_{\text{ЭКВ}}(H = 0) = L(H) \exp(-0,313H) = 10\text{км} \cdot \exp\left(-0,313 \frac{1}{\text{км}} \cdot 2\text{км}\right) = 5,35\text{км}.$$

Относительная спектральная характеристика приемника ФР InSb

$\lambda, \mu\text{m}$	$S_0(\lambda)$
1	0.23
1.1	0.24
1.2	0.26
1.3	0.28
1.4	0.3
1.5	0.32
1.6	0.33
1.7	0.34
1.8	0.36
1.9	0.37
2	0.38
2.1	0.39
2.2	0.4
2.3	0.42
2.4	0.43
2.5	0.45
2.6	0.46
2.7	0.47
2.8	0.49
2.9	0.5
3	0.51
3.1	0.53
3.2	0.55
3.3	0.57
3.4	0.59
3.5	0.62
3.6	0.64
3.7	0.66
3.8	0.68
3.9	0.7
4	0.73
4.1	0.75
4.2	0.77
4.3	0.8
4.4	0.82
4.5	0.84
4.6	0.86
4.7	0.88
4.8	0.91
4.9	0.93
5	0.95
5.1	0.97
5.2	0.99
5.3	1
5.4	0.9
5.5	0.5
5.6	0.25
5.7	0.1
5.8	0.03
5.9	0.01
6	0
6.1	0

(T=77K)



$$\lambda_{\text{МАКС}} = \frac{2898}{500} = 5,8 \mu\text{m}$$

$x_n$	$y(x_n)$ $10^{-2}$	$x_n$	$y(x_n)$ $10^{-2}$	$x_n$	$y(x_n)$ $10^{-2}$	$x_n$	$y(x_n)$ $10^{-2}$	$x_n$	$y(x_n)$ $10^{-2}$
0	0,0	0,57	38,98	0,96	99,59	1,35	82,30	1,98	41,47
0,1	0,0	0,58	41,52	0,97	99,78	1,36	81,55	2,0	40,54
0,2	0,0007	0,59	44,08	0,98	99,90	1,37	80,80	2,05	38,27
0,21	0,0019	0,6	46,63	0,99	99,97	1,38	80,04	2,1	36,14
0,22	0,0044	0,61	49,17	1,0	100,0	1,39	79,29	2,15	34,14
0,23	0,0094	0,62	51,70	1,01	99,98	1,40	78,53	2,2	32,28
0,24	0,0185	0,63	54,20	1,02	99,91	1,41	77,77	2,25	30,53
0,25	0,0345	0,64	56,67	1,03	99,79	1,42	77,01	2,3	28,87
0,26	0,061	0,65	59,08	1,04	99,63	1,43	76,26	2,35	27,31
0,27	0,102	0,66	61,45	1,05	99,44	1,44	75,51	2,4	25,85
0,28	0,162	0,67	63,78	1,06	99,20	1,45	74,76	2,45	24,47
0,29	0,254	0,68	66,06	1,07	98,92	1,46	74,01	2,5	23,18
0,3	0,380	0,69	68,25	1,08	98,60	1,47	73,27	2,55	21,96
0,31	0,55	0,7	70,42	1,09	98,26	1,48	72,52	2,6	20,83
0,32	0,774	0,71	72,48	1,10	97,88	1,49	71,78	2,65	19,76
0,33	1,062	0,72	74,48	1,11	97,47	1,50	71,04	2,7	18,75
0,34	1,425	0,73	76,42	1,12	97,04	1,52	69,56	2,75	17,79
0,35	1,87	0,74	78,28	1,13	96,59	1,54	68,10	2,8	16,88
0,36	2,41	0,75	80,05	1,14	96,12	1,56	66,66	2,85	16,05
0,37	3,051	0,76	81,74	1,15	95,63	1,58	65,22	2,9	15,28
0,38	3,801	0,77	83,36	1,16	95,11	1,60	63,80	3,0	13,83
0,39	4,667	0,78	84,91	1,17	94,56	1,62	62,41	3,1	12,57
0,4	5,648	0,79	86,36	1,18	93,99	1,64	61,05	3,2	11,41
0,41	6,76	0,8	87,74	1,19	93,39	1,66	59,72	3,3	10,38
0,42	8,0	0,81	89,04	1,20	92,77	1,68	58,40	3,4	9,47
0,43	9,36	0,82	90,26	1,21	92,14	1,70	57,11	3,6	7,92
0,44	10,84	0,83	91,40	1,22	91,50	1,72	55,84	3,8	6,67
0,45	12,45	0,84	92,46	1,23	90,85	1,74	54,59	4,0	5,65
0,46	14,18	0,85	93,45	1,24	90,19	1,76	53,37	5,0	2,68
0,47	16,02	0,86	94,35	1,25	89,51	1,78	52,16	6,0	1,421
0,48	17,97	0,87	95,19	1,26	88,82	1,80	50,99	7,0	0,82
0,49	20,03	0,88	95,95	1,27	88,12	1,82	49,84	8,0	0,505
0,5	22,17	0,89	96,63	1,28	87,41	1,84	48,70	9,0	0,327
0,51	24,39	0,9	97,24	1,29	86,70	1,86	47,60	10,0	0,223
0,52	26,70	0,91	97,78	1,30	85,98	1,88	46,52	15,0	0,0478
0,53	29,06	0,92	98,26	1,31	85,26	1,90	45,46	20,0	0,0158
0,54	31,48	0,93	98,68	1,32	84,53	1,92	44,43	30,0	0,0032
0,55	33,95	0,94	99,04	1,33	83,79	1,94	43,42	40,0	0,0010
0,56	36,45	0,95	99,34	1,34	83,05	1,96	42,43	50,0	0,0004

$$\Phi_{\text{эфф}}(T) \cong = \frac{\varepsilon \cdot CT^5 \cdot A_{\text{III}} \cdot D_{\text{зр}}^2 \cdot \Delta\lambda}{4L_{\text{д}}^2} \cdot [\tau_{\text{МП5}} \cdot \sum_{\lambda=2}^{\lambda=2,6} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) + \tau_{\text{МП6}} \cdot \sum_{\lambda=2,8}^{\lambda=4,2} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) + \tau_{\text{МП7}} \cdot \sum_{\lambda=4,4}^{\lambda=5,8} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n)]$$

$$\Delta\lambda = 0,2 \text{ мкм}$$

$\lambda_n, \text{ мкм}$	$x(\lambda_n)$	$y(x_n)$	$S_0(\lambda_n)$	$y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n)$
--------------------------	----------------	----------	------------------	-------------------------------

<b>5 зона</b>				
2,0	0,34	0,01	0,38	0,0038
2,2	0,38	0,038	0,40	0,0152
2,4	0,41	0,0676	0,43	0,029
2,6	0,45	0,1245	0,46	0,057
				$\sum_{\lambda=2}^{\lambda=2,6} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) = 0,105$
<b>6 зона</b>				
2,8	0,48	0,18	0,49	0,088
3,0	0,52	0,267	0,51	0,1362
3,2	0,55	0,34	0,55	0,187
3,4	0,586	0,44	0,59	0,26
3,6	0,62	0,517	0,64	0,331
3,8	0,655	0,6	0,68	0,408
4,0	0,69	0,68	0,73	0,496
4,2	0,72	0,74	0,77	0,57
				$\sum_{\lambda=2,8}^{\lambda=4,2} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) = 2,476$
<b>7 зона</b>				
4,4	0,76	0,82	0,82	0,6724
4,6	0,79	0,86	0,86	0,7396
4,8	0,83	0,91	0,91	0,8281
5,0	0,86	0,94	0,95	0,893
5,2	0,9	0,97	0,99	0,9603
5,4	0,93	0,99	0,9	0,891
5,6	0,96	0,99	0,25	0,2475
5,8	1	1	0,03	0,03
				$\sum_{\lambda=4,4}^{\lambda=5,8} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) = 5,2619$

**Метод Эльдера-Стронга**

№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta\lambda$ , мкм	0,72-0,92	0,92-1,1	1,1-1,4	1,4-1,9	1,9-2,7	2,7-4,3	4,3-5,9
$k_n$	0,151	0,165	0,171	0,131	0,131	0,125	0,125
$t_{on}$	1,063	1,063	0,963	0,81	0,725	0,723	0,512

**Излучение от объекта с температурой  $T = 500K$  попадает в 5, 6, 7 зоны**

**5 – зона**



$$t_{05} = 0,725;$$

$$k_5 = 0,131;$$

$$\tau_{МП5} = t_{05} - k_5 \lg h_{ЭKB} = 0,725 - 0,131 \cdot \lg 37 = 0,725 - 0,131 \cdot 1,5682 = 0,5195;$$

### 6 – зона

$$t_{06} = 0,723;$$

$$k_6 = 0,125;$$

$$\tau_{МП6} = t_{06} - k_6 \lg h_{ЭKB} = 0,723 - 0,125 \cdot \lg 37 = 0,723 - 0,125 \cdot 1,5682 = 0,527;$$

### 7 – зона

$$t_{07} = 0,512;$$

$$k_7 = 0,125;$$

$$\tau_{МП7} = t_{07} - k_7 \lg h_{ЭKB} = 0,512 - 0,125 \cdot \lg 37 = 0,512 - 0,125 \cdot 1,5682 = 0,316;$$

$$\Phi_{ЭФФ}(T) \cong \frac{\varepsilon \cdot CT^5 \cdot A_{III} \cdot D_{3P}^2 \cdot \Delta\lambda}{4L_D^2} \cdot [\tau_{МП5} \cdot \sum_{\lambda=2}^{\lambda=2,6} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) + \tau_{МП6} \cdot \sum_{\lambda=2,8}^{\lambda=4,2} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) + \tau_{МП7} \cdot \sum_{\lambda=4,4}^{\lambda=5,8} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n)].$$

$$K = \frac{\varepsilon \cdot CT^5 \cdot A_{III} \cdot D_{3P}^2 \cdot \Delta\lambda}{4L_D^2} = \frac{0,8 \cdot 1,2864 \cdot 10^{-15} \frac{Bm}{cm^2 \cdot мкм \cdot K^5} \cdot (500K)^5 \cdot 1m^2 \cdot (3cm)^2 \cdot 0,2мкм}{4 \cdot (10000m)^2} =$$

$$= 1447,2 \cdot 10^{-13} Bm \cong 1,45 \cdot 10^{-10} Bm$$

$$\begin{aligned}
\Phi_{\varnothing\varnothing\varnothing}(T = 500K) &= K \cdot [\tau_{MII5} \cdot \sum_{\lambda=2}^{\lambda=2,6} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) + \tau_{MII6} \cdot \sum_{\lambda=2,8}^{\lambda=4,2} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) + \\
&\quad \tau_{MII7} \cdot \sum_{\lambda=4,4}^{\lambda=5,8} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n)] \cdot \tau_{MP} = \\
&= 1,45 \cdot 10^{-10} Bm \cdot [0,5195 \cdot 0,105 + 0,527 \cdot 2,476 + 0,316 \cdot 5,2619] \cdot 0,998^{37} = \\
&= 1,45 \cdot 10^{-10} Bm \cdot 3,022 \cdot 0,9286 = 4,07 \cdot 10^{-10} Bm .
\end{aligned}$$

## Практическое занятие №9. Расчет ОСШ для ОЭС регистрации теплового излучения от малоразмерного объекта

Цель работы: научиться рассчитывать фотосигнал приемника излучения от малоразмерного объекта с заданными параметрами.

Полный фотосигнал (от всего спектра теплового излучения) при  $A_{III} \leq A'_{III}$ , ( $A'_{III} = A_{III} \cdot (\frac{l}{f'})^2$ ):

$$I_C(T) = \frac{\varepsilon \cdot M_{e\lambda_{МАКС}}(T) \cdot K_M \cdot S_{МАКС}(f_M) \cdot A_{III} \cdot D_{ЗР}^2}{4L_D^2} \cdot \int_0^{\infty} M_{e0}(\lambda, T) \cdot S_0(\lambda) \cdot \tau_A(\lambda) \cdot \tau_{OC}(\lambda) d\lambda;$$
$$I_{III}(f_{M.РАБ}) = \Phi_{ПОР}^{ПАСП}(\Delta f_{M.РАБ}) \cdot S_e^{ПАСП}(f_{M.РАБ}).$$

$$\Phi_{ПОР}^{ПАСП} = \frac{\sqrt{A_{III} \Delta f_{M.РАБ}}}{D_{*ПАСП}};$$

$$n = \frac{I_C}{I_{III}} = \frac{U_C}{U_{III}};$$

**Дано:**

Температура источника излучения (ИИ)  $T_{III}$ ;

площадь источника излучения (ИИ)  $A_{III} = 1\text{м}^2$ ;

дальность  $L_D$ ;

метод расчета относительной спектральной характеристики атмосферы  $\tau_A(\lambda)$ ;

$D_{ЗР}$  – диаметр зрачка оптической системы;

относительная спектральная характеристика оптической системы  $\tau_{OC}(\lambda)$ ;

частота модуляции излучения  $f_M$ ;

коэффициент модуляции излучения  $K_M$ ;

$A_{III} = 1\text{мм}^2$ ;

$\tau$  – постоянная времени ПИ

относительная спектральная характеристика чувствительности ПИ  $S_0(\lambda)$ ;

$Q$  – добротность резонансного контура усилителя;

$\Delta f = \frac{f_M}{Q}$  – полоса частот резонансного контура;

интегральные параметры ПИ для паспортного ИИ с  $T_{III}^{ПАСП}$  и паспортной частоты модуляции  $f_{M.ПАСП}$  :

**интегральная чувствительность ПИ**

- энергетическая  $S_e^{ПАСП}(f_{M.ПАСП})$ ;

- визуальная  $S_V^{ПАСП}(f_{M.ПАСП})$ ;

**удельная обнаружительная способность**

- энергетическая  $D_e^{ПАСП}(f_{М.ПАСП})$ ;
- визуальная  $D_V^{ПАСП}(f_{М.ПАСП})$ .

Требуется определить ОСШ для рабочего ИИ с  $T_{ИИ}^{РАБ}$  и рабочей частоты модуляции  $f_{М.РАБ}$ .

Расчет  $S_{e\lambda_{МАКС}}(f_{М.РАБ})$

1. Чувствительность задана в энергетических единицах.

1.1. Переход от чувствительности по паспортному ИИ на паспортной частоте модуляции к чувствительности по паспортному ИИ на рабочей частоте модуляции

$$S^{ПАСП}(f_{М.РАБ}) = S^{ПАСП}(f_{М.ПАСП}) \cdot \frac{\sqrt{1 + (2\pi f_{М.ПАСП} \cdot \tau)^2}}{\sqrt{1 + (2\pi f_{М.РАБ} \cdot \tau)^2}}.$$

1.2. Расчет  $S_{e\lambda_{МАКС}}(f_{М.РАБ})$

$$S_{e\lambda_{МАКС}} = \frac{S_{e\lambda_{МАКС}}^{ПАСП}}{K_{ИИ}^{ПАСП}};$$

$$K_{ИИ}^{ПАСП} = K_{ИИ}^A.$$

2. Чувствительность задана в световых единицах.

2.1. Пересчет визуальной чувствительности  $S_V^{ПАСП}(f_{М.РАБ})$  в энергетическую  $S_e^{ПАСП}(f_{М.РАБ})$ :

$$S_e^{ПАСП}(f_{М.РАБ}) = S_V^{ПАСП}(f_{М.РАБ}) \frac{A}{\text{лм}} \cdot 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \cdot K_{ГП}^{ПАСП}, \frac{A}{\text{Вт}}.$$

3. Расчет  $S_{e\lambda_{МАКС}}(f_{М.РАБ})$

$$S_{e\lambda_{МАКС}}(f_{М.РАБ}) = \frac{S_e^{ПАСП}(f_{М.РАБ})}{K_{ИИ}^{ПАСП}}$$

4. Пересчет порогового потока для паспортного источника излучения на рабочую частоту модуляции:

$$\Phi_{ПОР}^{ПАСП}(\Delta f_{М.РАБ}) = \frac{\sqrt{A_{ИИ} \Delta f_{М.РАБ}}}{D^{*ПАСП}};$$

$$\Delta f_{M.PAB} = \frac{f_{M.PAB}}{Q}.$$

5. Расчет тока (напряжения) шума

$$I_{ш}(\Delta f_{M.PAB}) = \Phi_{ПОР}^{ПАСП}(\Delta f_{M.PAB}) \cdot S_e^{ПАСП}(f_{M.PAB}).$$

## Практическое занятие №10. Эквивалентные температуры АЧТ

**Эквивалентные температуры АЧТ** – для сравнения энергетической светимости серых тел с энергетической светимостью АЧТ

### 1. Радиационная

**Радиационная температура** серого тела  $T_r$  – температура АЧТ, имеющего такую же энергетическую светимость, как и серое тело, т.е. определяется из равенства интегральных светимостей АЧТ и серого тела

Радиационная температура ( $T_r$ ), физический параметр, характеризующий суммарную (по всем длинам волн) энергетическую яркость  $E_3$  излучающего тела; равна такой температуре абсолютно чёрного тела, при которой его суммарная энергетическая яркость  $E_3^0 = E_3$ .

Законы теплового излучения (см. Стефана - Больцмана закон излучения и Кирхгофа закон излучения) позволяют выражение  $E_3^0 = E_3$  записать в виде:  $\sigma T_r^4 = \varepsilon_s \sigma T^4$ , где  $\varepsilon_s$  - излучательная способность (коэффициент черноты) тела,  $s$  - Стефана - Больцмана постоянная,  $T$  - абсолютная температура тела. Если известно значение  $\varepsilon_s$  и измерена температура  $T_r$  (радиационным пирометром), то можно вычислить температуру тела  $T = T_r \cdot \varepsilon_s^{-1/4}$ . Для теплового излучения всех тел, кроме абсолютно чёрного,  $\varepsilon_s < 1$ ; поэтому  $T_r < T$ , но при люминесценции  $T_r$  может быть больше  $T$ .

$M^o_e(T_r)$  – светимость АЧТ с эквивалентной температурой  $T_r$ ;

$\varepsilon(T)M^o_e(T)$  – светимость серого тела с температурой  $T$  и коэффициентом излучения  $\varepsilon(T)$ .

Приравниваем интегральные светимости АЧТ и серого тела

$$M^o_e(T_r) = M_e(T) = \varepsilon(T)M^o_e(T);$$

$$\sigma T_r^4 = \varepsilon(T)\sigma T^4;$$

$$T_r = T\sqrt[4]{\varepsilon(T)}; \quad T_r < T.$$

Задание: рассчитать эквивалентную радиационную температуру вольфрама W

$$T_w = 3000K,$$

$$\varepsilon_w(3000K) = 0,35,$$

$$T_{r(АЧТ)} = T \cdot \sqrt[4]{0,35} = 2307,5K.$$

### 2. Яркостная температура

**Яркостная температура** серого тела  $T_L$  – это температура АЧТ, имеющего на длине волны  $\lambda$  такую же энергетическую светимость, как и серое тело, т.е. определяется из равенства спектральных плотностей светимости

$$M^o_{e\lambda}(\lambda, T_L) = \varepsilon(\lambda)M^o_{e\lambda}(\lambda, T).$$

Для малых  $\lambda$  (УФ, V)

$$C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T_L}\right) = \varepsilon(\lambda, T) C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right);$$

$$\varepsilon(\lambda, T) \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_L}\right) = \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right);$$

$$\ln \varepsilon(\lambda, T) + \frac{C_2}{\lambda T_L} = \frac{C_2}{\lambda T};$$

$$\frac{C_2}{\lambda T_L} = \frac{C_2}{\lambda T} - \ln \varepsilon(\lambda, T);$$

$$T_L = \frac{C_2}{\lambda} \left[ \frac{C_2}{\lambda T} - \ln \varepsilon(\lambda, T) \right]^{-1}.$$

$$T_L < T,$$

$$C_1 = 2\pi h c^2 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ Вт м}^2,$$

$$C_2 = hc/k = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м К},$$

Задание: Рассчитать эквивалентную яркостную температуру вольфрама W  
 $T_W = 2400 \text{ К}$ ;  $\lambda = 1 \text{ мкм}$ ;  $\varepsilon(\lambda, T) = 0,3$ ;  $C_2 = 14388 \text{ мкм К}$ ,

$$T_{L(AЧТ)} = \frac{14388}{1} \left[ \frac{14388}{1 \cdot 2400} - \ln 0,3 \right]^{-1} = 1999,7 \text{ К}.$$

### 3. Цветовая температура серого тела

Цветовая температура серого тела  $T_C$  – это температура АЧТ, имеющего такой же цвет излучения, как и серое тело, т.е. приравниваются цветности излучений АЧТ и серого тела.

$T_C$  определяется в видимом диапазоне ОИ через отношение энергетических светимостей АЧТ и серого тела на двух длинах волн  $\lambda_1 = 0,665 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_2 = 0,457 \text{ мкм}$

$$\frac{M^{\circ e\lambda}(\lambda_1, T_C)}{M^{\circ e\lambda}(\lambda_2, T_C)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T) M^{\circ e\lambda}(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T) M^{\circ e\lambda}(\lambda_2, T)};$$

$$\frac{C_1 \lambda_1^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1 T_C}\right)}{C_1 \lambda_2^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2 T_C}\right)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T) C_1 \lambda_1^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1 T}\right)}{\varepsilon(\lambda_2, T) C_1 \lambda_2^{-5} \left[\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2 T}\right)\right]};$$

$$\frac{\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1 T_C}\right)}{\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2 T_C}\right)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T) \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1 T}\right)}{\varepsilon(\lambda_2, T) \left[\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2 T}\right)\right]};$$

$$\frac{\exp(\frac{C_2}{\lambda_2 T_C})}{\exp(\frac{C_2}{\lambda_1 T_C})} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T) \exp(\frac{C_2}{\lambda_2 T})}{\varepsilon(\lambda_2, T) [\exp(\frac{C_2}{\lambda_1 T})]};$$

$$\frac{C_2}{\lambda_2 T_C} - \frac{C_2}{\lambda_1 T_C} = \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} + (\frac{C_2}{\lambda_2 T} - \frac{C_2}{\lambda_1 T});$$

$$\frac{C_2}{T_C} (\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}) = \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} + \frac{C_2}{T} (\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1});$$

$$T_C = C_2 (\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}) [\ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} + \frac{C_2}{T} (\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})]^{-1}.$$

$$T_C > T.$$

$$T = \frac{T_C C_2 (\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})}{C_2 (\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}) - T_C \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}}.$$

Рассчитать эквивалентную цветовую температуру серого тела со следующими параметрами:

$$T_W = 2380 \text{ K.}$$

$$\varepsilon_w(0,457) = 0,45;$$

$$\varepsilon_w(0,665) = 0,4.$$

$$T_{C(AчT)} = 2450 \text{ K.}$$



## Практическое занятие №11. Расчет энергетического коэффициента пропускания атмосферы

1. Молекулярное поглощение

1) поглощение ОИ парами (молекулами) воды

Эквивалентная толщина слоя воды  $h_{\text{ЭКВ}}$  - толщина слоя воды, эквивалентная по массе водяному пару.

Для горизонтальной трассы длиной  $L$  на высоте  $H$

$$h_{\text{ЭКВ}} = \sigma_n(H=0) \cdot L \cdot \exp(-0,5154H).$$

Для наклонной трассы  $H_1 \neq 0$

$$h_{\text{ЭКВ}} = \sigma_n(H=0) \frac{\exp(-0,5154H_1) - \exp(-0,5154H_2)}{0,5154 \sin \gamma}.$$

$$H_2 = H_1 + L \cdot \sin \gamma.$$

При  $H_1 = 0$

$$h_{\text{ЭКВ}} = \sigma_g(H=0) \frac{1 - \exp(-0,5154H)}{0,5154 \sin \gamma}.$$

Для вертикальной трассы ( $\gamma = 90^\circ$ )  $H_1 \neq 0$

$$h_{\text{ЭКВ}} = \sigma_n(H=0) \frac{\exp(-0,5154H_1) - \exp(-0,5154H_2)}{0,5154};$$

$$H_2 = H_1 + L.$$

Для вертикальной трассы ( $\gamma = 90^\circ$ )  $H_1 = 0$

$$h_{\text{ЭКВ}} = \sigma_n(H=0) \frac{1 - \exp(-0,5154L)}{0,5154}.$$

Эквивалентная длина трассы  $L_{\text{ЭКВ}}$  - длина трассы, приведенная к уровню моря ( $H=0$ ).

2) поглощение ОИ молекулами углекислого газа

Для горизонтальной трассы

$$L_{\text{ЭКВ}}(H=0) = L(H) \exp(-0,313H).$$

Для наклонной трассы

$$L_{\text{экв}} = \frac{\exp(-0,313H_1) - \exp(-0,313H_2)}{0,313 \sin \gamma}.$$

## 2. Молекулярное рассеяние

Коэффициент пропускания вследствие молекулярного рассеяния

$$\tau_{MP} = 0,998^{h_{\text{экв}}}.$$

### ЗАДАЧИ

1. Рассчитать эквивалентную толщину слоя воды и эквивалентную длину горизонтальной трассы длиной  $L = 10 \text{ км}$  на высоте  $H = 2 \text{ км}$ , при относительной влажности атмосферы на уровне моря  $\chi = 60\%$  и температуре  $t = 20^\circ \text{ C}$ .

2. Рассчитать эквивалентную толщину слоя воды и эквивалентную длину наклонной под углом  $30^\circ$  трассы длиной  $L = 10 \text{ км}$  при высоте  $H_1 = 2 \text{ км}$ , при относительной влажности атмосферы на уровне моря  $\chi = 60\%$  и температуре  $t = 20^\circ \text{ C}$ .

3. Рассчитать эквивалентную толщину слоя воды и эквивалентную длину вертикальной трассы длиной  $L = 10 \text{ км}$  при высоте  $H_1 = 2$ , при относительной влажности атмосферы на уровне моря  $\chi = 60\%$  и температуре  $t = 20^\circ \text{ C}$ .

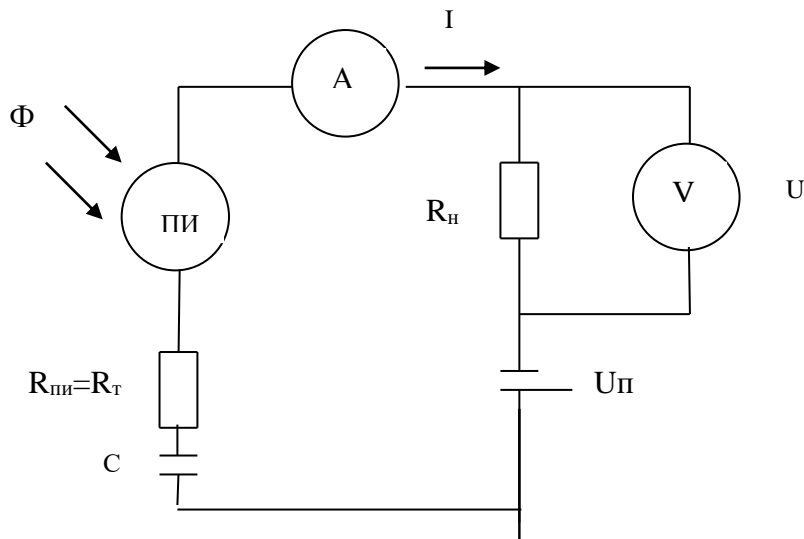
4. С помощью трех приближенных методов рассчитать энергетический коэффициент пропускания  $\tau_{eA}$  для излучения твердотельного лазера с длиной волны  $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$  на горизонтальной трассе длиной  $L = 10 \text{ км}$  на высоте  $H = 2 \text{ км}$  при относительной влажности  $\chi = 60\%$  и температуре  $t = 20^\circ \text{ C}$ .

5. Определить энергетическую яркость земной поверхности, нагретой до  $T = 290 \text{ K}$  и имеющей коэффициент излучения  $0,95$ .

6. Диффузный диск (шар) с коэффициентом излучения  $\varepsilon = 0,8$  диаметром  $l_M = 100 \text{ см}$  нагрет до  $t^\circ \text{ C} = 200^\circ$ . Определить поток ОИ, собираемый оптической системой со зрачком  $D_{зр} = 100 \text{ мм} = 10 \text{ см}$ , расположенной под углом  $\theta = 30^\circ$  к нормали диска на расстоянии  $l = 3 \text{ км} = 300000 \text{ см}$ .

## Практическое занятие №12. Расчет схемы фотоприемного устройства (ФПУ)

Обобщенная схема фотоприемного устройства (ФПУ) включает ПИ и элементы электрической цепи (сопротивления R, емкости C)



A - амперметр,  
 V - вольтметр,  
 $U_{\Pi}$  - напряжение питания,  
 $R_{\text{ПИ}}=R_{\text{T}}$  - темновое сопротивление ПИ,  
 $R_{\text{H}}$  - сопротивление нагрузки,  
 C - емкость ПИ.

**Реакция ПИ на оптическое излучение (фотосигнал) – фототок или фотонапряжение:**

**Фототок (аналогично световому потоку)**

$$I_C = S_I \Phi,$$

где коэффициент пропорциональности  $S_I$  - **токовая чувствительность ПИ.**

**Фотонапряжение**

$$U_C = I_C R_H = S_I \Phi R_H = S_U \Phi,$$

где коэффициент пропорциональности  $S_U = S_I R_H$  - **вольтовая чувствительность ПИ.**

**Общий ток в цепи ПИ**

$$I = I_C + I_T,$$

$I_T$  - темновой ток - ток в цепи ПИ при  $\Phi=0$

$$I_T = U_{\Pi} / (R_T + R_H),$$

зависит от  $U_{\Pi}$  (при  $U_{\Pi} = 0$   $I_T = 0$ ) и от сопротивления нагрузки и темнового сопротивления.

$U_{\Pi}=0...300\text{В}$  для полупроводниковых ПИ на основе внутреннего ФЭ и  $U_{\Pi}$ =неск. КВ для ПИ на основе внешнего ФЭ

## Общее напряжение на $R_H$

$$U = U_C + U_T,$$

$U_T$  - темновое напряжение - напряжение на  $R_H$  при  $\Phi=0$   
(при  $U_{II} = 0$   $U_T = 0$ )

$$U_T = U_{II} R_H / (R_T + R_H).$$

### Шумы ФПУ

#### Тепловой шум Джонсона

Дисперсия напряжения теплового шума (средний квадрат флуктуаций напряжения)

$$\bar{U}_{ТЕПЛ.}^2 = 4kTR\Delta f -$$

белый шум.

#### Дисперсия тока теплового шума

$$\bar{I}_{ТЕПЛ.}^2 = \frac{\bar{U}_{ТЕПЛ.}^2}{R^2} = 4kTR^{-1}\Delta f.$$

#### Генерационно-рекомбинационный шум

$$\bar{I}_{Г-Р}^2 = \frac{4eI(\tau_{ж}/\tau_{др})^2 \Delta f}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_{ж}^2} -$$

небелый шум (зависит от частоты модуляции).

$\tau_{ж}$  – время жизни носителей зарядов;

$\tau_{др}$  – время дрейфа носителей зарядов в полупроводнике.

**Шум мерцания (фликкер-эффект)** (для фотоэлектронных ПИ) обусловлен флуктуациями электронной эмиссии фотокатода

$$\bar{I}_M^2 = 2eI \left(1 + \frac{B \cdot I}{A_{фк} f}\right) -$$

небелый шум, на низких частотах на порядок больше дробового шума.

$B$  – коэффициент, зависящий от материала фотокатода;

$A_{фк}$  – площадь фотокатода.

#### Токовый шум (контактный)

Дисперсия токового шума

$$\bar{I}_{ТОК}^2 \propto (I^\alpha f^{-\beta})^2 -$$

не белый шум. При  $f < 100$  Гц токовый шум на порядок больше других шумов. При  $f > 1000$  Гц токовый шум практически равен 0.

Для полупроводниковых ПИ (на основе внутреннего фотоэффекта)  $1,25 \leq \alpha \leq 4$ . Для фотонных ПИ (на основе внешнего фотоэффекта)  $\alpha \cong 2$ ;  $\beta \cong 1$ .

### Дисперсия суммарного внутреннего шума ПИ

Дисперсия суммарного внутреннего шума ПИ: для фотоэлектрических (полупроводниковых) ПИ

$$\bar{I}^2_{\text{ВНУТР.Ш}} = \bar{I}^2_{\text{ДР}} + \bar{I}^2_{\text{ТЕПЛ}} + \bar{I}^2_{\text{ТОК}} + \bar{I}^2_{\text{Г-Р}}.$$

для фотоэлектронных ПИ

$$\bar{I}^2_{\text{ВНУТР.Ш.}} = \bar{I}^2_{\text{ДР}} + \bar{I}^2_{\text{ТЕПЛ}} + \bar{I}^2_{\text{ТОК}} + \bar{I}^2_{\text{М}}.$$

для тепловых ПИ

$$\bar{I}^2_{\text{ВНУТР.Ш.}} = \bar{I}^2_{\text{ДР}} + \bar{I}^2_{\text{ТЕПЛ}} + \bar{I}^2_{\text{ТОК}}.$$

### Дисперсия суммарного шума (внутренний шум и квантовый шум)

$$\bar{I}^2_{\text{Ш}} = \bar{I}^2_{\text{КВ.Ш.}} + \bar{I}^2_{\text{ВНУТР.Ш.}}$$

причем,  $\bar{I}^2_{\text{КВ.Ш.}} \ll \bar{I}^2_{\text{ВНУТР.Ш.}}$

#### Задания:

1. Для кремниевого фотодиода ФД-28КП: 1) пересчитать спектральную чувствительность в энергетические ФМВ; 2) рассчитать максимальную спектральную чувствительность фотодиода.4.25. Определить тепловой шум фоторезистора СФ4-1А при тем-перату-ре 300 К, если полоса частот равна 400 Гц.

2. Определить тепловой шум фоторезистора ФР1-4 при темпе-ратуре 300 К, если полоса частот равна 400 Гц.

3. Вычислить напряжение дробового шума ПОИ, если сила тока, протекающего в цепи, равна 1 мА, полоса частот - 100 Гц, а сопротив-ление составляет 0,5 МОм.

4. Определить максимальную вольтовую чувствительность и постоянную времени схемной релаксации для фотоэлемента Ф-5, у ко-торого межэлектродная ёмкость равна 50 пФ, если на фотоэлемент падает максимальный световой поток 0,4 лм.

5. Определить максимально допустимые сопротивления на-грузки по постоянному и переменному току и максимальную вольтовую чувствительность по переменному току к световому потоку и потоку излучения фотодиода ФД-4Г при потоке засветки от источника типа "А" с температурой 2856 К, равном 0,03 лм.

6. Определить максимальную интегральную вольтовую чувс-твительность к световому потоку для германиевого фотодиода ФД-4Г в фотогальваническом режиме при температуре 20 °С и постоянной засветке, создающей освещенность 6 клк.

## Практическое занятие №13. Пересчет параметров приемников излучения

### Основные формулы:

$$S_e = S_V \cdot \frac{\Phi_V}{\Phi_e} = S_V \cdot 683K_{ГЛ}$$

$$S_e^{РАБ} = S_e^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{РАБ}}{K_{ПИ}^{ПАСП}}$$

$$S_V^{РАБ} = S_e^{РАБ} \cdot \frac{1}{683K_{ГЛ}^{РАБ}} = S_e^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{РАБ}}{K_{ПИ}^{ПАСП} \cdot 683K_{ГЛ}^{РАБ}}$$

$$S_{\lambda_{МАКС}} = \frac{S_e^{ПАСП}}{K_{ПИ}^{ПАСП}} = \frac{S_e^{РАБ}}{K_{ПИ}^{РАБ}}, \text{ A/Вт};$$

$$S(f_{мРАБ}) = S(f_{мПАСП}) \cdot \frac{\sqrt{1 + (2\pi f_{мПАСП} \tau)^2}}{\sqrt{1 + (2\pi f_{мРАБ} \tau)^2}}$$

$$\Phi_{V_{ПОР}} = \Phi_{e_{ПОР}} \frac{S_e}{S_V} = \Phi_{e_{ПОР}} \cdot 683K_{ГЛ}$$

$$\Phi_{e_{ПОР}}^{РАБ} = \Phi_{e_{ПОР}}^{ПАСП} \frac{S_e^{ПАСП}}{S_e^{РАБ}} = \Phi_{e_{ПОР}}^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{ПАСП}}{K_{ПИ}^{РАБ}};$$

$$\Phi_{V_{ПОР}}^{РАБ} = \Phi_{e_{ПОР}}^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{ПАСП}}{K_{ПИ}^{РАБ}} \cdot 683K_{ГЛ}^{РАБ}$$

$$D_v^{РАБ} = D_e^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{РАБ}}{K_{ПИ}^{ПАСП} \cdot 683K_{ГЛ}}$$

Задача 1. Определить коэффициент использования излучения ртутной лампы глазом.

$$K_{ГЛ} = \frac{\int \Phi_{e0}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda}$$

$\lambda_n$ мкм	$\Phi_{e0}(\lambda_n)$	$\bar{y}(\lambda_n)$	$\Phi_{e0}(\lambda_n) \bar{y}(\lambda_n)$
0,18	0,3	0	0
0,25	0,3	0	0
0,404	0,3	0,0006	0,0002
0,436	1,0	0,0168	0,0168
0,546	0,74	0,9803	0,7254
0,58	0,47	0,87	0,4089

	$\sum \Phi_{e0}(\lambda_n)=3,11$		$\sum \Phi_{e0}(\lambda_n) \cdot \bar{y}(\lambda_n)$ = 1,1513
--	----------------------------------	--	---

$$K_{ГЛ} = \frac{\int \Phi_{e0}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda} = \frac{\sum_{n=1}^{N=4} \Phi_{e0}(\lambda_n) \cdot V(\lambda_n)}{\sum_{n=1}^6 \Phi_{e0}(\lambda_n)} = \frac{1,1513}{3,11} = 0,37.$$

Задача 2. Пересчитать паспортную энергетическую чувствительность для источника с  $T=2856K$ , равную  $S_e^{ПАСП} = 10^3 \frac{B}{Bm}$  в энергетическую чувствительность и визуальную чувствительность для источника с температурой  $T=2700K$ .

$$S_e^{РАБ} = S_e^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{РАБ}}{K_{ПИ}^{ПАСП}}.$$

$$S_V^{РАБ} = S_e^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{РАБ}}{K_{ПИ}^{ПАСП} \cdot 683 K_{ГЛ}^{РАБ}}.$$

$$K_{Si}^{2856} = 0,1747$$

$$K_{ГЛ}^{2856} = 0,0241$$

Рассчитаем коэффициенты использования теплового излучения глазом и кремниевым ПИ ( $S_1$ ) от ИИ с рабочей температурой  $T=2700K$ .

$$K_{ГЛ} = \frac{\int_0^{\infty} M_{e0}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{e0}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{M_{e\lambda_{МАКС}}}{M_{e\lambda_{МАКС}}} = \frac{CT^5}{\sigma T^4} \cdot \int_0^{\infty} M_{e0}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda =$$

$$= \frac{CT}{\sigma} \int_0^{\infty} M_{e0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda;$$

$$K_{ГЛ} = \frac{CT}{\sigma} \int_0^{\infty} M_{e0}(\lambda) V(\lambda) d\lambda = \frac{CT}{\sigma} \int_0^{\infty} y(x) \cdot V(\lambda) d\lambda \cong \frac{CT \cdot \Delta\lambda}{\sigma} \sum_{n=1}^N y(x_n) \cdot V(\lambda_n);$$

$$K_{ПИ} = \frac{CT}{\sigma} \int_0^{\infty} M_{e0}(\lambda) S_0(\lambda) d\lambda = \frac{CT}{\sigma} \int_0^{\infty} y(x) \cdot S_0(\lambda) d\lambda \cong \frac{CT \cdot \Delta\lambda}{\sigma} \sum_{n=1}^N y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n);$$

$$M_{e0}^p(\lambda, T) = y(x),$$

где  $x = \lambda / \lambda_{МАКС}$ ;  $\lambda_{МАКС} = 2898/T$ ,

$$C = 1,2864 \cdot 10^{-11} \frac{Bm}{cm^3 \cdot K^5} = 1,2864 \cdot 10^{-15} \frac{Bm}{cm^2 \cdot \mu km \cdot K^5};$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \frac{Bm}{cm^2 \cdot K^4}.$$

### Расчет $K_{ГЛ}^{РАБ}$

$\lambda_n, \mu km$	$x(\lambda_n)$	$y(x_n)$	$V(\lambda_n)$	$y(x_n) \cdot V(\lambda_n)$
0,4	0,3728	0,0305	0,0004	0
0,42	0,3914	0,0486	0,0040	0,0002
0,44	0,4100	0,0676	0,023	0,0015
0,46	0,4287	0,0936	0,06	0,0056
0,48	0,45	0,1246	0,139	0,0173
0,5	0,47	0,1603	0,323	0,0518
0,52	0,486	0,1797	0,71	0,1276
0,54	0,505	0,2217	0,954	0,2115
0,56	0,52	0,267	0,995	0,2656
0,58	0,542	0,3148	0,87	0,2739
0,60	0,56	0,3645	0,631	0,2300
0,62	0,579	0,4152	0,381	0,1582
0,64	0,5964	0,4663	0,175	0,0816
0,66	0,6151	0,4918	0,061	0,0300
0,68	0,6337	0,5420	0,017	0,0092
0,7	0,6524	0,5909	0,0041	0,0024
0,72	0,671	0,6379	0,001	0,0006
0,74	0,6896	0,6827	0,0002	0,0001
0,76	0,7083	0,7042	0,0001	0
0,78	0,7269	0,7643	0	0
0,8	0,7456	0,7828	0	0
				$\sum_{n=1}^{N=21} y(x_n) \cdot V(\lambda_n) = 1,4671$

$$K_{ГЛ}^{РАБ} \cong \frac{CT \cdot \Delta\lambda}{\sigma} \cdot \sum_{n=1}^N y(x_n) \cdot V(\lambda_n) =$$

$$= \frac{1,2864 \cdot 10^{-11} \frac{Bm}{cm^3 \cdot K^5} \cdot 2700K \cdot 0,02 \cdot 10^{-4} cm}{5,67 \cdot 10^{-12} \frac{Bm}{cm^2 \cdot K^4}} \cdot 1,4671 = 0,018.$$

### Расчет $K_{Si}^{РАБ}$

$\lambda_n, \mu km$	$x(\lambda_n)$	$y(x_n)$	$S_0(\lambda_n)$	$y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n)$
0,42	0,3914	0,0486	0,02	0,0010
0,44	0,4100	0,0676	0,04	0,0027
0,46	0,4287	0,0936	0,06	0,0056
0,48	0,45	0,1246	0,08	0,01



0,5	0,47	0,1603	0,1	0,016
0,52	0,486	0,1797	0,13	0,0234
0,54	0,505	0,2217	0,16	0,0355
0,56	0,52	0,267	0,19	0,0507
0,58	0,542	0,3148	0,23	0,0724
0,60	0,56	0,3645	0,28	0,1021
0,62	0,579	0,4152	0,32	0,1329
0,64	0,5964	0,4663	0,37	0,1725
0,66	0,6151	0,4918	0,42	0,2065
0,68	0,6337	0,5420	0,49	0,2656
0,7	0,6524	0,5909	0,56	0,3309
0,72	0,671	0,6379	0,63	0,4019
0,74	0,6896	0,6827	0,72	0,4915
0,76	0,7083	0,7042	0,79	0,5563
0,78	0,7269	0,7643	0,85	0,6500
0,8	0,7456	0,7828	0,9	0,7045
0,82	0,7642	0,8177	0,94	0,7686
0,84	0,7828	0,8491	0,97	0,8236
0,86	0,8015	0,8774	0,99	0,8686
0,88	0,8201	0,9026	1,0	0,9026
0,9	0,8387	0,9246	0,98	0,9061
0,92	0,8574	0,9435	0,91	0,8586
0,94	0,8765	0,9595	0,83	0,7964
0,96	0,8947	0,9664	0,7	0,6765
0,98	0,9133	0,978	0,55	0,5379
1,0	0,9320	0,987	0,35	0,3455
1,02	0,9506	0,9936	0,25	0,2484
1,04	0,9692	0,9977	0,18	0,1796
1,06	0,9879	0,9998	0,13	0,13
1,08	1,0065	0,9998	0,1	0,1
1,1	1,0252	0,9991	0,08	0,08
1,12	1,0438	0,9963	0,05	0,05
1,14	1,0624	0,992	0,03	0,03
				$\sum_{n=1}^{N=21} y(x_n) \cdot V(\lambda_n) = 12,5345$

$$K_{III}^{PAB} \cong \frac{CT \cdot \Delta\lambda}{\sigma} \cdot \sum_{n=1}^{N=37} y(x_n) \cdot S_0(\lambda_n) =$$

$$= \frac{1,2864 \cdot 10^{-11} \frac{Bm}{cm^3 \cdot K^5} \cdot 2700K \cdot 0,02 \cdot 10^{-4} cm}{5,67 \cdot 10^{-12} \frac{Bm}{cm^2 \cdot K^4}} \cdot 12,5345 = 0,153.$$

$$S_e^{РАБ} = S_e^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{РАБ}}{K_{ПИ}^{ПАСП}} = 10^3 \frac{В}{Вт} \cdot \frac{0,153}{0,1747} = 875,8 \frac{В}{Вт}.$$

$$S_V^{РАБ} = S_e^{ПАСП} \cdot \frac{K_{ПИ}^{РАБ}}{K_{ПИ}^{ПАСП} 683 K_{ГЛ}^{РАБ}} = 10^3 \frac{В}{Вт} \frac{0,153}{0,1747 \cdot 683 \frac{лм}{Вт} \cdot 0,018} = 0,07 \frac{В}{лм}.$$

### Задача 3

**Дано:**

оптический сигнал – прямоугольный импульс;

длительность импульса оптического сигнала  $\Delta t = 20нс = 10^{-7} с$ ;

обнаружительная способность ПИ для паспортного источника излучения

$$D^{*ПАСП}(f_{М.ПАСП}) = 10^{13} см \cdot Гц^{\frac{1}{2}} \cdot Вт^{-1};$$

площадь ФЧЭ  $A_э = 0,1мм^2 = 10^{-3} см^2$ ;

**Определить** пороговый поток ПИ для данного оптического сигнала.

$$D^{*ПАСП} = \frac{\sqrt{A_э \cdot \Delta f^{ПАСП}}}{\Phi_{ПОР}^{ПАСП}(\Delta f^{ПАСП})};$$

$$\Delta f^{РАБ} = \frac{1}{\Delta t} = 10^7 Гц;$$

$$\Phi_{ПОР}^{ПАСП}(\Delta f^{РАБ}) = \frac{\sqrt{A_э \cdot \Delta f^{РАБ}}}{D^{*ПАСП}} = \frac{\sqrt{10^{-3} см^2 \cdot 10^7 Гц}}{10^{13} см \cdot Гц^{\frac{1}{2}} \cdot Вт^{-1}} = \frac{10^2}{10^{13}} = 10^{-11} Вт.$$

### Задача 4

**Дано:**

оптический сигнал – гармонический сигнал;

паспортная частота модуляции ПИ  $f_M^{ПАСП} = 400 Гц$ ;

интегральная чувствительность для паспортной частоты модуляции

$$S(f_M^{ПАСП} = 400 Гц) = 10^5 \frac{В}{Вт};$$

обнаружительная способность ПИ  $D^* = 10^{13} см \cdot Гц^{\frac{1}{2}} \cdot Вт^{-1}$ ;

рабочая частота модуляции  $f_M^{РАБ} = 10^5 Гц$ ;

площадь ФЧЭ  $A_э = 0,1мм^2 = 10^{-3} см^2$ ;

постоянная времени ПИ  $\tau = 10^{-3} с$ ;

добротность резонансного контура усилителя  $Q = 10$ .

### Определить:

- пороговый поток ПИ для данного оптического сигнала  $\Phi_{\text{ПОР}}(\Delta f_M^{\text{РАБ}})$ ;
- СКЗ напряжения шума  $U_{\text{Ш}}(\Delta f_M^{\text{РАБ}})$ .

$$\Delta f^{\text{РАБ}} = \frac{f_M^{\text{РАБ}}}{Q} = \frac{10^5}{10} = 10^4 \text{ Гц};$$

$$\Phi_{\text{ПОР}}(\Delta f_M^{\text{РАБ}}) = \frac{\sqrt{A_{\text{Э}} \cdot \Delta f^{\text{РАБ}}}}{D^*} = \frac{\sqrt{10^{-3} \text{ см}^2 \cdot 10^4 \text{ Гц}}}{10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Вт}^{-1}} = 3 \cdot 10^{-13} \text{ Вт};$$

$$\begin{aligned} U_{\text{Ш}}(\Delta f^{\text{РАБ}}) &= \frac{\Phi_{\text{ПОР}}(\Delta f^{\text{РАБ}})}{S(f_M^{\text{РАБ}})} = \frac{\Phi_{\text{ПОР}}(\Delta f^{\text{РАБ}})}{S_{\text{ПАСП}}(f_M^{\text{ПАСП}}) \frac{\sqrt{1 + (2\pi f_M^{\text{ПАСП}} \cdot \tau)^2}}{\sqrt{1 + (2\pi f_M^{\text{РАБ}} \cdot \tau)^2}}} = \\ &= \frac{3 \cdot 10^{13} \text{ Вт}}{10^5 \frac{\text{В}}{\text{Вт}} \frac{\sqrt{1 + (2\pi \cdot 400 \text{ Гц} \cdot 10^{-3} \text{ с})^2}}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot 10^5 \text{ Гц} \cdot 10^{-3} \text{ с})^2}}} = \end{aligned}$$

### Задача 5

#### Дано:

световая чувствительность (для паспортной частоты модуляции  $f_M^{\text{ПАСП}} = 400 \text{ Гц}$ )

$$) S_V(f_M^{\text{ПАСП}}) = 10 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}.$$

$$K_{\text{ГЛ}} = 0,0241;$$

$$K_{\text{Si}} = 0,1747.$$

постоянная времени ПИ  $\tau = 10^{-3} \text{ с}$ ;

Определить **максимальную энергетическую чувствительность** для рабочей частоты модуляции  $f_M^{\text{РАБ}} = 10^5 \text{ Гц}$ .

$$S_e = S_V \cdot 683 K_{\text{ГЛ}};$$

$$S_{\lambda_{\text{МАКС}}}(f_M^{\text{ПАСП}}) = \frac{S_e(f_M^{\text{ПАСП}})}{K_{\text{ПИ}}} = \frac{S_v \cdot 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \cdot K_{\text{ГЛ}}}{K_{\text{ПИ}}} =$$

$$= 10 \frac{\text{мА}}{\text{лм}} \cdot 683 \cdot \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \cdot \frac{0,0241}{0,1747} = 942 \frac{\text{мА}}{\text{Вт}}$$

$$S(f_{\text{мРАБ}}) = S(f_{\text{мПАСП}}) \cdot \frac{\sqrt{1 + (2\pi f_{\text{мПАСП}} \tau)^2}}{\sqrt{1 + (2\pi f_{\text{мРАБ}} \tau)^2}}$$

### Задача 6

Световая пороговая освещенность кремниевой видеокамеры для паспортного источника А (2856К)  $E_{\text{ВППО}}^{\text{ПАСП}} = 0,01 \text{ лк}$ .

Определить световую пороговую освещенность  $E_{\text{ВППО}}^{\lambda}$  для монохроматического излучения с длиной волны 0,6328 мкм.

Для паспортного источника перейдем от световой пороговой освещенности к паспортной энергетической пороговой освещенности

$$E_{\text{еПОР}}^{\text{ПАСП}} = E_{\text{ВППО}}^{\text{ПАСП}} \cdot \frac{1}{683 K_{\text{ГЛ}}^{\text{ПАСП}}}$$

**Перейдем от паспортной энергетической пороговой освещенности к рабочей энергетической пороговой освещенности**

$$E_{\text{еПОР}}^{\text{РАБ}} = E_{\text{еПОР}}^{\text{ПАСП}} \cdot \frac{K_{\text{ПИ}}^{\text{ПАСП}}}{K_{\text{ПИ}}^{\text{РАБ}}} = \Phi_{\text{ВППО}}^{\text{ПАСП}} \cdot \frac{K_{\text{ПИ}}^{\text{ПАСП}}}{K_{\text{ПИ}}^{\text{РАБ}} \cdot 683 K_{\text{ГЛ}}^{\text{ПАСП}}}$$

Перейдем от рабочей энергетической пороговой освещенности к рабочей световой пороговой освещенности

$$E_{\text{V ПОР}}^{\text{РАБ}} = E_{\text{еПОР}}^{\text{РАБ}} \cdot 683 K_{\text{ГЛ}}^{\text{РАБ}} = E_{\text{ВППО}}^{\text{ПАСП}} \cdot \frac{K_{\text{ПИ}}^{\text{ПАСП}} \cdot 683 K_{\text{ГЛ}}^{\text{РАБ}}}{K_{\text{ПИ}}^{\text{РАБ}} \cdot 683 K_{\text{ГЛ}}^{\text{ПАСП}}} =$$

$$= E_{\text{ВППО}}^{\text{ПАСП}} \cdot \frac{K_{\text{ПИ}}^{\text{ПАСП}} K_{\text{ГЛ}}^{\text{РАБ}}}{K_{\text{ПИ}}^{\text{РАБ}} K_{\text{ГЛ}}^{\text{ПАСП}}} = 0,01 \text{ лк} \cdot \frac{0,1747 \cdot 0,25}{0,0241 \cdot 0,35} = 0,05 \text{ лк}$$

$$K_{III}^{PAB} = S_0(\lambda) = 0,35;$$

$$K_{VII}^{PAB} = V_0(\lambda) = 0,25;$$

0,38лк