

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики

---

Факультет оптико-информационных систем и технологий

**Г. Г. Ишанин, Н. К. Мальцева, В. Л. Мусяков**

**ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

ПОСОБИЕ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ



Санкт-Петербург  
2006

УДК 621.383

Ишанин Г. Г., Мальцева Н.К., Мусяков В. Л. Источники и приёмники излучения. Пособие по решению задач. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006, 85 с.

Пособие предназначено для студентов СПб ГУ ИТМО, изучающих дисциплину «Источники и приёмники излучения».

Пособие состоит из четырех разделов, каждый из которых содержит краткие теоретические сведения, примеры решения и оформления типовых задач, а также контрольные задачи, которые предлагаются решить студентам для проверки качества усвоения прочитанного материала. Все разделы пособия соответствуют курсу лекций. В конце пособия приведен список литературы, которой можно пользоваться с целью более детального изучения предмета.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки Оптотехника и оптическим специальностям.

Рецензенты: Прокопенко В.Т., д.т.н., профессор СПб ГУИТМО

Сидельников С.С., доцент ПЭИПК

Список литературы - 18 наименований.

© Санкт-Петербургский государственный  
университет информационных технологий,

механики и оптики

2006

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	5
СОКРАЩЕНИЯ .....	5
ТЕРМИНЫ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	6
1. ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ .....	11
1.1 Теоретические положения .....	11
1.2 Примеры решения задач .....	15
1.3 ЗАДАЧИ .....	24
2. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ .....	28
2.1 Теоретические положения .....	28
2.2. Примеры решения задач .....	31
2.3. ЗАДАЧИ .....	44
3. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ. ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ .....	48
3.1 Теоретические положения .....	48
3.2 Примеры решения задач .....	49
3.3 ЗАДАЧИ .....	54
4. ПРИЁМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	56
4.1. Теоретические положения .....	56
4.2. Примеры решения задач .....	65
4.3 ЗАДАЧИ .....	73
ЛИТЕРАТУРА .....	75
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	78
Таблица 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ .....	77
Таблица 2. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ СВЕТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДНЕВНОГО ЗРЕНИЯ .....	78

Таблица 3. КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧТ ГЛАЗОМ .....	78
Таблица 4. ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЛАНКА $y = f(x)$ .....	79
Таблица 5. ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ $z(x)$ .....	80
Таблица 6. КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫ ПО МЕТОДУ ЭЛЬДЕРА-СТРОНГА.....	81
Таблица 7. ПРЕДЕЛЬНАЯ АБСОЛЮТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ВОДЯНОГО ПАРА.....	81
Таблица 8. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОИ.....	82
Таблица 9. СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ПИД АЛ107Б.....	82
Таблица 10. КОЭФФИЦИЕНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧТ РАЗЛИЧНЫМИ ПОИ .....	83
Таблица 11. ПАРАМЕТРЫ ПОИ.....	85

## **ВВЕДЕНИЕ**

Курс “Источники и приемники излучения” рассчитан на один семестр, в котором студентам 3 курса факультета оптико-информационных систем и технологий предлагается прослушать курс лекций, выполнить ряд лабораторных работ и несколько самостоятельных заданий.

Этот курс призван служить некоторым переходным звеном от общеинститутских курсов физики и математики к инженерным расчетам и реальной работе в научно-исследовательской лаборатории.

Цель данного пособия заключается в том, чтобы показать на конкретных примерах основные методы расчета фотометрии радиометрии, применяемые при решении задач, связанных с выбором приемника оптического излучения в процессе проектировании оптико-электронных приборов. Опыт приема лабораторных работ по курсу показал, что чтения лекций и проведения лабораторных занятий, как правило, недостаточно для глубокого понимания данного предмета. Решение задач дают возможность студентам почувствовать масштаб величин, научиться делать конкретные численные оценки на основе имеющихся данных, что совершенно необходимо при проектировании оптико-электронных приборов и экспериментальной работе в лаборатории.

Основные разделы пособия соответствуют курсу лекций. Во всех главах пособия добавлен раздел с примерами расчета задач по тематике разделов.

Каждый из разделов соответствует циклу лекций. Раздел завершается контрольными задачами, которые предлагается решить студентам для проверки качества усвоения прочитанного материала. В конце пособия приведен список литературы, которой можно пользоваться для более детального изучения предмета.

## **СОКРАЩЕНИЯ**

ПИД - полупроводниковый излучающий диод

ПОИ - приемник оптического излучения  
 СКЗ - среднее квадратическое значение  
 СППИ - спектральная плотность потока излучения  
 СПЭС - спектральная плотность энергетической светимости  
 СПЭЯ - спектральная плотность энергетической яркости  
 ФМВ - фотометрическая величина  
 ФПЗС - фоточувствительный прибор с зарядовой связью  
 ФУ - фотоумножитель  
 ФЧЭ - фоточувствительный элемент  
 ФЭПП - фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения  
 ЧТ - черное тело  
 ЭОП - электронно-оптический преобразователь

## ТЕРМИНЫ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Абсолютная спектральная чувствительность ПОИ -  $S_{\lambda,abs}$   
 Видимое (угловое) увеличение оптической системы -  $\Gamma$   
 Водность -  $\omega$   
 Вольтовая интегральная чувствительность ПОИ -  $S_{U,int}$   
 Время накопления -  $t_n$   
 Дисперсия генерационного шума ФПЗС -  $\sigma_z$   
 Дисперсия количества шумовых зарядов на выходе ФПЗС -  $\sigma_{ш}$   
 Дисперсия шума выходного усилителя ФПЗС -  $\sigma_y$   
 Дисперсия шума переноса -  $\sigma_n$   
 Дисперсия шума поверхностных состояний -  $\sigma_{ss}$   
 Дисперсия шума темнового тока -  $\sigma_m$   
 Дисперсия шума ФПЗС, обусловленного внутренними факторами, -  $\sigma_{ш,вн}$   
 Дисперсия шума ФПЗС, обусловленного зарядовым пакетом, генерированным потоком излучения, -  $\sigma_{ш,c}$   
 Длинноволновая граница спектральной чувствительности ПОИ -  $\lambda_{cp}$

Звездная величина -  $m$

Интегральная чувствительность ПОИ к потоку излучения -  $S_{\text{инт.}\Phi_e}$

Интегральная чувствительность ПОИ к световому потоку -  $S_{\text{инт.}\Phi_v}$

Квантовая эффективность -  $\eta_k$

Количество фаз управляющего напряжения в ФПЗС -  $p$

Коэффициент использования излучения глазом -  $\kappa_z$

Коэффициент использования излучения источника приемником  
оптического излучения -  $\kappa$

Коэффициент неэффективности переноса зарядового пакета в ФПЗС -  $\xi$

Коэффициент отражения -  $\rho$

Коэффициент поглощения -  $\alpha$

Коэффициент преобразования потока излучения ЭОП -  $\eta$

Коэффициент усиления яркости ЭОП -  $\eta_L$

Коэффициент пропускания -  $\tau$

Коэффициент теплового излучения -  $\epsilon$

Коэффициент усиления фотоумножителя по току -  $M$

Линейное увеличение оптической системы -  $\beta$

Линейный размер изображения -  $y'$

Линейный размер предмета -  $y$

Максимальная СПЭС ЧТ -  $M_{e.\lambda_{\max}}$

Максимально допустимое сопротивление нагрузки ПОИ по переменному  
току -  $Z_{н.\max}$

Максимально допустимое сопротивление нагрузки ПОИ по постоянному  
току -  $R_{н.\max}$

Напряжение теплового шума -  $U_{ш.т}$

Напряжение фотосигнала -  $U_c$

Напряжение шума ПОИ -  $U_{ш}$

Облучённость -  $E_e$

Относительная влажность воздуха -  $f_e$

Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения -  $V(\lambda)$

Относительная спектральная характеристика чувствительности ПОИ -  $S_{отн}(\lambda)$

Относительная спектральная чувствительность ПОИ -  $S_{\lambda.отн}$

Относительное спектральное распределение потока излучения -  $\varphi_{e.\lambda}(\lambda)$

Относительная СПЭС -  $m_{e.\lambda}$

Передний апертурный угол оптической системы -  $\sigma_A$

Площадь элемента ФПЗС -  $A_{эл}$

Полоса частот -  $\Delta f$

Порог чувствительности в заданной полосе частот в световых ФМВ -  $\Phi_{v.n}$

Порог чувствительности в заданной полосе частот в энергетических ФМВ -  $\Phi_{e.n}$

Порог чувствительности ПОИ в единичной полосе частот -  $\Phi_{n.1}$

Порог чувствительности ФПЗС при реальном времени накопления -  $E_{v.n}$

Порог чувствительности ФПЗС при стандартном времени накопления -  $E_{v.n.c}$

Постоянная времени схемной релаксации ПОИ -  $\tau_p$

Поток излучения -  $\Phi_e$

Рабочее напряжение ПОИ -  $U_p$

Радиационная температура -  $T_M$

Размер элемента ФПЗС -  $d_{эл}$

Расстояние от оптической системы до изображения -  $a'$

Расстояние от оптической системы до предмета -  $a$

Световая анодная чувствительность фотоумножителя -  $S_{v.a}$



Световая отдача экрана ЭОПа -  $\eta_v$

Световая ФМВ -  $X_v$

Световая чувствительность фотокатода -  $S_{v,\kappa}$

Сила излучения -  $I_e$

Сопротивление нагрузки -  $R_n$

Сопротивление p-n-перехода при нулевом напряжении -  $R_0$

Спектральная плотность фотонной ФМВ -  $X_{p,\lambda}$

Спектральная плотность энергетической ФМВ -  $X_{e,\lambda}$

Спектральная чувствительность ПОИ к потоку излучения -  $S_{\lambda,\Phi_e}$

Спектральная чувствительность ПОИ к световому потоку -  $S_{\lambda,\Phi_v}$

Спектральное распределение энергетической ФМВ -  $X_{e,\lambda}(\lambda)$

СППИ -  $\Phi_{e,\lambda}$

СПЭС -  $M_{e,\lambda}$

СПЭС ЧТ -  $M_{e,\lambda}^0$

СПЭЯ -  $L_{e,\lambda}$

Среднее количество зарядов сигнала, генерируемых в одном элементе ФПЗС, -  $N_s$

Среднее количество переносов зарядового пакета в ФПЗС -  $n_{II}$

Средняя плотность темнового тока -  $i_{m,c}$

Стандартное время накопления -  $t_{n,c}$

Суммарный ток фотокатода -  $I_\kappa$

Темновое сопротивление ПОИ -  $R_m$

Темновой ток -  $I_m$

Темновой ток фотокатода -  $I_{m,\kappa}$

Температура в градусах Цельсия -  $t^0$

Термодинамическая температура -  $T$

Ток дробового шума ПОИ -  $I_{ш,др}$

Токовая интегральная чувствительность ПОИ -  $S_{I_{шшш}}$

Ток теплового шума ПОИ -  $I_{ш.т}$

Ток шума ПОИ -  $I_{ш}$

Удельная обнаружительная способность ПОИ -  $D^*$

Удельное сопротивление металла -  $\rho_m$

Удельный порог чувствительности ПОИ -  $\Phi_n^*$

Фокусное расстояние оптической системы -  $f'$

Фотонная ФМВ -  $X_p$

Фототок -  $X_\phi$

Число столбцов элементов в матричном ФПЗС -  $N_x$

Число строк элементов в матричном ФПЗС -  $N_y$

Ширина запрещённой зоны полупроводника -  $\Delta E_z$

Энергетическая светимость -  $M_e$

Энергетическая ФМВ -  $X_e$

Энергетическая яркость -  $L_e$

Энергия излучения -  $Q_e$

Эффективный коэффициент теплового излучения -  $\varepsilon'$

Яркостная температура -  $T_L$

# 1. ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

## 1.1 Теоретические положения

*Оптическое излучение - электромагнитное излучение, длина волн которого находится в диапазоне приблизительно от 1 нм до 1 мм. При этом по спектральному составу принято подразделять весь оптический диапазон на три области спектра: ультрафиолетовую - излучение с длиной волны от 1 нм до 0,38 мкм; видимую - излучение с длиной волны от 0,38 до 0,78 мкм и инфракрасную - излучение с длиной волны от 0,78 мкм до 1 мм [4].*

*Поток излучения [1,5]:* 
$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} Bm, \quad (1.1)$$

*где:  $dQ_e$  - энергия, переносимая излучением за малый промежуток времени;  $dt$  - время переноса, существенно большее периода электромагнитных колебаний.*

*Облучённость в данной точке поверхности [1,5]:*

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_n}, \frac{Bm}{m^2}, \quad (1.2)$$

*где  $d\Phi_e$  - поток излучения, падающий на малый участок поверхности, содержащий данную точку;  $dA_n$  - площадь участка.*

*Сила излучения в данном направлении [1,5]:*

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}, \frac{Bm}{ср}, \quad (1.3)$$

*где  $d\Phi_e$  - поток излучения, распространяющийся в малом телесном угле, содержащем данное направление;  $d\Omega$  - величина телесного угла.*

*Энергетическая светимость данной точки поверхности [1,5]:*

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_u}, \frac{Bm}{m^2}, \quad (1.4)$$

*где  $d\Phi_e$  - поток излучения, испускаемый с малого участка поверхности, содержащего данную точку;  $dA_u$  - площадь участка.*

Энергетическая яркость данной точки поверхности в данном направлении [1,5]:

$$L_e = \frac{d\Phi_e}{dA_u \cos \theta d\Omega} \cdot \frac{Bm}{m^2 cp}, \quad (1.5)$$

где  $d\Phi_e$  - поток излучения, распространяющийся с малого участка излучающей поверхности, содержащего данную точку, в малом телесном угле, содержащем данное направление;  $dA_u$  - площадь участка;  $d\Omega$  - величина телесного угла;  $\theta$  - угол между нормалью поверхности и направлением распространения излучения.

Поток излучения для любого участка спектра от  $\lambda_1$  до  $\lambda_k$  [1]:

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_k} \Phi_{e,\lambda} d\lambda \approx \sum_{i=1}^k \Phi_{e,\lambda,i} \Delta\lambda_i, \quad (1.6)$$

где  $\Phi_{e,\lambda}$  - СППИ;  $\Phi_{e,\lambda,i}$  - средняя СППИ на малом спектральном интервале  $\Delta\lambda_i$ .

Связь фотонных и энергетических ФМВ:

$$X_{p\lambda} = \frac{\lambda X_{e,\lambda}}{hc}; \quad (1.7)$$

$$X_p = \frac{1}{hc} \int_0^\infty \lambda X_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda; \quad (1.8)$$

$$X_e = hc \int_0^\infty \frac{X_{p,\lambda}(\lambda)}{\lambda} d\lambda, \quad (1.9)$$

где  $X_p$ ,  $X_e$  - соответственно фотонная и энергетическая ФМВ;  $X_{e,\lambda}$ ,  $X_{p,\lambda}$  - спектральные плотности соответственно энергетической и фотонной ФМВ;  $X_{e,\lambda}(\lambda)$ ,  $X_{p,\lambda}(\lambda)$  - спектральные распределения соответственно энергетической и фотонной ФМВ;  $h$  - постоянная Планка (см. табл. 1);  $c$  - скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме (см. табл. 1).

$$\text{Световая ФМВ [2]: } X_v = K_{\max} \int_0^\infty X_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (1.10)$$

где  $K_{\max}$  - максимальная спектральная световая эффективность

монохроматического излучения для дневного зрения (см. табл. 1);  $X_{e\lambda}(\lambda)$  - спектральное распределение энергетической ФМВ;  $V(\lambda)$  - относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения (см. табл. 2).

Связь энергетических и световых ФМВ [8]:

$$X_v = X_e K_{max} \kappa_z, \quad (1.11)$$

где  $\kappa_z$  - коэффициент использования излучения глазом (см. табл. 3):

$$\kappa_z = \frac{\int_0^\infty \varphi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}, \quad (1.12)$$

$\varphi_{e\lambda}(\lambda)$  - относительное спектральное распределение потока излучения.

Шкала звёздных величин [16]:

$$m - m_0 = -2,5 \lg \frac{E_v}{E_{v0}}, \quad (1.13)$$

где  $m$ ,  $m_0$  - звёздные величины двух звёзд;  $E_v$ ,  $E_{v0}$  - освещённости, создаваемые этими звёздами. Если  $E_{v0} = 1$  лк, то на границе земной атмосферы  $m_{0к} = -13,89$ , а на уровне моря  $m_{0з} = -14,2$ .

Коэффициент пропускания [9,1]:

$$\tau = \frac{\Phi_{пр}}{\Phi_0}, \quad (1.14)$$

где  $\Phi_{пр}$  - прошедший поток;  $\Phi_0$  - падающий поток.

Коэффициент отражения [9,1]:

$$\rho = \frac{\Phi_{отр}}{\Phi_0}, \quad (1.15)$$

где  $\Phi_{отр}$  - отражённый поток.

Коэффициент поглощения [9,1]:

$$\alpha = \frac{\Phi_{погл}}{\Phi_0}, \quad (1.16)$$

где  $\Phi_{погл}$  - поглощённый поток.

Энергетическая светимость облучаемой поверхности, создаваемая

отражённым излучением:

$$M_e = E_e \rho, \quad (1.17)$$

где  $E_e$  - облучённость поверхности;  $\rho$  - коэффициент отражения.

Облучённость, создаваемая точечным источником на поверхности, на которую излучение падает под углом [5]:

$$E_e = \frac{I_e \cos \beta}{l^2}, \quad (1.18)$$

где  $I_e$  - сила излучения источника;  $\beta$  - угол между нормалью поверхности и падающим излучением;  $l$  - расстояние от источника до поверхности.

Облучённость, создаваемая удалённым источником:

$$E_e = \pi L_e \frac{\alpha_{ист}^2}{4}, \quad (1.19)$$

где  $L_e$  - энергетическая яркость источника;  $\alpha_{ист}$  - угловой размер источника.

Поток излучения, поступающий с излучающей поверхности источника на удалённую облучаемую поверхность [1,5]:

$$\Phi_e = L_e A_1 A_2 \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{l^2}, \quad (1.20)$$

где  $L_e$  - энергетическая яркость излучающей поверхности источника;  $A_1, A_2$  - площади излучающей и облучаемой поверхностей;  $\beta_1, \beta_2$  - углы между направлением распространения излучения и нормальями соответственно излучающей и облучаемой поверхностей;  $l$  - расстояние между поверхностями.

Поток излучения, создаваемый объективом в плоскости изображений при малом переднем апертурном угле [6]:

$$\Phi_e = \tau \pi L_e A_1 \sin 2\sigma_A, \quad (1.21)$$

где  $\tau$  - коэффициент пропускания объектива;  $L_e$  - энергетическая яркость источника;  $A_1$  - площадь излучающей поверхности;  $\sigma_A$  - передний апертурный угол объектива.

Поток излучения, создаваемый коллиматором в фокальной плоскости приёмного объектива при малом угле расходимости, постоянной силе излучения в пределах этого угла и диаметре приёмного объектива, меньшем диаметра объектива коллиматора [6]:

$$\Phi_e = \tau_1 \tau_2 L_e \frac{A_{\text{вых}1} A_{\text{вых}2}}{l^2}, \quad (1.22)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  - коэффициенты пропускания объектива коллиматора и приёмного объектива;  $L_e$  - энергетическая яркость источника, расположенного в фокальной плоскости объектива коллиматора;  $A_{\text{вых}1}, A_{\text{вых}2}$  - площади выходного и входного зрачков объектива коллиматора и приёмного объектива;  $l$  - расстояние между объективами.

Линейное увеличение оптической системы [5]:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}, \quad (1.23)$$

где  $y, y'$  - линейные размеры соответственно предмета и изображения;  $a, a'$  - расстояния от соответствующих главных плоскостей оптической системы до предмета и изображения.

Линейное увеличение оптической системы с предметом в фокальной плоскости одного объектива и изображением в фокальной плоскости второго объектива [7]:

$$\beta = \frac{f_2'}{f_1'}, \quad (1.24)$$

где  $f_1', f_2'$  - фокусные расстояния первого и второго объективов.

Видимое (угловое) увеличение телескопической системы [7]:

$$\Gamma = W = \frac{\text{tg } \omega'}{\text{tg } \omega} \approx \frac{\omega'}{\omega} = \frac{D}{D'}, \quad (1.25)$$

где  $\omega, \omega'$  - угловое поле в пространстве предметов и пространстве изображений;  $D, D'$  - диаметры входного и выходного зрачков системы.

## 1.2 Примеры решения задач

### Задача 1.2.1

Вычислить монохроматические световые потоки  $d\Phi_{v.1}(\lambda_1)$ ,  $d\Phi_{v.2}(\lambda_2)$ ,  $d\Phi_{v.3}(\lambda_3)$  источника излучения с линейчатым спектром на длинах волн  $\lambda_1 = 0,45 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_2 = 0,55 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_3 = 0,65 \text{ мкм}$ , если каждый из соответствующих потоков излучения равен  $2 \text{ Вт}$ .

Дано:

$$\lambda_1 = 0,45 \text{ мкм}, \lambda_2 = 0,55 \text{ мкм}, \lambda_3 = 0,65 \text{ мкм},$$

$$d\Phi_{e.1}(\lambda_1) = d\Phi_{e.2}(\lambda_2) = d\Phi_{e.3}(\lambda_3) = 2 \text{ Вт}.$$

Определить:  $d\Phi_{v.1}(\lambda_1)$ ,  $d\Phi_{v.2}(\lambda_2)$ ,  $d\Phi_{v.3}(\lambda_3)$ .

Решение:

Монохроматический поток излучения и монохроматический световой поток связаны соотношением, полученным из (1.10):

$$d\Phi_v(\lambda) = K_{\max} \cdot d\Phi_{e.\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda).$$

По табл. 1 и табл. 2 найдем:  $K_{\max} = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}},$

$$V(\lambda_1) = 0,038 \text{ при } \lambda_1 = 0,45 \text{ мкм};$$

$$V(\lambda_2) = 0,995 \text{ при } \lambda_2 = 0,55 \text{ мкм и}$$

$$V(\lambda_3) = 0,107 \text{ при } \lambda_3 = 0,65 \text{ мкм}.$$

Тогда световые потоки будут равны:

$$d\Phi_{v.1}(\lambda_1) = 683 \cdot 2 \cdot 0,038 = 51,9 \text{ лм};$$

$$d\Phi_{v.2}(\lambda_2) = 683 \cdot 2 \cdot 0,995 = 1359,2 \text{ лм};$$

$$d\Phi_{v.3}(\lambda_3) = 683 \cdot 2 \cdot 0,107 = 146,2 \text{ лм}.$$

Ответ:

Монохроматические световые потоки на указанных длинах волн будут соответственно равны:

$$d\Phi_{v.1}(\lambda_1) = 51,9 \text{ лм}; d\Phi_{v.2}(\lambda_2) = 1359,2 \text{ лм}; d\Phi_{v.3}(\lambda_3) = 146,2 \text{ лм}.$$

### Задача 1.2.2



Найти порог чувствительности глаза, различающего с поверхности Земли звезду 5-ой звездной величины, если диаметр зрачка глаза  $D_z$  равен 5 мм.

Дано:  $m = 5$ ,

$$D_z = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Определить:  $\Phi_{v.n}$ .

Решение:

Из выражения (1.13) найдем освещённость  $E_{v.m}$  поверхности Земли, создаваемую звездой  $m$ -ой величины в люксах:

$$m - m_0 = -2,5 \lg \frac{E_{v.m}}{E_{v.0}},$$

где  $m_0 = -14,2$  и  $E_{v.0} = 1 \text{ лк}$ ,  $E_{v.m} = E_{v.5}$  - освещённость, создаваемая звездой величины  $m = 5$ .

Тогда:

$$E_{v.5} = 10^{-(5+14,2)/2,5} = 2,08 \cdot 10^{-8} \text{ лк} = 2,08 \cdot 10^{-2} \text{ мклк}.$$

**Порог чувствительности глаза** есть минимальный световой поток  $\Phi_{v.n}$ , падающий на зрачок глаза, который человек может различить. Определим его из выражения (1.2):

$$\Phi_{v.n} = E_{v.5} A_z,$$

где  $A_z = \frac{\pi D_z^2}{4}$  - площадь зрачка глаза.

Тогда:

$$\Phi_{v.n} = E_{v.5} \frac{\pi D_z^2}{4} = 2,5 \cdot 10^{-8} \frac{3,14 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 4 \cdot 10^{-13} \text{ лм}.$$

Ответ:

Порог чувствительности глаза  $\Phi_{v.n} = 4 \cdot 10^{-13} \text{ лм}.$

### Задача 1.2.3

Поток излучения  $\Phi_e$  от источника типа ЧТ в форме отверстия площадью  $A_1 = 1 \text{ мм}^2$  с энергетической светимостью  $M_e^0 = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$  падает нормально на плоскость площадью  $A_2 = 3 \text{ мм}^2$ , находящуюся на расстоянии  $l = 1 \text{ м}$ .

Найти  $\Phi_e$ , если плоскость отверстия и облучаемая плоскость параллельны.

Указание: воспользоваться следствием из закона Ламберта.

Дано:  $A_1 = 1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$ ,  $A_2 = 3 \text{ мм}^2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ,  $l = 1 \text{ м}$ ,

$$M_e^0 = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2} = 0,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Определить:  $\Phi_e$ .

Решение:

ЧТ - ламбертовский излучатель, поэтому справедливо следствие из закона Ламберта (2.10):  $L_e^0 = \frac{M_e^0}{\pi}$ .

Поток излучения, падающий с излучающей поверхности на удаленную облучаемую поверхность по формуле (1.20) равен:

$$\Phi_e = \frac{L_e A_1 A_2 \cos \beta_1 \cos \beta_2}{l^2}.$$

Так как поверхности параллельны, а поток падает нормально, то  $\cos \beta_1 = \cos \beta_2 = 1$ . Следовательно, поток излучения будет равен:

$$\Phi_e = \frac{L_e^0 A_1 A_2}{l^2} = \frac{M_e^0 A_1 A_2}{\pi l^2} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 1} \approx 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Ответ:

Поток излучения  $\Phi_e = 0,5 \text{ мкВт}$ .

#### Задача 1.2.4

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

Дано:  $A = 5 \text{ мм}^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ,

$$l = 2 \text{ м},$$

$$I_e = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}},$$

$$\beta = 30^\circ$$

Определить:  $\Phi_e$

Решение:

По формуле (1.2) облученность в данной точке поверхности равна  $E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$ . По формуле (1.18) облученность, создаваемая точечным источником на поверхности, на которую излучение падает под углом  $\beta$ , равна:  $E_e = \frac{I_e \cos \beta}{l^2}$ .

Тогда поток излучения, падающий на поверхность, будет определяться выражением:

$$\Phi_e = E_e A = \frac{I_e A \cos \beta}{l^2} = \frac{2 \cos 30^\circ \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{2^2} \approx 2,17 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}.$$

Ответ:

Поток излучения, падающий на площадку, равен  $\Phi_e = 2,17 \text{ мкВт}$ .

### Задача 1.2.5

Найти поток излучения и облученность, создаваемую этим потоком на плоскости площадью  $A_2 = 3 \text{ мм}^2$ , находящейся на расстоянии  $l = 1 \text{ м}$  от излучателя площадью  $A_1 = 1 \text{ мм}^2$  с одинаковой во всех направлениях энергетической яркостью  $L_e = 1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot \text{ср}}$ . Поверхность излучателя параллельна поверхности площадки и перпендикулярна линии, их соединяющей.

Дано:  $A_1 = 1 \text{ мм}^2 = 1 \text{ м}^2$ ,  $A_2 = 3 \text{ мм}^2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ,

$$L_e = 1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot \text{ср}} = 1,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}, l = 1 \text{ м}.$$

Определить:  $\Phi_e$ ,  $E_e$ .

Решение:

Поток излучения, падающий с излучающей поверхности на удаленную облучаемую поверхность по формуле (1.20) равен:

$$\Phi_e = \frac{L_e A_1 A_2 \cos \beta_1 \cos \beta_2}{l^2}.$$

Так как поверхности излучателя и облучаемой площадки параллельны, а поток падает нормально к последней, то  $\cos \beta_1 = \cos \beta_2 = 1$ . Следовательно, поток излучения будет равен:

$$\Phi_e = \frac{L_e A_1 A_2}{l^2} = \frac{1,3 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{1} = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}.$$

Облучённость равномерно облучаемой поверхности согласно формуле (1.2) равна:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A_2} = \frac{3,9 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}} = 1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ: Поток излучения и облученность на плоскости соответственно равны:  $\Phi_e = 3,9 \text{ мкВт}$  и  $E_e = 1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

### Задача 1.2.6

На высоте  $l = 500$  км вращается спутник диаметром  $1$  м (рис.1.2.1)  
Коэффициент отражения спутника  $\rho_{cn} = 0,5$ . Определить звёздную  
величину спутника.

Яркость Солнца  $L_c = 150 \frac{\Gamma \kappa \partial}{\text{м}^2}$ . Угловой размер Солнца  
 $\alpha_c = 9 \text{ мрад}$ .

Указания: 1) Поглощением в атмосфере пренебречь.

2) Воспользоваться следствием из закона Ламберта.

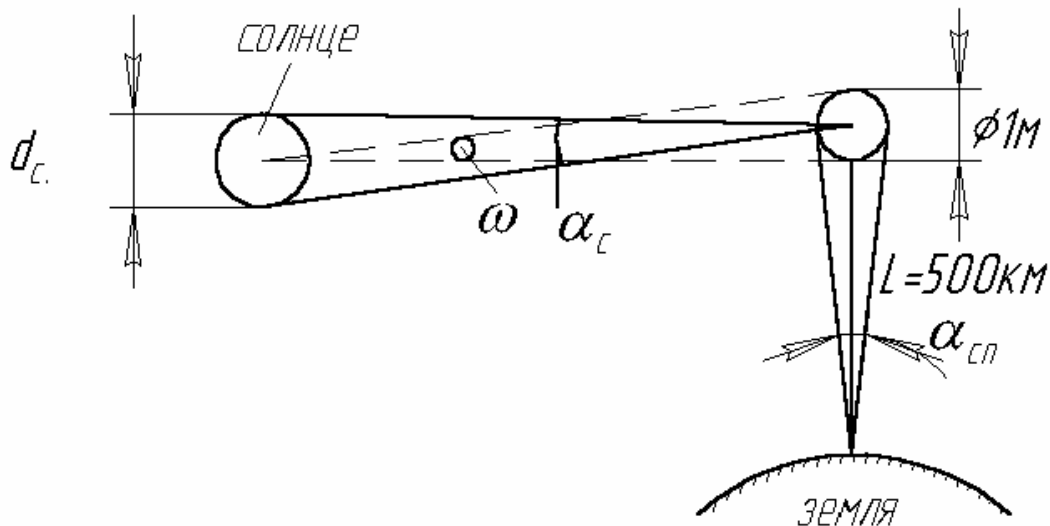


Рисунок 1.2.1

Дано:  $l = 500 \text{ км} = 5 \cdot 10^5 \text{ м}$ ,  $L_{v.c} = 150 \frac{\Gamma \kappa \partial}{\text{м}^2} = 150 \cdot 10^7 \frac{\kappa \partial}{\text{м}^2}$ ,

$\alpha_c = 9 \text{ мрад} = 0,009 \text{ рад}$ ,  $\rho_{cn} = 0,5$ .

Определить:  $m_{cn}$

Решение:

1) По формуле (1.20) определяем освещённость спутника от Солнца:

$$E_{v.cn} = \frac{\pi}{4} \cdot L_c \cdot \alpha_c^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 150 \cdot 10^7 \cdot 0,009^2 = 95000 \text{ лк}$$

2) По формулам (1.17) и (2.4) определяем светимость и яркость  
спутника:

$$M_{v.cn} = E_{cn} \cdot \rho \frac{\text{лм}}{\text{м}^2},$$

$$L_{v.cn} = \frac{M_{cn}}{\pi} = \frac{E_{cn} \cdot \rho}{\pi} \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}.$$

3) Рассчитываем освещённость Земли спутником, освещаемым Солнцем, по формуле (1.20):

$$E_{v.3-cn} = \frac{\pi}{4} \cdot L_{cn} \cdot \alpha_{cn}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\rho \cdot E_{cn}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{5 \cdot 10^5} \right)^2 = \frac{0,5 \cdot 95 \cdot 10^3}{4 \cdot 25 \cdot 10^{10}} = 4,75 \cdot 10^{-8} \text{ лк}.$$

4) По формуле (1.13) определяем звёздную величину спутника:

$$m - m_0 = -2,5 \cdot \lg E = -2,5 \cdot \lg(4,75 \cdot 10^{-8}) = -2,5 \cdot (-8 + \lg 4,75) = 18^m,3.$$

Откуда:

$$m = m_0 + 18^m,3 = -14,2 + 18^m,3 = 4^m,1$$

Ответ: Спутник является  $4^m,1$  звёздной величиной.

Комментарий к ответу: Поскольку невооружённый глаз различает пятую звёздную величину  $5^m,0$ , глаз увидит спутник.

### Задача 1.2.7

Имеется лампа накаливания с яркостью нити  $3 \cdot 10^7 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$  и площадью нити  $A_{\text{нити}} = 1 \text{ см}^2$ . Найти дистанцию  $l$ , на которой будет видна нить простым глазом в космосе при условии, что пороговая освещённость глаза  $E_{\text{в.н.г}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ лк}$ . Диаметр зрачка глаза  $d_z = 5 \text{ мм}$ .

Найти также пороговый световой поток для глаза  $\Phi_{\text{в.н.г}}$ .

Дано:  $3 \cdot 10^7 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ ,  $A_{\text{нити}} = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $E_{\text{в.н.г}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ лк}$ ,

$$d_z = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Определить:  $l$ ,  $\Phi_{\text{в.н.г}}$ .

Решение:

Пороговая освещённость глаза может быть получена по формуле (1.19):

$$E_{\text{в.н.г}} = \frac{L_{\text{в.ист}} \cdot A_{\text{ист}}}{l^2} \frac{\text{лм}}{\text{м}^2},$$

Тогда:

$$l = \sqrt{\frac{L_{\text{в.ист}} \cdot A_{\text{ист}}}{E_{\text{в.н.г}}}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^7 \cdot 0,0001}{2,5 \cdot 10^{-8}}} = 0,35 \cdot 10^6 = 350 \text{ км}.$$

Выразим и определим пороговый световой поток для глаза через пороговую освещённость (см. формулу 1.2):

$$\Phi_{\text{в.н.г}} = E_{\text{в.н.г}} \cdot \frac{\pi \cdot d_z^2}{4} = 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 4,9 \cdot 10^{-13} \text{ лм}.$$

Ответ:

Нить видна глазом на расстоянии  $l = 350 \text{ км}$ , а пороговый световой поток для глаза  $\Phi_{\text{в.н.г}} = 4,9 \cdot 10^{-13} \text{ лм}$ .

### 1.3 ЗАДАЧИ

- 1.3.1. Вычислить поток излучения на участке от **0,45** до **0,75 мкм**, если спектральная плотность потока излучения (СППИ) постоянна и равна  $1,5 \frac{\text{Вт}}{\text{мкм}}$ .
- 1.3.2. Найти световой поток гелий-неонового лазера, если его поток излучения равен **10 мВт**, а длина волны излучения составляет **632,8 нм**.
- 1.3.3. 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**.
- 1.3.4. 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.
- 1.3.5. 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.
- 1.3.6. Найти световой поток, падающий на входной зрачок прибора площадью **100 см<sup>2</sup>** от звезды нулевой звёздной величины.
- 1.3.7. Найти световой поток, падающий на входной зрачок прибора диаметром **10 см** от звезды пятой звёздной величины.
- 1.3.8. Найти энергетическую яркость диффузно отражающей по закону Ламберта поверхности площадью **5 мм<sup>2</sup>** с коэффициентом отражения **0,7**, расположенной на расстоянии **2 м** от точечного источника, если сила излучения источника равна  $2 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$ , а угол падения излучения на поверхность составляет **45°**.



Указание. Воспользоваться следствием из закона Ламберта.

- 1.3.9. Энергетическая яркость источника равна  $100 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср}}$ . 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.
- 1.3.10. 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  $1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot \text{ср}}$ . 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  $\alpha$ .
- 1.3.11. 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  $1,3 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot \text{ср}}$ . Излучающая поверхность располагается в фокальной плоскости объектива с диаметром  $60 \text{ мм}$  и фокусным расстоянием  $200 \text{ мм}$ , а облучаемая плоскость - в фокальной плоскости объектива с диаметром  $50 \text{ мм}$  и фокусным расстоянием  $150 \text{ мм}$ . Коэффициенты пропускания объективов равны  $1$ .
- 1.3.12. 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  $1,5 \frac{\text{Гкд}}{\text{м}^2}$ , угловой размер Земли со стороны Луны равен

**34 мрад**, угловой размер Солнца - **9 мрад**. Указания: 1) расстояние от Земли до Солнца считать равным расстоянию от Луны до Солнца; 2) воспользоваться следствием из закона Ламберта.

1.3.13. Луна облучается лазером с диаметром пучка **10 мм**, углом расходимости **20'** и мощностью в импульсе  **$10^9 \text{ Вт}$** . Излучение лазера проходит через телескоп с диаметром входного зрачка **10 мм** и выходного - **250 см**. Расстояние от Земли до Луны равно **400000 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 см**; 2) потоки излучения, попадающие в зрачок телескопа (**250 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.

1.3.14. 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 мклк**.

1.3.15. Определить яркость источника площадью  **$1 \text{ мм}^2$** , который испускает внутри телесного угла в **0,03 ср** световой поток **12 лм**.

1.3.16. С левой стороны от фотометра на расстоянии **15 см** находится эталонная лампа силой света **25 кд**. Определить силу света испытуемой лампы, расположенной справа на расстоянии **45 см** от фотометра, если обе половины фотометра освещены одинаково.

1.3.17. На мачте высотой **15 м** подвешена электрическая лампа, создающая освещенность **1,63 лк** на расстоянии **8 м** от основания мачты. Определить силу света лампы.

- 1.3.18. Над центром круглой площадки висит электрическая лампочка. Освещенность в центре равна **40 лк**, на краю **5 лк**. Определить угол падения лучей на край площадки.
- 1.3.19. Два одинаковых точечных источника света установлены на высоте **6 м** от земли и на расстоянии **16 м** друг от друга. Определить полный световой поток, создаваемый каждым источником, если освещенность в точке, расположенной на земле посередине между источниками, составляет **7,2 лк**.
- 1.3.20. Яркость Солнца составляет  $1,5 \frac{\text{Гкд}}{\text{м}^2}$ , диаметр **1,4 млн км**.  
Определить силу света Солнца, наблюдаемую с Земли, и освещенность поверхности Земли, создаваемую нормально падающими солнечными лучами. Расстояние от Земли до Солнца равно  **$1,5 \cdot 10^8$  км**.

## 2. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

### 2.1 Теоретические положения

*Закон Стефана-Больцмана [1,5]:*

$$M_e^0(T) = \sigma T^4, \quad (2.1)$$

где  $M_e^0$  - энергетическая светимость ЧТ;  $T$  - термодинамическая температура ЧТ;  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана (см. табл. 1).

*Закон Стефана-Больцмана для серых тел [1,5]:*

$$M_e^0(T) = \varepsilon(T)\sigma T^4, \quad (2.2)$$

где  $M_e$  - энергетическая светимость серого тела;  $\varepsilon(T)$  - коэффициент теплового излучения серого тела:

$$\varepsilon(T) = \frac{M_{e\lambda}^{сер}(\lambda, T)}{M_{e\lambda}^0(\lambda, T)}, \quad (2.3)$$

где  $M_{e\lambda}^{сер}(\lambda, T)$  - СПЭС серого тела;  $M_{e\lambda}^0(\lambda, T)$  - СПЭС ЧТ.

*Закон смещения Вина для спектра длин волн [1,5]:*

$$\lambda_{max} = \frac{C_\lambda}{T}, \quad (2.4)$$

где  $\lambda_{max}$  - длина волны, на которой СПЭС ЧТ в спектре длин волн максимальна;  $C_\lambda$  - постоянная закона смещения в спектре длин волн (см. Табл. 1).

*Закон смещения Вина для спектра частот [1,5]:*

$$f_{max} = C_f T, \quad (2.5)$$

где  $f_{max}$  - частота излучения, на которой СПЭС ЧТ в спектре частот максимальна;  $C_f$  - постоянная закона смещения в спектре частот (см. Табл. 1).

Закон Планка в относительных величинах [1,5]:

$$y = C'_1 x^{-5} \left[ \exp \frac{C'_2}{x} - 1 \right]^{-1}, \quad (2.6)$$

где:  $y$  - относительная СПЭС ЧТ;  $x$  - относительная длина волны;  $C'_1, C'_2$  - постоянные закона Планка в относительных величинах (см. табл. 4);

$$y = \frac{M_{e,\lambda}^0(\lambda, T)}{M_{e,\lambda_{\max}}^0(T)}; \quad x = \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}, \quad (2.7)$$

где  $M_{e,\lambda_{\max}}^0(T)$  - максимальная СПЭС ЧТ.

Второй закон Вина [1,5]:

$$M_{e,\lambda_{\max}}^0(T) = C'_\lambda T^5, \quad (2.8)$$

где  $C'_\lambda$  - постоянная второго закона Вина (см. табл. 1).

Доля излучения ЧТ в интервале от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$  [8]:

$$\frac{\Delta M_e^0}{M_e^0} = z_2(x_2) - z_1(x_1), \quad (2.9)$$

где  $x$  - относительная длина волны;  $z(x) = \frac{\int_0^x y dx}{\int_0^\infty y dx}$ , (см. табл. 5).

Следствие из закона Ламберта [1,5]:

$$M_e = \pi L_e, \quad (2.10)$$

где  $M_e$  - энергетическая светимость источника;  $L_e$  - энергетическая яркость источника.

Связь истинной температуры с радиационной [1,5]:

$$T = \frac{T_M}{\sqrt[4]{\varepsilon(T)}} \quad (2.11)$$

где  $T$  - истинная термодинамическая температура;  $T_M$  - радиационная температура;  $\varepsilon(T)$  - коэффициент теплового излучения.

Связь яркостной температуры с истинной в видимой части спектра [1,5]:

$$T = \frac{C_2}{\lambda_\phi [C_2 / (\lambda_\phi T_L) + \ln \varepsilon(\lambda_\phi, T)]}, \quad (2.12)$$

где  $T_L$  - яркостная температура;  $C_2$  - вторая постоянная закона Планка (см. табл. 1);  $\lambda_\phi$  - длина волны излучения, пропускаемого оптическим фильтром.

Коэффициент теплового излучения металлов [10]:

$$\varepsilon(\lambda, T) = -0,0667 \frac{\rho_m}{\lambda} + 0,0031 \left( \frac{\rho_m}{\lambda} \right)^{3/2} + 0,365 \left( \frac{\rho_m}{\lambda} \right)^{1/2}, \quad (2.13)$$

где  $\rho_m$  - удельное сопротивление металла при данной температуре.

Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры [10]:

$$\rho_m = \rho_{m,0} \frac{(1 + \alpha_R t^o)}{100}, \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (2.14)$$

где  $\rho_{m,0}$  - удельное сопротивление металла при нормальной температуре (см. табл. 1);  $\alpha_R$  - температурный коэффициент сопротивления металла (см. табл. 1);  $t^o$  - температура металла в градусах Цельсия.

## 2.2. Примеры решения задач

### Задача 2.2.1

Для излучателя типа ЧТ с температурой  $2898\text{ K}$ , площадью излучающей диафрагмы  $1\text{ см}^2$  определить световой поток, светимость, и яркость.

Дано:  $T_{\text{чт}} = 2897\text{ K}$ ,  $A_{\text{чт}} = 1\text{ см}^2 = 1 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2$ .

Определить:  $\Phi_v^0$ ,  $M_v^0$ ,  $I_v^0$ ,  $L_v^0$ .

Решение:

1) По закону Стефана-Больцмана (2.1) найдем энергетическую светимость

$$\text{ЧТ: } M_e^0 = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2898^4 = 4 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

2) Для ЧТ из следствия из закона Ламберта (2.10):

$$L_e^0 = \frac{M_e^0}{\pi} = \frac{4 \cdot 10^6}{3,14} = 1,27 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

3) По формулам (1.3) и (1.5):  $L_e^0 = \frac{\Phi_e^0}{A_{\text{чт}} \cdot \Omega}$ ;  $I_e^0 = \frac{\Phi_e^0}{d\Omega}$  определяем:

$$I_e^0 = L_e^0 \cdot A_{\text{чт}} = 1,27 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 127 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}.$$

4) По формуле (1.4) находим:  $\Phi_e = M_e \cdot A_{\text{чт}} = 4,00 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 400\text{ Вт}$ .

5) Определим световой поток, светимость, и яркость по формуле (1.11),

если для  $T_{\text{чт}} = 2898\text{ K}$  из табл. 3  $\kappa_z = 2,5 \cdot 10^{-2}$ :

$$\Phi_v^0 = \Phi_e^0 \cdot \kappa_z \cdot 683 = 400 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 683 = 6830\text{ лм},$$

$$M_v^0 = M_e^0 \cdot \kappa_z \cdot 683 = 4 \cdot 10^6 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 683 = 68,30 \cdot 10^6 \frac{\text{лм}}{\text{м}^2},$$

$$I_v^0 = I_e^0 \cdot 683 \cdot \kappa_z = 127 \cdot 683 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 2,168 \cdot 10^3 \text{ кд},$$

$$L_v^0 = L_e^0 \cdot 683 \cdot \kappa_z = 1,27 \cdot 10^6 \cdot 683 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 2,168 \cdot 10^7 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$$

Ответ:  $\Phi_v^0 = 6830\text{ лм}$ ,  $M_v^0 = 6830 \frac{\text{лм}}{\text{см}^2}$ ,  $I_e^0 = 2,168 \cdot 10^3 \text{ кд}$ ,  $L_v^0 = 2,168 \frac{\text{Гкд}}{\text{м}^2}$ .

### Задача 2.2.2

Определить энергетическую светимость объекта  $\Delta M_{e.\Delta\lambda}$  в спектральном интервале  $\Delta\lambda = 1 \div 5 \text{ мкм}$  при его температуре  $1450 \text{ К}$ ,  $\varepsilon(T, \Delta\lambda) = 0.5$ , а также какую долю составляет энергетическая светимость в указанном спектральном диапазоне по отношению к энергетической светимости данного объекта во всем диапазоне спектра излучения объекта.

Дано:  $T = 1450 \text{ К}$ ;  $\Delta\lambda = 1 \div 5 \text{ мкм}$ ;  $\varepsilon(T, \Delta\lambda) = 0.5$ .

Определить:  $\Delta M_{e.\Delta\lambda}$ ,  $\frac{\Delta M_{e.\Delta\lambda}}{M_e}$ .

Решение:

1) Определим длину волны максимума излучения данного объекта по

закону смещения Вина (2.4):  $\lambda_{\max} = \frac{28,98 \cdot 10^{-4}}{1450} \cong 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

2) Затем по формуле (2.7) определим:  $x_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{\max}} = 0,5$ ;  $x_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{\max}} = 2,5$ .

3) По табл. 5 найдем значения:  $z_1 = 0,01$ ;  $z_2 = 0,82$ .

4) По формуле (2.9) определим, какую долю составляет энергетическая светимость  $\Delta M_{e.\Delta\lambda}$  в указанном спектральном диапазоне по отношению к энергетической светимости данного объекта  $\Delta M_e$  во всем диапазоне спектра:  $\frac{\Delta M_{e.\Delta\lambda}}{M_e} = z_2 - z_1 = 0,82 - 0,01 = 0,81 = 81\%$ .

5) Определяем  $\Delta M_{e.\Delta\lambda}$  по закону Стефана - Больцмана (2.1) и формуле (2.3):

$$\Delta M_{e.\Delta\lambda} = (z_2 - z_1) \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \varepsilon(T, \Delta\lambda) = 0,81 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot 1450^4 \cdot 0,5 \cong 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Ответ: Энергетическая светимость указанного объекта равна

$\Delta M_{e.\Delta\lambda} = 0,1 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$  и составляет  $81\%$  по отношению к энергетической

светимости данного объекта во всем диапазоне спектра.

### Задача 2.2.3



Определить энергетическую светимость ЧТ площадью  $1 \text{ см}^2$  в спектральном диапазоне от  $0,4$  до  $1 \text{ мкм}$  и поток излучения, падающий на ПОИ с диаметром ФЧЭ  $0,8 \text{ см}$ , находящийся на расстоянии  $10 \text{ м}$  от ЧТ, в названном интервале спектра, если температура ЧТ равна:

$$1) \quad T_1 = 3000 \text{ К};$$

$$2) \quad T_2 = 3500 \text{ К}.$$

Плоскости ЧТ и ФЧЭ ПОИ параллельны.

Дано:  $A_{\text{ЧТ}} = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $d_{\text{ПОИ}} = 0,8 \text{ см} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $l = 10 \text{ м}$ ;  
 $\lambda_1 = 0,4 \text{ мкм}$ ;  $\lambda_2 = 1 \text{ мкм}$ ;  $T_1 = 3000 \text{ К}$ ;  $T_2 = 3500 \text{ К}$ .

Определить: 1)  $\Delta M^0_{e.\Delta\lambda}(T_1)$ ,  $\Delta \Phi_{e.\Delta\lambda}(T_1)$ ;

2)  $\Delta M^0_{e.\Delta\lambda}(T_2)$ ;  $\Delta \Phi_{e.\Delta\lambda}(T_2)$ .

Решение:

1) при температуре  $T_1 = 3000 \text{ К}$  по закону Вина (2.5) определим длину волны, соответствующую максимальному значению СПЭС ЧТ:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{C_\lambda}{T} = \frac{2898 \cdot 10^{-4}}{3000} = 0,966 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Далее по формуле (2.7) вычислим значения  $x_1$  и  $x_2$ :

$$x_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{0,4}{0,966} = 0,414, \quad x_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{1}{0,966} = 1,035$$

и по табл. 2 (см. приложение) находим значения  $z_1$  и  $z_2$ :

$$z_1 = f(x_1) = 24,3 \cdot 10^{-4} = 0,00243; \quad z_2 = f(x_2) = 0,277.$$

Для определения энергетической светимости в заданном спектральном интервале воспользуемся формулами (2.1) и (2.9):

$$\begin{aligned} \Delta M^0_{e.\Delta\lambda}(T_1) &= (z_2 - z_1) \sigma T^4 = (0,277 - 0,00243) \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 3000^4 = \\ &= 126,1 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \end{aligned}$$

Поток излучения, падающий на ПОИ, согласно формулам (1.20) и (2.10) определяется как:

$$\Delta\Phi_{e.\Delta\lambda}^0(T_1) = \Delta L_{e.\Delta\lambda}^0(T_1) \frac{A_{\text{ЧТ}} \cdot A_{\text{ПОИ}} \cos \beta_1 \cos \beta_2}{l^2} =$$

$$= \frac{\Delta M_{e.\Delta\lambda}^0(T_1)}{\pi} \frac{A_{\text{ЧТ}} \cdot A_{\text{ПОИ}} \cos \beta_1 \cos \beta_2}{l^2}$$

Поскольку плоскости ЧТ и ФЧЭ ПОИ параллельны, то  $\cos \beta_1 = \cos \beta_2 = 1$  и поток излучения будет равен:

$$\Delta\Phi_{e.\Delta\lambda}^0(T_1) = \frac{M_{e.\Delta\lambda}^0(T_1)}{\pi} \cdot A_{\text{ЧТ}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ПОИ}}^2}{4 \cdot l^2} = \frac{126,1 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4} \cdot 8^2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^2} =$$

$$0,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

2) Аналогично решим задачу для  $T_2 = 3500 \text{ К}$ :

$$\lambda_{\text{max}} \frac{2898 \cdot 10^{-4}}{3500} = 0,828 \cdot 10^{-6} \text{ м}, (\text{см. п. 1});$$

$$x_1 = \frac{0,4}{0,828} = 0,483; \quad x_2 = \frac{1}{0,828} = 1,207;$$

$$z_1 = 0,00741; \quad z_2 = 0,3791.$$

$$\Delta M_{e.\Delta\lambda}^0(T_2) = (0,3791 - 0,00741) \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 3500^4 = 316,25 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$\Delta\Phi_{e.\Delta\lambda}^0(T_2) = \frac{316,25 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4} \cdot 8^2 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^2} = 0,51 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} = 0,051 \text{ мВт}.$$

Ответ:

1) для ЧТ с температурой  $T_1 = 3000 \text{ К}$  энергетическая светимость и поток излучения, падающий на ПОИ, соответственно равны

$$\Delta M_{e.\Delta\lambda}^0(T_1) = 1261 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \text{ и } \Delta\Phi_{e.\Delta\lambda}^0(T_1) = 0,02 \text{ мВт};$$

2) для ЧТ с температурой  $T_2 = 3500 \text{ К}$  энергетическая светимость и поток излучения, падающий на ПОИ, соответственно равны

$$\Delta M_{e.\Delta\lambda}^0(T_2) = 3162,5 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \text{ и } \Delta\Phi_{e.\Delta\lambda}^0(T_2) = 0,051 \text{ мВт}.$$

#### Задача 2.2.4

ЧТ имеет температуру  $T_{\text{ЧТ}} = 2500 \text{ К}$  и диаметр  $d_{\text{ЧТ}} = 0,5 \text{ см}$ .

Определить:

- 4) долю излучения ЧТ в интервале от  $0,7$  до  $4 \text{ мкм}$ ;
- 4) энергетическую светимость, энергетическую яркость и силу излучения в заданном интервале спектра;

4) поток излучения, падающий на ПОИ с размером ФЧЭ  $5 \times 5 \text{ мм}$  в заданном спектральном интервале, находящийся от ЧТ на расстоянии  $l = 0,5 \text{ м}$ . ФЧЭ ПОИ параллелен ЧТ.

Дано:  $T_{\text{ЧТ}} = 2500 \text{ К}$ ,  $d_{\text{ЧТ}} = 0,5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\lambda_1 = 0,7 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_2 = 4 \text{ мкм}$ ,  $A_{\text{ПОИ}} = (5 \cdot 5) \text{ мм}^2 = (5 \cdot 5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ,  $l = 0,5 \text{ м}$ .

Определить:  $\frac{\Delta M_{e,\Delta\lambda}^0(T)}{M_e^0(T)}$ ;  $\Delta M_{e,\Delta\lambda}^0(T)$ ;  $\Delta L_{e,\Delta\lambda}^0$ ;  $\Delta I_{e,\Delta\lambda}^0$ ;  $\Delta \Phi_{e,\Delta\lambda}$ .

Решение:

По закону Вина (2.5) определим длину волны, соответствующую максимальному значению СПЭС ЧТ:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{C_\lambda}{T} = \frac{28,98 \cdot 10^{-4}}{2500} = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Далее по формуле (2.7) вычислим значения  $x_1$  и  $x_2$ :

$$x_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{0,7}{1,16} = 0,60; \quad x_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{4}{1,16} = 3,45$$

и по табл. 2 (см. приложение) находим значения  $z_1$  и  $z_2$ :

$$z_1 = f(x_1); \quad z_1 = 0,0328; \quad z_2 = f(x_2) = 0,9199.$$

По формуле (2.9) определим долю излучения ЧТ в заданном интервале длин волн:

$$\frac{\Delta M_{e,\Delta\lambda}^0(T)}{M_e^0(T)} = (z_2 - z_1) = (0,9199 - 0,0328) = 0,8871 = 88,71\%.$$

Для определения энергетической светимости ЧТ и энергетической светимости этого ЧТ в заданном спектральном интервале воспользуемся формулами (2.1) и (2.9):

$$M^0_e(T) = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2500 = 2214843,75 \frac{Вт}{м^2};$$

$$\Delta M^0_{e,\Delta\lambda}(T) = (z_2 - z_1) \cdot \sigma \cdot T^4 = (0,9199 - 0,0328) \cdot 2214843,75 \approx 1964787,9 \frac{Вт}{м^2}$$

По формуле следствия из закона Ламберта (2.10) определим энергетическую яркость ЧТ в заданном интервале длин волн:

$$\Delta L^0_{e,\Delta\lambda} = \frac{\Delta M^0_{e,\Delta\lambda}(T)}{\pi} = \frac{1964787,89}{3,14} = 625728,63 \frac{Вт}{м^2 \cdot ср}$$

По формулам (1.3) и (1.5) определим силу излучения ЧТ в заданном интервале длин волн:

$$\Delta I^0_{e,\Delta\lambda} = \frac{\Delta M^0_{e,\Delta\lambda}(T)}{\pi} \cdot A_{ЧТ} = \frac{1964787,8 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 4} = 12,3 \frac{Вт}{ср}$$

Поток излучения в заданном интервале длин волн, падающий на приемник, согласно формулам (1.20) и (2.10) определится как:

$$\Delta \Phi_{e,\Delta\lambda} = \Delta L^0_{e,\Delta\lambda} \frac{A_{ЧТ} \cdot A_{ПОИ} \cos \beta_1 \cos \beta_2}{l^2}.$$

В данной задаче  $\cos \beta_1 = \cos \beta_2 = 1$ , поскольку плоскости ЧТ и фоточувствительного элемента ПОИ параллельны, тогда поток излучения будет равен:

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{e,\Delta\lambda} &= \Delta L^0_{e,\Delta\lambda} \cdot \frac{A_{ЧТ} \cdot A_{ПОИ}}{l^2} = 625728,63 \cdot \frac{3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 0,5^2} = \\ &= 1,228 \cdot 10^{-5} Вт \end{aligned}$$

$$\text{Ответ: } \frac{\Delta M^0_{e,\Delta\lambda}(T)}{M^0_e(T)} = 88,71\%; \quad \Delta M^0_{e,\Delta\lambda}(T) = 1964787,89 \frac{Вт}{м^2};$$

$$L^0_{e,\Delta\lambda} = 625728,63 \frac{Вт}{м^2 \cdot ср}; \quad I^0_{e,\Delta\lambda} = 12,3 \frac{Вт}{ср}; \quad \Delta \Phi_{e,\Delta\lambda} = 12 \text{ мкВт}.$$

Задача 2.2.5

Определить облучённость ПОИ диаметром  $d_{\text{пои}}$  от источника типа серое тело с температурой  $T$ , диаметром  $d_{\text{ист}}$  и коэффициент теплового излучения  $\varepsilon$ . Расстояние от источника до ПОИ -  $l$ , (см. рисунок 2.2.1).

- Указания: 1) считать источник подчиняющимся закону Ламберта,  
2) плоскости источника и ПОИ параллельны.

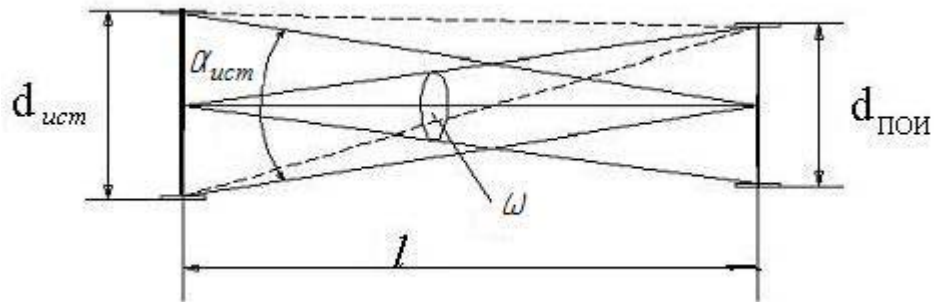


Рисунок 2.2.1

Дано:  $d_{\text{пои}}$ ,  $T$ ,  $d_{\text{ист}}$ ,  $\varepsilon$ ,  $l$ .

Определить:  $E_{\text{епои}}$ .

Решение:

- 1) Определяем яркость источника по формулам (2.1), (2.3) и (2.10):

$$M_e = L_e \cdot \pi,$$

$$L_e = \frac{M_e^0 \cdot \varepsilon}{\pi} = \frac{\sigma \cdot T^4 \cdot \varepsilon}{\pi}.$$

- 4) Определяем поток излучения на ПОИ по формуле (1.20), руководствуясь указанием 2:

$$\Phi_{\text{е.пои}} = L_e \cdot A_{\text{ист}} \cdot \frac{A_{\text{пои}}}{l^2} = \frac{\sigma \cdot T^4 \cdot \varepsilon \pi \cdot d_{\text{ист}}^2}{\pi} \frac{\pi \cdot d_{\text{пои}}^2}{4 \cdot l^2} = \sigma \cdot T^4 \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ист}}^2 \cdot d_{\text{пои}}^2}{16 \cdot l^2}$$

- 3) Определяем облучённость в плоскости ПОИ от источника:

$$E_{e.пои} = \frac{\Phi_{e.пои}}{A_{пои}} = L_e \cdot \frac{A_{ист}}{l^2} = \frac{\sigma \cdot T^4 \cdot \varepsilon \pi \cdot d_{ист}^2}{\pi \cdot 4l^2} = \sigma \cdot T^4 \cdot \varepsilon \cdot \frac{d_{ист}^2}{4l^2};$$

Или:

$$E_{e.пои} = L_e \cdot \frac{d_{ист}^2}{4l^2} = L_e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \alpha^2,$$

где:  $\alpha = \frac{d_{ист}}{l}$  - угловой размер источника.

4) Если выразить облучённость через энергетическую светимость  $M_e^0$ , то получим:

$$E_{e.пои} = \frac{\sigma \cdot T^4 \cdot \varepsilon}{\pi} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \alpha^2 = \frac{\varepsilon \cdot M_e^0}{4} \cdot \alpha^2.$$

Ответ:

облучённость ПОИ от серого тела определяется, как:

$$E_{e.ппо} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot d_{ист}^2}{4l^2} = L_e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \alpha^2 = \frac{\varepsilon \cdot M_e^0}{4} \cdot \alpha^2.$$

### Задача 2.2.6

Определить облучённость Земли от Солнца. Диаметр Солнца **1390600 км**, температура поверхности Солнца  $T_C = 5800\text{ K}$ .

Расстояние от Солнца до Земли  $l = 1,5 \cdot 10^8\text{ км}$ .

Дано:  $d_C = 1390600\text{ км}$ ,  $T_C = 5800\text{ K}$ ,  $l = 1,5 \cdot 10^8\text{ км}$ .

Определить:  $E_{e,3}$

Решение:

Солнце является источником, подчиняющимся закону Ламберта.

1) Определяем энергетическую яркость Солнца по формулам (2.1), (2.10):

$$L_{e,C} = \frac{M_{e,C}}{\pi} = \frac{\sigma \cdot T_C^4}{\pi}.$$

2) Облучённость Земли от Солнца определится по формуле (1.19):

$$E_{e,3} = \frac{\sigma \cdot T_C^4}{4} \cdot \alpha_C^2, \text{ где } \alpha - \text{угловой размер Солнца}$$

3) Угловой размер Солнца:

$$\alpha = \frac{d_C}{l}.$$

4) Тогда облучённость Земли от Солнца:

$$E_{e,3} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5,8^4 \cdot 10^{12}}{4} \cdot \left( \frac{1390600}{1,5 \cdot 10^8} \right)^2 = 1379 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ:

Облучённость Земли от Солнца  $E_{e,3} \approx 1,4 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ .

### Задача 2.2.7

Определить для ЧТ площадью  $1/600000 \text{ м}^2$  и температурой  $T = 2042 \text{ К}$  :

- 1) энергетическую светимость, энергетическую яркость, силу излучения,
- 2) светимость, яркость, силу света.
- 3) поток излучения от этого ЧТ, падающий на ПОИ с диаметром ФЧЭ  $1 \text{ см}$ , находящийся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от ЧТ.

Дано:  $A_1 = 1/600000 \text{ м}^2$ ,  $T = 2042 \text{ К}$ ,  $d = 1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$ ,  $l = 1 \text{ м}$ .

Определить: 1)  $M_e^0(T)$ ,  $L_e^0$ ,  $I_e^0$ ;

2)  $M_v^0(T)$ ,  $L_v^0$ ,  $I_v^0$ ;

3)  $\Phi_e$ .

Решение:

1) По закону Стефана-Больцмана (2.1) определим энергетическую светимость ЧТ:

$$M_e^0(2042) = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} (2042)^4 = 985839 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Из следствия закона Ламберта (2.10) получим энергетическую яркость ЧТ:

$$L_e^0 = \frac{M_e^0}{\pi} = \frac{985839}{3,14} = 3,14 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

По формуле (1.3) найдем силу излучения ЧТ:

$$I_e^0 = L_e^0 \cdot A_1 = 3,14 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{600000} = 0,523 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}.$$



2) По табл. 3 находим  $k_z = 2,79 \cdot 10^{-3}$  и по формуле (1.11)

определим светимость, яркость и силу света:

$$M_v^0 = M_e^0 K_{max} k_z = 985839 \cdot 683 \cdot 2,79 \cdot 10^{-3} = 1,9 \cdot 10^6 \frac{\text{лм}}{\text{м}^2};$$

$$L_v^0 = L_e^0 K_{max} k_z = 3,14 \cdot 10^5 \cdot 683 \cdot 2,79 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^5 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2};$$

$$I_v^0 = I_e^0 K_{max} k_z = 0,523 \cdot 683 \cdot 2,79 \cdot 10^{-3} = 1 \text{ кд}.$$

3) По формуле (1.20) определим поток излучения от ЧТ, падающий на ПОИ:

$$\Phi_e = \frac{L_e^0 \cdot A_1 \cdot A_2}{l^2} = 3,14 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{600000} \frac{3,14 \cdot (10^{-2})^2}{4 \cdot 1} = 4,11 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}.$$

Ответ:

1) энергетическая светимость  $M_e^0 = 0,98 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}$ , энергетическая

яркость  $L_e^0 = 0,314 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \text{ ср}}$  и сила излучения  $I_e^0 = 0,523 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$ ;

2) светимость  $M_v^0 = 1,9 \cdot 10^6 \frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$ , яркость  $L_v^0 = 6 \cdot 10^5 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ , сила света  $I_v^0 = 1 \text{ кд}$ ;

3) поток излучения от ЧТ, падающий на ПОИ  $\Phi_e = 41,1 \text{ мкВт}$ .

Комментарий к ответу: ЧТ площадью  $1/600000 \text{ м}^2$  и температурой  $T = 2042 \text{ К}$  является эталоном  $1 \text{ кд}$ .

### Задача 2.2.8

Коэффициент отражения солнечного излучения Луной  $\rho_L = 0,07$ ,  
угловой размер Луны со стороны Земли -  $8/1000 \text{ рад}$ . Температура Луны  
-  $400 \text{ K}$ . Облучённость Луны Солнцем  $1400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Определить: 1) облучённость Земли от Луны, облучённой Солнцем;  
2) облучённость Земли от собственного излучения Луны.

Указание. Луна излучает и рассеивает излучение по закону Ламберта.

Дано:  $\rho_L = 0,07$ ;  $\alpha_L = 8 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ ;  $T_L = 400 \text{ K}$ ;  $E_{L-C} = 1400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Определить: 1)  $E_{e,3-L-C}$ ; 2)  $E_{e,3-L}$ .

Решение:

1) Определяем энергетическую светимость Луны, облучённой Солнцем по формуле (1.17):

$$M_{e,L-C} = E_{L-C} \cdot \rho_L = 1400 \cdot 0,07 = 98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

2) Определяем облучённость Земли от Луны, освещённой Солнцем,  
по формулам (1.19), (2.10):

$$E_{e,3-L-C} = \frac{M_{e,L-C}}{4} \cdot \alpha_L^2 = \frac{98}{4} \cdot (0,008)^2 = 1,568 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

3) Определяем облучённость Земли от собственного излучения Луны, воспользовавшись формулой (2.1):

$$E_{e,3-L} = \frac{\sigma \cdot T_L^4}{4} \cdot \alpha_L^2 = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (400)^4 \cdot (0,008)^2}{4} = 23 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ: 1) облучённость Земли от Луны, облучённой Солнцем,

$$E_{e,3-L-C} = 1,57 \frac{\text{мВт}}{\text{м}^2};$$

2) облучённость Земли от собственного излучения Луны

$$E_{e,3-L} = 23 \frac{\text{мВт}}{\text{м}^2}.$$

### Задача 2.2.9

Для ЧТ с температурой  $T = 2100 \text{ K}$  и площадью  $A = 10 \text{ см}^2$  рассчитать: 1) светимость и яркость; 2) поток излучения, испускаемый в телесном угле  $\pi$  стерadian в спектральном интервале от  $0,6$  до  $0,9 \text{ мкм}$ .

Дано:  $T = 2100 \text{ K}$ ;  $A = 10 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $\lambda_1 = 0,6 \text{ мкм}$   $\lambda_2 = 0,9 \text{ мкм}$ .

Определить: 1)  $M_v^0$ ,  $L_v^0$ ; 2)  $\Phi_e(\Delta\lambda)$ .

Решение:

1) По формуле (2.1) определим:

$$M_e^0(T) = \sigma \cdot T^4 = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 2100^4 = 1.1 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

Далее по формуле (2.10) определим:

$$L_e^0 = \frac{M_e^0}{\pi} = \frac{1.1 \cdot 10^6}{3.14} = 3.51 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}};$$

По формуле (1.11) найдем светимость и яркость ЧТ, предварительно по табл. 3 определив  $k_z = 3,63 \cdot 10^{-3}$ :

$$M_v^0 = M_e^0 K_{\max} k_z = 1,1 \cdot 10^6 \cdot 683 \cdot 3,63 \cdot 10^{-3} = 2,73 \cdot 10^6 \frac{\text{лм}}{\text{м}^2};$$

$$L_v^0 = L_e^0 K_{\max} k_z = 3,51 \cdot 10^5 \cdot 683 \cdot 3,63 \cdot 10^{-3} = 8,67 \cdot 10^5 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}.$$

2) По формулам (2.4) и (2.7) определим:

$$\lambda_{\max} = \frac{C_\lambda}{T} = \frac{28,98 \cdot 10^{-4}}{2100} = 1,38 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$x_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{\max}} = \frac{0,6}{1,38} = 0,44 \text{ и } x_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{\max}} = \frac{0,9}{1,38} = 0,66.$$

Затем по табл. 5 найдем:  $z_1 = 0,366 \cdot 10^{-2}$ ,  $z_2 = 5,42 \cdot 10^{-2}$ .

По формуле (2.14) определим:

$$M_{e,\Delta\lambda}^0(T) = (z_2 - z_1) M_e^0(T) = (5,42 - 0,036) \cdot 10^{-2} \cdot 1.1 \cdot 10^6 = 5,59 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

По формуле (1.4) найдем:

$$\Phi_{e,\Delta\lambda} = L_{e,\Delta\lambda}^0(T) \cdot \pi \cdot A = \frac{M_{e,\Delta\lambda}^0(T)}{\pi} \cdot \pi \cdot A = 5,59 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4} = 5,59 \text{ Вт}$$

Ответ: 1)  $M_v^0 = 2,73 \cdot 10^6 \frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$ ;  $L_v^0 = 8,67 \cdot 10^5 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ ; 2)  $\Phi_{e,\Delta\lambda} = 5,59 \text{ Вт}$ .

## 2.3. ЗАДАЧИ

- 2.3.1. Отопительная батарея имеет площадь  $0,8 \text{ м}^2$  и температуру  $100^\circ \text{C}$ . Найти теплоотдачу батареи излучением, если температура окружающей среды равна  $300 \text{ K}$ .  
Указание: батарею и среду считать ЧТ.
- 2.3.2. 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  $2,5 \text{ мкм}$ .
- 2.3.3. 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  $2 \text{ мкм}$ .
- 2.3.4. 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 источником излучения типа ЧТ.
- 2.3.5. Построить изотермы ЧТ при температуре  $2900 \text{ K}$  в диапазоне от  $0,4$  до  $3 \text{ мкм}$  с шагом  $0,2 \text{ мкм}$ .
- 2.3.6. Построить изотермы ЧТ при температуре  $5800 \text{ K}$  в диапазоне от  $0,2$  до  $1,6 \text{ мкм}$  с шагом  $0,2 \text{ мкм}$ .
- 2.3.7. Построить изотермы ЧТ при температуре  $300 \text{ K}$  в диапазоне от  $5$  до  $20 \text{ мкм}$  с шагом  $1 \text{ мкм}$ .
- 2.3.8. 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  $6 \text{ мкм}$ .
- 2.3.9. 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 мкм**.
- 2.3.10. ЧТ имеет температуру **1273 К** и площадь излучающей поверхности **1 см<sup>2</sup>**. Определить: 1) долю излучения ЧТ, приходящуюся на интервал от **1** до **5 мкм**; 2) поток излучения, падающий на ПОИ с площадью ФЧЭ **1 см<sup>2</sup>** в заданном спектральном интервале, если ПОИ находится на расстоянии **10 м** от ЧТ.
- 2.3.11. Определить энергетическую светимость ЧТ площадью **1 см<sup>2</sup>** в спектральном диапазоне от **0,4** до **1 мкм** и поток излучения, падающий на ПОИ с диаметром ФЧЭ **0,8 см**, находящийся на расстоянии **10 м** от ЧТ, в названном интервале спектра, если температура ЧТ равна: 1) **3000 К**; 2) **3500 К**.
- 2.3.12. ЧТ имеет температуру **2500 К** и диаметр **0,5 см**. Определить: 1) долю излучения ЧТ в интервале от **0,7** до **4 мкм**; 2) энергетическую светимость, энергетическую яркость и силу излучения в заданном интервале спектра; поток излучения, падающий на ПОИ с размером ФЧЭ **5×5 мм** в заданном спектральном интервале, находящийся от ЧТ на расстоянии **0,5 м**.
- 2.3.13. Найти поток излучения ЧТ диаметром **10 мм** с температурой **2600 К** в диапазоне от **0,4** до **5 мкм**, падающий на ПОИ с диаметром ФЧЭ **5 мм**, находящийся на расстоянии **1 м** от ЧТ.
- 2.3.14. Определить поток излучения, падающий на фоторезистор с диаметром ФЧЭ **2 мм** от серого тела диаметром **25 мм** с коэффициентом теплового излучения **0,8** и температурой **2000 К**, находящегося на расстоянии **10 м**, в спектральном диапазоне от **1** до **5 мкм**.
- 2.3.15. Для ЧТ площадью **10 см<sup>2</sup>** при температуре **2200 К** рассчитать: 1) энергетическую яркость ЧТ; 2) поток излучения, падающий на

ПОИ с площадью ФЧЭ  $0,5 \text{ см}^2$ , находящийся на расстоянии  $10 \text{ м}$  от ЧТ в диапазоне спектра от  $0,8$  до  $1 \text{ мкм}$ .

2.3.16. Для ЧТ с температурой  $2300 \text{ К}$  и площадью  $10 \text{ см}^2$  рассчитать:  
1) силу излучения и силу света по нормали к излучающей поверхности; 2) поток излучения, испускаемый в телесном угле  $\pi \text{ ср}$  в спектральном интервале от  $0,7$  до  $1,1 \text{ мкм}$ .

2.3.17. Для ЧТ с температурой  $2400 \text{ К}$  и площадью  $1 \text{ см}^2$  рассчитать:  
1) световой поток, падающий на ПОИ с диаметром ФЧЭ  $1 \text{ см}$ , если расстояние от ЧТ до ПОИ равно  $10 \text{ м}$ ; 2) поток излучения в интервале от  $0,6$  до  $0,9 \text{ мкм}$ , падающий на ПОИ от источника излучения типа ЧТ.

2.3.18. Найти световой поток и освещённость, создаваемую этим потоком на плоскости площадью  $3 \text{ мм}^2$ , находящейся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от ЧТ площадью  $1 \text{ мм}^2$  с температурой  $2856 \text{ К}$ . Поверхность излучателя параллельна освещаемой поверхности, которая перпендикулярна падающему излучению.

2.3.19. Найти световой поток и освещённость, создаваемую этим потоком на плоскости, находящейся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от ЧТ площадью  $1 \text{ мм}^2$  с температурой  $2856 \text{ К}$ . Излучающая поверхность ЧТ проектируется на плоскость объективом, имеющим диаметр  $50 \text{ мм}$  и коэффициент пропускания  $1$  и расположенным на расстоянии  $150 \text{ мм}$  от плоскости.

Указание: см. теорию в разделе 1.1

2.3.20. Найти световой поток и освещённость, создаваемую этим потоком на плоскости, находящейся на расстоянии  $1 \text{ м}$  от ЧТ с температурой  $2856 \text{ К}$ . Площадь излучающей поверхности ЧТ равна  $1 \text{ мм}^2$ . Излучающая поверхность ЧТ располагается в фокальной плоскости объектива с диаметром  $60 \text{ мм}$  и фокусным расстоянием  $200 \text{ мм}$ , а освещаемая плоскость - в фокальной

плоскости объектива с диаметром **50 мм** и фокусным расстоянием **150 мм**. Коэффициенты пропускания объективов равны **1**.

Указание: см. теорию в разделе 1.1

- 2.3.21. ЧТ имеет температуру **2898 К**. Найти длину волны и частоту для максимумов СПЭС в этих спектральных координатах, а также соответствующие им частоту и длину волны.
- 2.3.22. Определить энергетическую светимость ЧТ при температуре **2898 К** в интервале частот **1 Гц**: 1) в области длины волны, соответствующей максимуму СПЭС в спектре длин волн; 2) в области длины волны, соответствующей максимуму СПЭС в спектре частот.
- 2.3.23. Радиационная температура серого тела равна **1000°С**. Определить методическую погрешность измерения, если коэффициент теплового излучения тела равен **0,9**.
- 2.3.24. Определить коэффициент теплового излучения нити накала в электрической лампе накаливания, если яркостная температура нити, измеренная на длине волны **0,655 мкм**, равна **2950 К**.
- 2.3.25. Определить истинную температуру нити накала в электрической лампе накаливания, если яркостная температура нити, измеренная на длине волны **0,655 мкм**, равна **2950 К**, а коэффициент теплового излучения нити при этих параметрах составляет **0,31**.  
Указание: считать коэффициенты теплового излучения нити при истинной и яркостной температурах примерно равными.

### 3. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ. ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

#### 3.1 Теоретические положения

*Эффективный коэффициент теплового излучения полой сферы с отверстием:*

$$\varepsilon' = \frac{(1 - \rho)}{(1 - \rho \cdot m)}, \quad (3.1)$$

*где  $\rho$  - коэффициент отражения стенок полости;*

$$m = \frac{A}{A_{\text{сф}}}, \quad (3.2)$$

*где  $A$  - площадь поверхности полости, исключая отверстие;  $A_{\text{сф}}$  - площадь поверхности сферы, включая отверстие.*

*Средний коэффициент пропускания атмосферы в  $i$ -м спектральном интервале, обусловленный поглощением водяных паров, по Эльдеру-Стронгу [9]:*

$$\tau_{\text{ср.}i} = t_{0,i} - k_{1,i} \lg \omega, \% , \quad (3.3)$$

*где:  $t_{0,i}$  ,  $k_{1,i}$  - коэффициенты для  $i$ -го спектрального интервала, % (см. табл. 6);  $\omega$  - водность, мм;  $\omega = 10^4 a f_* l$ ,  $a$  - предельная абсолютная влажность воздуха при данной температуре, г/см<sup>3</sup> (см. табл. 7);  $f_*$  - относительная влажность воздуха, %;  $l$  - длина трассы, км.*

*Интегральный коэффициент пропускания атмосферы для излучения данного источника за счет поглощения водяных паров:*

$$\tau_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n m_{\text{е.л.ср.}i} \tau_{\text{ср.}i} \Delta \lambda_i}{\sum_{i=1}^n m_{\text{е.л.ср.}i} \Delta \lambda_i}, \quad (3.3)$$

*где:  $m_{\text{е.л.ср.}i}$  - средняя относительная СПЭС источника в  $i$ -м спектральном интервале;  $\Delta \lambda_i$  - ширина  $i$ -го спектрального интервала;  $n$  - количество спектральных интервалов.*



### 3.2 Примеры решения задач

#### Задача 3.2.1

Рассчитать спектральный коэффициент пропускания атмосферы на уровне моря по методу Эльдера-Стронга для длины волны **0,9 мкм** при температуре воздуха  $t = 20^{\circ}C$ , относительной влажности  $f_B = 70\%$  и длине трассы  $l = 1 \text{ км}$ .

Дано:  $\lambda = 0,9 \text{ мкм}$ ,  $f_B = 70\%$ ,  $t = 20^{\circ}C$ ,  $l = 1 \text{ км}$ .

Определить:  $\tau$ .

Решение:

По табл. 6 для условий задачи найдем: -  $k_{l,i} = 15,1 \%$ ,  $t_0 = 106,3 \%$  и по табл. 7 найдем  $a = 17,32 \cdot 10^{-6} \frac{\text{с}^2}{\text{см}^3}$ .

По формуле (3.3) определяем:  $\tau_{cp,i} = t_{o,i} - k_{l,i} \lg \omega$ ,

где  $\omega = 10^4 \cdot a \cdot f_B \cdot l = 10^4 \cdot 17,32 \cdot 10^{-6} \cdot 70 \cdot 1 = 12,124 \text{ мм}$ .

Тогда:

$$\tau = 106,3 - 15,1 \cdot \lg 12,124 = 106,3 - 15,1 \cdot 1,08 = 106,3 - 16,3 = 90 \%$$

Ответ: спектральный коэффициент пропускания атмосферы на уровне моря  $\tau = 90 \%$ .

### Задача 3.2.2

Луна облучается импульсным лазером (рис. 3.2.1). Сравнить отражённый поток излучения от поверхности Луны и от уголкового отражателя, доставленного на неё. Диаметр пучка лазера **10 мм**, угол расходимости излучения **20′** (угл. мин.). Мощность в импульсе **10<sup>9</sup> Вт**. Излучение лазера коллимируется телескопом **D<sub>л</sub> = 250 см**.

Характеристики отражателя: коэффициент отражения -  **$\rho_L = 0,07$** , диаметр - **D<sub>отр.</sub> = 50 см**, угол поля зрения -  **$\alpha_{отр} = 4''$** , расстояние от Луны до Земли -  **$l_{Л-З} = 400000$  км**. Потерями в атмосфере и в телескопе пренебречь. Считать, что Луна отражает излучение по закону Ламберта.

Рассчитать: 1) отражённый поток, падающий на телескоп, от пятна Луны, освещённого лазером.

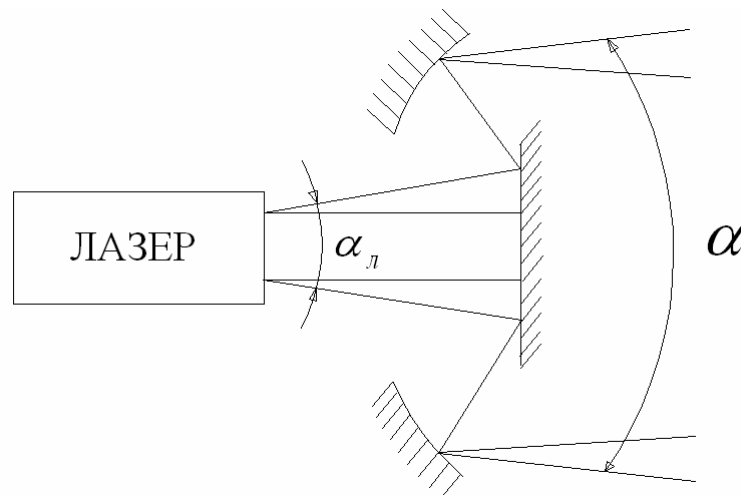


Рисунок 3.2.1

Дано:  $d_L = 10 \text{ мм} = 10^{-2} \text{ м}$ ,  $\alpha_L = 20' = 5,83 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ ,  $\rho_L = 0,07$ ,  
 $\alpha_{отр} = 4''$ ,  $D_T = 250 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$ ,  $D_{отр.} = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$ ,  $\Phi_{e..Л} = 10^9 \text{ Вт}$ ,  
 $l = 400000 \text{ км} = 4 \cdot 10^8 \text{ м}$ .

Определить:  $\Phi_{e..тел.}$

Решение:

1) Облучённость Луны определяется по формуле (1.2):  $E_{e..Л} = \frac{\Phi_{e..Л}}{A_{Л-Т}}$ ,

где  $A_{л-Т} = \frac{\pi \cdot D_{л-Т}^2}{4}$  - площадь облучаемой лазером поверхности Луны

диаметром:  $D_{л-Т} = l \cdot \alpha_{л} \cdot \frac{d_{л}}{D_{Т}}$ .

$$\begin{aligned} \text{Тогда: } E_{е.л} &= \frac{\Phi_{е.л}}{A_{л-Т}} = \frac{4 \cdot \Phi_{е.л}}{\pi \cdot D_{л-Т}^2} = \frac{4 \cdot \Phi_{е.л}}{\pi \cdot (l \cdot \alpha_{л} \cdot \frac{d_{л}}{D_{Т}})^2} = \\ &= \frac{4 \cdot 10^9}{3,14 \cdot \left( 4 \cdot 10^8 \cdot 5,83 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{10^{-2}}{0,25} \right)^2} = 14,6 \frac{Вт}{м^2}. \end{aligned}$$

2) Энергетическая светимость пятна на Луне, облучённого лазером, определим по формуле (1.17):

$$M_{е,л-л} = E_{е.л} \cdot \rho_{л} = 14,6 \cdot 0,07 \approx 1 \frac{Вт}{м^2}.$$

3) Энергетическую яркость пятна Луны определим по формуле (2.10):

$$L_{е,л-л} = \frac{M_{е,л-л}}{\pi} = \frac{1}{3,14} = 0,314 \frac{Вт}{м^2 \cdot ср}.$$

4) Облучённость в плоскости телескопа от Луны, облучённой лазером, найдем по формулам (1.2) и (1.20):

$$\begin{aligned} E_{е.Т} &= \frac{L_{е,л-л} \cdot A_{л-л}}{l^2} = \frac{L_{е,л-л} \cdot \pi \cdot D_{л-Т}^2}{4 \cdot l^2} = \frac{L_{е,л-л} \cdot \pi \cdot \alpha_{л}^2 \cdot d_{л}^2}{4 D_{Т}^2} = \\ &= \frac{0,314 \cdot 3,14 \cdot (5,83 \cdot 10^{-4})^2 \cdot (10^{-2})^2}{4 \cdot (0,25)^2} = 1,36 \cdot 10^{-10} \frac{Вт}{м^2} \end{aligned}$$

5) Поток излучения, попадающий на телескоп от Луны, освещённой лазером, определяем по формуле (1.2):

$$\Phi_{е.тел} = E_{е.Т} \cdot A_{Т} = E_{е.Т} \cdot \frac{\pi \cdot D_{тел}^2}{4} = 1,36 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{3,14 \cdot 2,5^2}{4} = 6,68 \cdot 10^{-10} Вт$$

Ответ: Поток излучения, попадающий на телескоп от Луны, освещённой лазером, равен  $\Phi_{е.тел} = 6,68 \cdot 10^{-4} мкВт$ .

### Задача 3.2.3

Температура поверхности Солнца равна **5800 К**. 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.

Указания: 1. Считать Луну источником Ламберта.

2. Расчет провести на границе земной атмосферы.

Дано:  $T_c = 5800 \text{ К}$ ,  $\alpha_c = 32' = 0,0093 \text{ рад}$ ,  $\alpha_l = 32' = 0,0093 \text{ рад}$ .

Определить:  $E_{e.3-l-c}$ .

Решение:

1). По формуле (1.19) определим облученность Луны, создаваемую Солнцем:

$$E_{e.l-c} = \frac{M_{e.c} \cdot \alpha_c^2}{4},$$

где энергетическая светимость Солнца  $M_{e.c}$  может быть получена из закона Стефана - Больцмана (2.2):

$$M_{e.c} = \sigma \cdot T_c^4.$$

Тогда:

$$E_{e.l-c} = \frac{\sigma \cdot T_c^4 \cdot \alpha_c^2}{4} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5800^4 \cdot 0,0093^2}{4} = 1387 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

2). Создаваемая отраженным от Луны солнечным излучением облученность Земли определяется аналогично п.1 по формуле (1.19):

$$E_{e.3-Л-С} = \frac{M_{e.Л} \cdot \alpha_{Л}^2}{4},$$

где энергетическая светимость Луны может быть получена по формуле (1.17):

$$M_{e.Л} = \rho \cdot E_{e.Л-С}.$$

3). Подставив значение облученности Луны от Солнца в выражение для облученности Земли, получим:

$$E_{e.3-Л-С} = \rho \cdot E_{e.Л-С} \cdot \frac{\alpha_{Л}^2}{4} = 0.07 \cdot 1387 \cdot \frac{0.0093^2}{4} = 0.002 \frac{Вт}{м^2}.$$

Ответ: облучённость Земли отражённым от Луны солнечным излучением на границе земной атмосферы равна  $E_{e.3-Л-С} = 0.002 \frac{Вт}{м^2}$ .

***Полезная информация:***

Перевод значения величины угла  
из градусов в радианы:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot \alpha^{\circ}}{180^{\circ}} = \alpha \text{ рад}$$

Для запоминания можно  
воспользоваться приближенным

$$1' = 0,0003 \text{ рад}$$

переводом угловых минут и секунд в  
радианы:

$$1'' = 0,000005 \text{ рад}$$

### 3.3 ЗАДАЧИ

3.2.1. Модель ЧТ в виде поллой сферы с отверстием имеет коэффициент отражения внутренней поверхности  $0,3$ , коэффициент теплового излучения стенок  $0,7$  и отношение площади отверстия к полной поверхности сферы, включая отверстие,  $0,1$ . Найти эффективный коэффициент теплового излучения модели.

3.2.2. В космическом пространстве находится полый спутник. Температура любой его точки одинакова. Найти температуру спутника, если температура Солнца равна  $5800\text{ K}$ , а его угловой размер со стороны спутника составляет  $9\text{ мрад}$ , коэффициент теплового излучения спутника со стороны, обращенной к Солнцу, равен коэффициенту поглощения и составляет  $0,2$ , а с противоположной -  $0,5$ .

Указания: 1) внутренними источниками тепла в спутнике пренебречь, 2) в установившемся режиме поглощённый поток равен излучённому.

3.2.3. Отопительная батарея имеет площадь  $1\text{ м}^2$ , температуру  $180^\circ\text{C}$  и коэффициент теплового излучения  $0,8$ .

Определить: 1) теплоотдачу батареи излучением, если температура окружающей среды равна  $300\text{ K}$ , а коэффициент теплового излучения среды составляет  $0,2$ ; 2) теплоотдачу батареи излучением в диапазоне спектра от  $5$  до  $7\text{ мкм}$ ; 3) изотерму батареи в диапазоне от  $1$  до  $20\text{ мкм}$  с шагом  $2\text{ мкм}$ .

3.2.4. Построить спектральное распределение энергетической светимости вольфрамовой нити лампы накаливания, считая её реальным излучателем, в интервале длин волн от  $0,4$  до  $1,2\text{ мкм}$  с шагом  $0,1\text{ мкм}$ , если яркостная температура нити накала равна  $2950\text{ K}$ .

Указание: считать коэффициенты теплового излучения нити при истинной и яркостной температурах примерно равными.

- 3.2.5. Найти СПЭЯ Солнца (как ЧТ с температурой **5800 K** ) на длинах волн **0,5** и **1 мкм**.
- 3.2.6. Температура поверхности Солнца равна **5800 K**. Угловой размер Солнца при наблюдении с Земли составляет **32'**. Определить облучённость, создаваемую Солнцем на границе земной атмосферы.
- 3.2.7. Температура Луны равна **400 K**. Угловой размер Луны в полнолуние при наблюдении с Земли равен **32'**. Определить облучённость, создаваемую собственным излучением Луны на границе земной атмосферы.
- 3.2.8. Рассчитать интегральный коэффициент пропускания, обусловленный поглощением паров воды для лампы накаливания (как ЧТ) с температурой **2898 K** при температуре воздуха **30°С**, относительной влажности **90 %** и длине трассы **2 км**, принимая, что стекло лампы пропускает излучение в интервале от **0,3** до **2,7 мкм**.

## 4. ПРИЁМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 4.1. Теоретические положения

*Коэффициент использования излучения источника приёмником оптического излучения [1,5,9]:*

$$K = \frac{\int_0^{\infty} \varphi_{e.\lambda}(\lambda) S_{отн}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e.\lambda}(\lambda) d\lambda}, \quad (4.1)$$

где  $\varphi_{e.\lambda}(\lambda)$  - относительное спектральное распределение потока излучения источника;  $S_{отн}(\lambda)$  - относительная спектральная характеристика чувствительности ПОИ.

*Связь интегральной чувствительности ПОИ к потоку излучения со спектральной [1,5,9]:*

$$S_{инт\Phi_e} = S_{\lambda.\Phi_e.max} K, \quad (4.2)$$

где  $S_{\lambda.\Phi_e.max}$  - максимальная спектральная чувствительность ПОИ к потоку излучения.

*Максимальная спектральная чувствительность кремниевых ФЭПП к потоку излучения:*

$$S_{\lambda.\Phi_e.max} = \frac{\eta_{max} \cdot \lambda_m}{1,234} \cdot \frac{A}{Вт}, \quad (4.3)$$

где  $\eta_{max}$  - квантовая эффективность на длине волны  $\lambda_m$  (см. табл. 1[13]);  $\lambda_m$  - длина волны, на которой спектральная чувствительность ПОИ максимальна, мкм.

*Относительная спектральная чувствительность ПОИ [1,5,9]:*

$$S_{\lambda.отн} = \frac{S_{\lambda.абс}}{S_{\lambda.max}}, \quad (4.4)$$

где  $S_{\lambda.абс}$  - абсолютная спектральная чувствительность ПОИ;  $S_{\lambda.max}$  - относительная спектральная чувствительность ПОИ.



Порог чувствительности ПОИ в заданной полосе частот [1,5,9]:

$$\Phi_n = \frac{S_{\text{отн}}(\lambda)}{S_{I.\text{инт}}} = \frac{U_{\text{ш}}}{U_{U.\text{инт}}}, \quad (4.5)$$

где  $I_{\text{ш}}$ ,  $U_{\text{ш}}$  - ток и напряжение шума;  $S_{I.\text{инт}}$ ,  $S_{U.\text{инт}}$  - токовая и вольтовая интегральные чувствительности ПОИ.

Удельный порог чувствительности ПОИ [1,5,9]:

$$\Phi_n^* = \Phi_n \sqrt{A \Delta f} = \Phi_{n.1} \sqrt{A}, \quad (4.6)$$

где  $\Phi_{n.1}$  - порог чувствительности ПОИ в единичной полосе частот;  $A$  - площадь ФЧЭ ПОИ;  $\Delta f$  - полоса частот усилительного тракта.

Рекомендуемая полоса частот измерительного тракта при паспортизации ПОИ [6]:

$$\Delta f = 0,2 f_M, \quad (4.7)$$

где  $f_M$  - частота модуляции излучения при паспортизации.

Удельная обнаружительная способность ПОИ [1,5,9]:

$$D^* = \frac{1}{\Phi_n^*}, \quad (4.8)$$

где  $\Phi_n^*$  - удельный порог чувствительности ПОИ.

Пересчёт спектральной чувствительности селективного ПОИ к световому потоку в спектральную чувствительность к потоку излучения:

$$S_{\lambda.\Phi_e} = S_{\lambda.\Phi_v} K_{\text{max}} V(\lambda), \quad (4.9)$$

где  $S_{\lambda.\Phi_e}$ ,  $S_{\lambda.\Phi_v}$  - спектральная чувствительность к потоку излучения и к световому потоку;  $K_{\text{max}}$  - максимальная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения (см. табл. 1);  $V(\lambda)$  - относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения (см. табл. 2).

Пересчёт параметров селективного ПОИ, заданных в световых ФМВ, в параметры в энергетических ФМВ [1,5,9]:

$$S_{\text{инт.}\Phi_e} = S_{\text{инт.}\Phi_v} K_{\text{max}} \kappa_z ; \quad (4.10)$$

$$\Phi_{n.e} = \frac{\Phi_{n.v}}{K_{\text{max}} \kappa_z}, \text{ Bm}, \quad (4.11)$$

где  $S_{\text{инт.}\Phi_e}$ ,  $S_{\text{инт.}\Phi_v}$  - интегральная чувствительность ПОИ к световому потоку и потоку излучения;  $\kappa_z$  - коэффициент использования излучения источника глазом;  $\Phi_{n.e}$ ,  $\Phi_{n.v}$  - пороги чувствительности ПОИ в заданной полосе частот в энергетических и световых ФМВ.

Пересчёт параметров селективного ПОИ, заданных в энергетических ФМВ для излучения одного источника, в параметры в энергетических ФМВ для излучения другого источника [1,5,9]:

$$S''_{\text{инт.}\Phi_e} = \frac{S'_{\text{инт.}\Phi_v} \kappa''}{\kappa'} ; \quad (4.12)$$

$$\Phi''_{n.\Phi_e} = \frac{\Phi'_{n.\Phi_v} \kappa'}{\kappa''}, \quad (4.13)$$

где  $S'_{\text{инт.}\Phi_v}$ ,  $S''_{\text{инт.}\Phi_e}$  - интегральные чувствительности ПОИ к потоку излучения для излучения первого и второго источников;  $\kappa'$ ,  $\kappa''$  - коэффициенты использования ПОИ излучения первого и второго источников;  $\Phi'_{n.\Phi_v}$ ,  $\Phi''_{n.\Phi_e}$  - пороги чувствительности ПОИ в заданной полосе частот в энергетических ФМВ для излучения первого и второго источников.

Порог чувствительности матричного ФПЗС по паспортным данным для реального источника в световых ФМВ при реальном времени накопления [9]:

$$E''_{n.v} = \frac{E'_{n.v.c} \cdot t_{n.c} \cdot \kappa_z'' \cdot \kappa'}{t_n \cdot \kappa_z' \cdot \kappa''}, \text{ лк}; \quad (4.14)$$

где  $E'_{n.v.c}$  - пороговая освещённость ФПЗС паспортным источником в световых ФМВ при стандартном времени накопления;  $t_{n.c}$  - стандартное время накопления;  $t_n$  - реальное время накопления;  $\kappa_z'$ ,  $\kappa_z''$  -

коэффициенты использования излучения первого и второго источников глазом.

Реальное время накопления в ФПЗС при наблюдении движущегося объекта [15]:

$$t_n = \frac{k_{cm} d_{эл} \beta}{V}, \quad (4.15)$$

где  $k_{cm}$  - допустимый "смаз" изображения в долях элемента ФПЗС;  $d_{эл}$  - размер элемента в направлении перемещения объекта;  $\beta$  - линейное увеличение оптической системы телекамеры;  $V$  - скорость перемещения объекта.

Линейное увеличение оптической системы при расстоянии до объекта, большем пятикратного фокусного расстояния [7]:

$$\beta \approx \frac{l}{f'}, \quad (4.16)$$

где  $l$  - расстояние от оптической системы до объекта;  $f'$  - фокусное расстояние оптической системы.

Порог чувствительности ФПЗС при реальных условиях работы [13]:

$$E_{n.v} = \frac{\sigma_{ш} e_e}{t_n S_{I.инт.Ф_v} A_{эл}}, \quad (4.17)$$

где  $\sigma_{ш}$  - СКЗ количества шумовых зарядов на выходе ФПЗС, генерированное одним элементом;  $e_e$  - заряд электрона (см. табл. 1);  $S_{I.инт.Ф_v}$  - интегральная токовая чувствительность ФПЗС к световому потоку;  $A_{эл}$  - площадь элемента ФПЗС.

Дисперсия количества шумовых зарядов на выходе ФПЗС, генерированных одним элементом [13]:

$$\sigma_{ш}^2 = \sigma_{ш.с}^2 + \sigma_{ш.вн}^2, \quad (4.18)$$

где  $\sigma_{ш.с}^2$  - дисперсия шума ФПЗС, обусловленного зарядовым пакетом, генерированным потоком излучения;  $\sigma_{ш.вн}^2$  - дисперсия шума ФПЗС с поверхностным каналом, обусловленного внутренними факторами.

Дисперсия шума ФПЗС, обусловленного зарядовым пакетом, генерированным потоком излучения [9]:

$$\sigma_{ш.с}^2 = \sigma_z^2 + \sigma_n^2, \quad (4.19)$$

где  $\sigma_z^2$  - дисперсия генерационного шума;  $\sigma_n^2$  - дисперсия шума переноса.

Дисперсия генерационного шума ФПЗС при его пуассоновском распределении [9]:

$$\sigma_z^2 = N_s, \quad (4.20)$$

где  $N_s$  - среднее количество зарядов сигнала, генерируемых в одном элементе ФПЗС.

Дисперсия шума переноса ФПЗС [15]:

$$\sigma_n^2 = 2n_n \cdot \xi \cdot N_s, \quad (4.21)$$

где  $n_n$  - среднее количество переносов зарядового пакета в ФПЗС;  $\xi$  - коэффициент неэффективности переноса зарядового пакета в ФПЗС (см. табл. 1).

Среднее количество переносов в ФПЗС с секциями накопления и хранения:

$$n_n = \frac{(N_y + \frac{N_y}{2} + \frac{N_x}{2})}{2} p, \quad (4.22)$$

где  $N_y$  - число строк элементов в секции накопления;  $N_x$  - число столбцов элементов в секциях;  $p$  - количество фаз управляющего напряжения.

Среднее количество зарядов сигнала, генерируемое в одном элементе ФПЗС [9]:

$$N_s = \frac{E_v A_{эл} S_{I_{инт.Фв}} t_n}{e_3}, \quad (4.23)$$

где  $E_v$  - освещённость элемента ФПЗС.

Дисперсия шума ФПЗС с поверхностным каналом, обусловленного внутренними факторами [15]:

$$\sigma_{ш.вн}^2 = \sigma_m^2 + \sigma_{ss}^2 + \sigma_y^2, \quad (4.24)$$

где  $\sigma_m^2$  - дисперсия шума темнового тока;  $\sigma_{ss}^2$  - дисперсия шума поверхностных состояний;  $\sigma_y^2$  - дисперсия шума выходного усилителя ФПЗС, выполненного на одном кристалле с выходным регистром.

Дисперсия шума темнового тока [9]:

$$\sigma_m^2 = \frac{2i_{m.ср} A_{эл} t_n}{e}, \quad (4.25)$$

где  $i_{m.ср}$  - средняя плотность темнового тока ФПЗС.

Дисперсия шума поверхностных состояний [15]:

$$\sigma_{ss}^2 = 2n_n kTA_{эл} N_{ss} \ln 2, \quad (4.26)$$

где:  $k$  - постоянная Больцмана (см. табл. 1);  $T$  - термодинамическая температура ФПЗС;  $N_{ss}$  - плотность поверхностных состояний.

Дисперсия шума выходного усилителя ФПЗС [15]:

$$\sigma_y^2 = \frac{kT_{ср} A_{эл} C}{e^2}, \quad (4.27)$$

где  $C$  - ёмкость выходной цепи усилителя ФПЗС.

Длинноволновая граница спектральной чувствительности ПОИ на внутреннем фотоэффекте [1,5,9]:

$$\lambda_{ср} = \frac{hc}{\Delta E_3}, \quad (4.28)$$

где  $\Delta E_3$  - ширина запрещённой зоны.

Напряжение теплового шума фоторезистора [1,5,9]:

$$U_{ш.т} = \sqrt{4KTR_m \Delta f}, \quad (4.29)$$

где  $T$  - термодинамическая температура фоторезистора;  $R_m$  - темновое сопротивление фоторезистора;  $\Delta f$  - полоса частот усилительного тракта.

Ток теплового шума нагрузочного сопротивления [1,5,9]:

$$I_{ш.т} = 4kTR_n^{-1} \Delta f, \quad (4.30)$$

где  $R_n$  - сопротивление нагрузки.

Ток дробового шума ПОИ [1,5,9]:

$$I_{ш.др} = \sqrt{2e, I_0 \Delta f}, \quad (4.31)$$

где  $I_0$  - ток, протекающий через ПОИ.

Ток дробового шума фотоумножителя [1,5,9]:

$$I_{ш.др} = \sqrt{2e, I_k M^2 (1 + B) \Delta f}, \quad (4.32)$$

где  $B$  - множитель, учитывающий влияние дробового эффекта динодов (см. табл. 1);  $I_k$  - суммарный ток фотокатода;  $M$  - коэффициент усиления по току.

Суммарный ток шума фотоумножителя [1,5,9]:

$$I_{ш} = \sqrt{I_{ш.др}^2 + I_{ш.т}^2}. \quad (4.33)$$

Максимально допустимое сопротивление нагрузки по постоянному току фотоэлемента и фотодиода в фотодиодном режиме [1,5,9]:

$$R_{y.max} = \frac{U_p}{I_m + S_I \Phi_{max}} = \frac{U_p}{I_m + I_{ф. max}}, \quad (4.34)$$

где:  $U_p$  - рабочее напряжение ПОИ;  $I_m$  - темновой ток ПОИ;  $S_I$  - токовая чувствительность;  $\Phi_{max}$  - максимальный поток, падающий на ПОИ;

$I_{ф. max}$  - максимальный фототок.

Максимально допустимое сопротивление нагрузки по переменному току фотодиода в фотодиодном режиме [1]:

$$Z_{н. max} \approx \frac{U_p}{I_m}. \quad (4.35)$$

Максимальная вольтовая чувствительность фотодиода в фотогальваническом режиме [1,5,9]:

$$S_{U.max} \approx \frac{R_0 I_m}{\Phi} \text{ при } I_m < I_\phi ; \quad (4.36)$$

$$S_{U.max} \approx R_0 S_I \text{ при } I_m > I_\phi , \quad (4.37)$$

где  $R_0 = \frac{kT}{e_s \cdot I_m}$  - сопротивление р-п-перехода при нулевом напряжении.

Постоянная времени схемной релаксации ПОИ [1,5,9]:

$$\tau_p = R_{н.мах} C , \quad (4.38)$$

где  $C$  - ёмкость ПОИ.

Связь между вольтовой и токовой чувствительностью ПОИ [1,5,9]:

$$S_U \approx S_I R_n , \quad (4.39)$$

где  $R_n$  - сопротивление нагрузки.

Фототок в ПОИ [1,5,9] :

$$I_\phi \approx S_I \Phi , \quad (4.40)$$

где  $S_I$  - токовая чувствительность ПОИ.

Напряжение фотосигнала ПОИ [1,5,9]:

$$U_c = S_U \Phi , \quad (4.41)$$

где  $S_U$  - вольтовая чувствительность ПОИ.

Коэффициент усиления фотоумножителя по току [1,5,9]:

$$M = \frac{S_{v.a}}{S_{v.k}} = \frac{I_m}{I_{m.k}} , \quad (4.42)$$

где  $S_{v.a}$  - световая анодная чувствительность;  $S_{v.k}$  - световая чувствительность фотокатода;  $I_m$  - темновой ток в цепи анода;  $I_{m.k}$  - темновой ток фотокатода.

Суммарный ток фотокатода ПОИ на внешнем фотоэффекте [1,5,9]:

$$I_{\kappa} = I_{т.к} + I_{\phi}, \quad (4.43)$$

где  $I_{\phi}$  - фототок фотокатода.

Коэффициент преобразования потока излучения ЭОП [1,5,9]:

$$\eta_L = \eta_v \cdot U_p \cdot S_{инт.Фв}, \quad (4.44)$$

где  $\eta_v$  - световая отдача экрана, лм/Вт;  $U_p$  - напряжение питания;

$S_{инт.Фв}$  - интегральная чувствительность к световому потоку.

Коэффициент усиления яркости ЭОП [1,5,9]:

$$\eta_L = \frac{\eta'_v \cdot \pi \cdot S_{инт.Фв} \cdot U_p}{\Gamma_э^2}, \quad (4.45)$$

где  $\Gamma_э$  - электронно-оптическое увеличение ЭОП;  $\eta'_v$  - световая отдача экрана, кд/Вт.



## 4.2. Примеры решения задач

### Задача 4.2.1

Пересчитать интегральную чувствительность и пороговый поток кремниевого фотодиода ФД-24К из световых ФМВ в энергетические по паспортному источнику типа "А" (ЧТ с температурой **2856 K**).

Дано:  $T_{\text{ЧТ}} = 2856 \text{ K}$ ,

Определить:  $S_{e.\text{инт}}$ ,  $\Phi_{e.n}$ .

Решение:

По табл. 11 для фотодиода ФД-24К определяем:

- 1) интегральную чувствительность  $S_{v.I.\text{инт}} = 6 \frac{\text{мА}}{\text{лм}} = 6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{А}}{\text{лм}}$ ;
- 2) пороговый поток  $\Phi_{v.n} = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{лм}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ .

По формуле (4.10) пересчитаем интегральную чувствительность фотодиода в энергетических ФМВ:

$$S_{e.I.\text{инт}} = S_{v.I.\text{инт}} K_{\text{max}} \cdot \kappa_z = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 683 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 0,102 \frac{\text{А}}{\text{Вт}},$$

где по табл. 3 определяем  $\kappa_z = 2,5 \cdot 10^{-2}$  для ЧТ с температурой  $T_{\text{ЧТ}} = 2856 \text{ K}$ .

По формуле (2.9) пересчитаем пороговый поток фотодиода:

$$\Phi_{e.n} = \Phi_{v.n} \frac{1}{683 \cdot \kappa_z} = \frac{5 \cdot 10^{-8}}{683 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}} \approx 3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}.$$

Ответ: интегральная чувствительность фотодиода ФД-24К равна

$$S_{e.\text{инт}} = 0,102 \frac{\text{А}}{\text{Вт}}, \text{ а его пороговый поток равен } \Phi_{e.n} \approx 3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}.$$

#### Задача 4.2.2

Определить коэффициент яркости ЭОП ЭП-15, если световая отдача экрана  $\eta'_v = 15 \frac{\text{Кд}}{\text{Вт}}$ .

Дано: ЭОП ЭП-15,  $\eta'_v = 15 \frac{\text{Кд}}{\text{Вт}}$ .

Определить:  $\eta_L$ .

Решение:

По табл. 11 определяем параметры ЭОП ЭП-15:

$$\Gamma_{\gamma} = 1^x; S_{\text{инт.Фв}} = 180 \frac{\text{мА}}{\text{лм}} = 0,18 \frac{\text{А}}{\text{лм}}; U_p = 10 \text{ кВ} = 10^4 \text{ В}.$$

по формуле (4.45) определяем:

$$\eta_L = \frac{\eta'_v \cdot \pi \cdot S_{\text{инт.Фв}} \cdot U_p}{\Gamma_{\gamma}^2} = 15 \cdot 3,14 \cdot 0,18 \cdot 10000 = 72.$$

Ответ: Коэффициент яркости ЭОП:  $\eta_L = 72$ .

### Задача 4.2.2

Фотоумножитель ФЭУ-28 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом паспортизовался по источнику типа "А" с температурой **2856 К**.

Найти удельный порог чувствительности фотоумножителя для излучения ЧТ с температурой **2360 К** в световых и энергетических ФМВ.

Дано:  $T_1 = 2856 \text{ К}$ ,  $T_2 = 2360 \text{ К}$ .

Определить:  $\Phi_{n.v}$ ,  $\Phi_{n.e}$

Решение:

1) По табл. 11 найдем удельный порог чувствительности ФЭУ для излучения ЧТ с температурой **2856 К**  $\Phi'_{n.v} = 3,5 \cdot 10^{-11} \frac{\text{лм}}{\sqrt{\text{Гц}}}$  и по табл. 10 для ФЭУ-28 определим  $\kappa' = 0,106$  и  $\kappa'' = 0,14$  для **2856 К** и **2360 К** соответственно.

2) По формуле (4.11) получим удельный порог чувствительности ФЭУ для излучения ЧТ с температурой **2360 К** в световых ФМВ:

$$\Phi''_{n.\Phi_e} = \frac{\Phi'_{n.v} \kappa'}{\kappa''} = \frac{3,5 \cdot 10^{-11} \cdot 0,106}{0,14} = 2,65 \cdot 10^{-11} \frac{\text{лм}}{\sqrt{\text{Гц}}}.$$

3) По формуле (4.12) удельный порог чувствительности ФЭУ для излучения ЧТ с температурой **2360 К** в энергетических ФМВ равен при условии, что по табл. 3 пределен :  $\kappa_z = 8,5 \cdot 10^{-3}$

$$\Phi_{n.e} = \frac{\Phi_{n.v}}{K_{\max} \kappa_z} = \frac{2,65 \cdot 10^{-11}}{683 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3}} = 4,56 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}$$

Ответ: удельный порог чувствительности ФЭУ-28 для излучения ЧТ с температурой **2360 К** в световых и энергетических ФМВ соответственно равны:  $\Phi_{n.e} = 4,56 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}$  и  $\Phi''_{n.\Phi_e} = 2,65 \cdot 10^{-11} \frac{\text{лм}}{\sqrt{\text{Гц}}}.$

### 4.3 ЗАДАЧИ

- 4.3.1. Для кремниевого фотодиода ФД-28КП: 1) пересчитать спектральную чувствительность в энергетические ФМВ; 2) рассчитать максимальную спектральную чувствительность фотодиода.
- 4.3.2. Определить коэффициенты использования излучения лампы накаливания с вольфрамовой нитью, имеющей истинную температуру **3500 К**, считая её реальным излучателем: 1) глазом; 2) кремниевым фоточувствительным прибором с зарядовой связью (ФПЗС).
- 4.3.3. Определить коэффициент использования излучения источника типа "А" (ЧТ с температурой **2856 К**) кремниевым ФПЗС 1200ЦМ1.
- 4.3.4. Рассчитать токовую чувствительность матричного ФПЗС 1200ЦМ1 к потоку излучения и к световому потоку лампы накаливания, если квантовая эффективность материала ФПЗС составляет 0,6, а коэффициенты использования излучения лампы матричным ФПЗС и глазом равны, соответственно, **0,36** и **0,082**.
- 4.3.5. Рассчитать интегральную чувствительность кремниевого фотодиода ФД-28КП к потоку излучения ЧТ с температурой **2856 К**.  
Указание. Спектральная чувствительность фотодиода приведена в табл. 11 приложения.
- 4.3.6. Германиевый фотодиод ФД-4Г паспортizовался по источнику типа "А" с температурой **2856 К**. Пересчитать интегральную чувствительность и порог чувствительности в заданной полосе частот из световых ФМВ в энергетические.
- 4.3.7. Пересчитать интегральную чувствительность и удельную обнаружительную способность фоторезистора ФР1-4 на основе

сульфида свинца из энергетических ФМВ в световые, если он паспортизовался по ЧТ с температурой **573 К**. Прокомментировать результаты.

- 4.3.8. Пересчитать интегральную чувствительность и удельную обнаружительную способность фоторезистора СФ4-1А на основе селенида свинца из энергетических ФМВ в световые, если он паспортизовался по ЧТ с температурой **573 К**. Прокомментировать результаты.
- 4.3.9. Пересчитать интегральную чувствительность и порог чувствительности в заданной полосе частот германиевого фотодиода ФД-4Г из световых ФМВ для излучения паспортного источника (ЧТ с температурой **2856 К**) в световые ФМВ для излучения ЧТ с температурой **2360 К**.
- 4.3.10. Пересчитать интегральную чувствительность и порог чувствительности в единичной полосе частот кремниевого фотодиода ФД-24К из световых ФМВ для излучения паспортного источника (ЧТ с температурой **2856 К**) в световые ФМВ для излучения ЧТ с температурой **2360 К**.
- 4.3.11. Пересчитать интегральную чувствительность фотоэлемента Ф-5 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом из световых ФМВ для излучения паспортного источника (ЧТ с температурой **2856 К**) в световые ФМВ для излучения ЧТ с температурой **2360 К**.
- 4.3.12. Пересчитать интегральную чувствительность и удельную обнаружительную способность фоторезистора ФР1-4 на основе сульфида свинца из энергетических ФМВ для излучения паспортного источника (ЧТ с температурой **573 К**) в энергетические ФМВ для излучения ЧТ с температурой **2856 К**.
- 4.3.13. Пересчитать интегральную чувствительность и удельную обнаружительную способность фоторезистора СФ4-1А на основе сульфида свинца из энергетических ФМВ для излучения

паспортного источника (ЧТ с температурой **573 K**) в энергетические ФМВ для излучения ЧТ с температурой **2360 K**.

4.3.14. Пересчитать интегральную чувствительность кремниевого фотодиода ФД-24К из световых ФМВ для излучения паспортного источника (ЧТ с температурой **2856 K**) в энергетические ФМВ для излучения ЧТ с температурой **573 K**.

4.3.15. Пересчитать интегральную чувствительность и порог чувствительности в заданной полосе частот германиевого фотодиода ФД-4Г из световых ФМВ для излучения паспортного источника (ЧТ с температурой **2856 K**) в энергетические ФМВ для излучения ЧТ с температурой **2360 K**.

4.3.16. Фотодиод ФД-4Г из германия паспортизовался по ЧТ с температурой **2856 K** при частоте модуляции потока излучения **1000 Гц**. Фотодиод предназначен для работы с ПИД марки АЛ107Б. Найти: 1) коэффициент использования излучения ПИД фотодиодом; 2) удельный порог чувствительности фотодиода в световых и энергетических ФМВ для излучения паспортного источника; 3) удельный порог чувствительности и интегральную токовую чувствительность в энергетических ФМВ для излучения ПИД.

4.3.17. Фотоумножитель ФЭУ-28 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом паспортизовался по источнику типа "А" с температурой **2856 K**. Найти удельный порог чувствительности фотоумножителя для излучения ЧТ с температурой **2360 K** в световых и энергетических ФМВ.

4.3.18. Фотоэлемент Ф-5 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом паспортизовался по источнику типа "А" с температурой **2856 K** при полосе пропускания усилительного тракта **160 Гц**.

Найти: 1) порог чувствительности фотоэлемента в заданной полосе частот для излучения паспортного источника в световых ФМВ;

2) интегральную чувствительность к потоку излучения ЧТ с температурой **2360 K**.

Указание. Считать преобладающим дробовой шум.

4.3.19. Рассчитать по паспортным данным порог чувствительности матричного ФПЗС 1200ЦМ1 со стандартным временем накопления **20 мс**, паспортизованного по источнику типа "А" с температурой **2856 K**, при освещении его лампой накаливания с истинной температурой нити накала **3500 K**, если коэффициенты использования излучения лампы глазом и ФПЗС равны соответственно **0,082** и **0,36**, а коэффициент использования излучения источника типа "А" ФПЗС составляет **0,22**. ФПЗС используется в телекамере с фокусным расстоянием объектива **58 мм** и расстоянием до движущегося со скоростью **0,1 м/с** объекта **810 мм**. Допустимый "смаз" изображения равен 1/4 элемента ФПЗС.

4.3.20. Найти дисперсию шума матричного ФПЗС, обусловленного зарядовым пакетом, генерированным потоком излучения, если освещённость ФПЗС равна **850 лк**, токовая чувствительность составляет **0,14 А/Вт**, время накопления равно **0,7 мс**, число строк элементов в секции накопления составляет 144, а число столбцов элементов в каждой из секций накопления и хранения - **232**, неэффективность переноса равна  $10^{-3}$ , количество фаз управления - **3**.

4.3.21. Найти дисперсию шума матричного ФПЗС, обусловленного внутренними факторами, если средняя плотность темнового тока равна **40 нА/см<sup>2</sup>**, время накопления составляет **0,7 мс**, среднее количество переносов зарядового пакета равно 996, температура окружающей среды составляет **293 K**, плотность поверхностных состояний равна **671031 Дж<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>**, ёмкость выходной цепи усилителя ФПЗС, выполненного на одном кристалле с выходным регистром ФПЗС, составляет **0,2 нФ**.

- 4.3.22. Найти порог чувствительности матричного ФПЗС, если дисперсия шума, обусловленного зарядовым пакетом, генерированным потоком излучения, составляет  $14,64 \cdot 10^6$ , а дисперсия шума, обусловленного внутренними факторами ФПЗС, -  $5 \cdot 10^4$ , время накопления равно  $0,7 \text{ мс}$ , токовая чувствительность ФПЗС к потоку излучения составляет  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ А/лм}$ .
- 4.3.23. Определить длинноволновую границу спектральной чувствительности ПОИ на внутреннем фотоэффекте при температуре  $300 \text{ К}$ , выполненных: 1) из германия (ширина запрещённой зоны -  $0,68 \text{ эВ}$ ); 2) из кремния (ширина запрещённой зоны -  $1,12 \text{ эВ}$ ).
- 4.3.24. Определить тепловой шум фоторезистора СФ4-1А при температуре  $300 \text{ К}$ , если полоса частот равна  $400 \text{ Гц}$ .
- 4.3.25. Вычислить напряжение дробового шума ПОИ, если сила тока, протекающего в цепи, равна  $1 \text{ мА}$ , полоса частот -  $100 \text{ Гц}$ , а сопротивление составляет  $0,5 \text{ МОм}$ .
- 4.3.26. Определить максимальную вольтовую чувствительность и постоянную времени схемной релаксации для фотоэлемента Ф-5, у которого межэлектродная ёмкость равна  $50 \text{ пФ}$ , если на фотоэлемент падает максимальный световой поток  $0,4 \text{ лм}$ .
- 4.3.27. Определить максимально допустимые сопротивления нагрузки 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  $2856 \text{ К}$ , равном  $0,03 \text{ лм}$ .
- 4.3.28. Определить максимальную интегральную вольтовую чувствительность к световому потоку для германиевого фотодиода ФД-4Г в фотогальваническом режиме при температуре  $20^\circ \text{С}$  и постоянной засветке, создающей освещённость  $6 \text{ клк}$ .



- 4.3.29. Рассчитать: 1) поток излучения, падающий на фотодиод ФД-4Г в интервале спектра от **1,2** до **1,7 мкм** от ЧТ с температурой **2898 К** и площадью **1 см<sup>2</sup>**, находящегося на расстоянии **10 м** от фотодиода; 2) фототок в режиме короткого замыкания, если фотодиод паспортизовался по ЧТ с температурой **2856 К**. Указание. Считать спектральную чувствительность фотодиода в этом диапазоне постоянной и равной максимальному значению.
- 4.3.30. Рассчитать фототок фотодиода ФД-28КП в режиме короткого замыкания, если излучение поступает от ЧТ диаметром **1 см** с температурой **3000 К**, находящегося на расстоянии **2 м** от фотодиода, в спектральном диапазоне от **0,7 до 0,9 мкм**. Указание. Считать спектральную чувствительность фотодиода в этом диапазоне постоянной и равной максимальному значению.
- 4.3.31. Найти фототок фотодиода ФД-24К в режиме короткого замыкания при наличии перед ним П-образного оптического фильтра со спектральным коэффициентом пропускания **0,5** в диапазоне от **0,75 до 0,95 мкм**, если фотодиод паспортизовался по ЧТ с температурой **2856 К** и находится на расстоянии **5 м** от ЧТ диаметром **1 см** с температурой **3500 К**. Указание. Считать спектральную чувствительность фотодиода в этом диапазоне постоянной и равной максимальному значению.
- 4.3.32. Найти фототок фотодиода ФД-4Г в режиме короткого замыкания при наличии перед ним П-образного оптического фильтра со спектральным коэффициентом пропускания **0,8** в диапазоне от **1,25 до 1,75 мкм**, если фотодиод паспортизовался по ЧТ с температурой **2856 К** и находится на расстоянии **0,5 м** от ЧТ диаметром **0,5 см** с температурой **2300 К**. Указание. Считать спектральную чувствительность фотодиода в этом диапазоне постоянной и равной максимальному значению.

- 4.3.33. Фотодиод ФД-4Г паспортизовался по источнику типа "А" с температурой **2856 К**. Фотодиод подключён к сопротивлению нагрузки **100 кОм**. На фотодиод поступает от ЧТ с температурой **2500 К** поток излучения **1 мкВт**. Найти напряжение фотосигнала.
- 4.3.34. Определить порог чувствительности фотоумножителя ФЭУ-28 в реальных условиях при полосе частот усилительного тракта **1 Гц**, сопротивлении нагрузки  **$10^4$  Ом** и температуре **300 К**: 1) по темновому току; 2) при наличии фоновой засветки  **$10^{-6}$  лм**.
- 4.3.35. Определить коэффициент преобразования потока излучения однокамерного ЭОП ПИМ-3Ш со световой отдачей экрана **20 лм/Вт**, если ЭОП паспортизовался по ЧТ с температурой **2856 К**.
- 4.3.36. Определить коэффициент усиления яркости ЭОП ЭП-15, имеющего световую отдачу экрана **15 кд/Вт**, если ЭОП паспортизовался по ЧТ с температурой **2856 К**.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники излучения: Учебное пособие. - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2005. - 395 с.
2. ГОСТ 26148-84. Фотометрия.
3. ГОСТ 8.332-78. Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения.
4. ГОСТ 7601-78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин.
5. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. Учебное пособие для вузов. - СПб.: Папирус, 2003. - 528 с.
6. Коротаев В.В., Мусяков В.Л. Методические указания к курсовой работе по курсу «Источники и приёмники излучения». - Л.: ЛИТМО, 1991. - 26 с.
7. Справочник конструктора опτικο-механических приборов / Кругер М. Я. и др.- Л.: Машиностроение, 1967. - 803 с.
8. Павлов А.В., Черников А.И. Приемники излучения для автоматических опτικο-электронных приборов. - М.: Энергия, 1972. - 180 с.
9. Ишанин Г. Г., Мальцева Н. К., Мусяков В. Л. Источники и приемники излучения / Методические указания к лабораторным работам. - СПб.: ИТМО, 2001. - 122 с.
10. Краткий физико - технический справочник / Под ред. Яковлева К. П. // Т.1 (Математика. Физика). - М.: Физматгиз, 1960. - с.
11. Балягин А. В., Верещагин С. Н., Долганин Ю. И. Исследование характеристик телевизионных камер на серийных приборах с зарядовой связью типа К1200ЦМ1 и К1200ЦМ2 (К1200ЦМ7) // Электронная техника. Серия «Полупроводниковые приборы». - 1985. - Вып.1.
12. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л. Приёмники оптического излучения: Справочник. - М.: Радио и связь, 1987. - с.

13. Карасев В. И. и др. Фотоприёмные свойства преобразователей изображения на ПЗС при низких уровнях освещенности // Электронная промышленность. - 1982. - Вып. 7.
14. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги: Справочник в 5-ти томах. Т.3. - М: Радио Софт, 2000. - 512 с.
15. Шайкевич Д. В. Расчёт отношения сигнал/шум в телевизионных камерах на ПЗС при заданных характеристиках источника излучения // Техника средств связи. Серия «Техника телевидения». - 1984. - Вып.4.
16. Проектирование оптико-электронных приборов. Учебник. Под ред. Якушенкова Ю. Г. – М.: Логос, 2000. – 488 с.
17. Латыев С.М.. Конструирование точных (оптических) приборов / Учебное пособие Ч.3 - С.Пб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. - 78 с.
18. Толстоба Н.Д., Цуканов А.А. Проектирование узлов оптических приборов. Учебное пособие. - СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. - 128 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ [1, 10]

Наименование	Обозначение	Значение
Постоянная Планка	$h$	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная закона смещения (Вина) в спектре длин волн	$C_\lambda$	$28,98 \cdot 10^{-4}$ м·К
Постоянная закона смещения (Вина) в спектре частот	$C_f$	$5,88 \cdot 10^{10}$ Гц/К
Постоянная второго закона Вина	$C'_\lambda$	$1,315 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м <sup>3</sup> ·К <sup>5</sup> )
Вторая постоянная закона Планка	$C_2$	$1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К
Скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме	$c$	$2,998 \cdot 10^8$ м/с
Заряд электрона	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Максимальная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения	$K_{\max}$	683 лм/Вт
Квантовая эффективность матричного ФПЗС на кремниевой основе на длине волны, соответствующей максимуму чувствительности	$\eta_{\max}$	0,5...0,7
Коэффициент неэффективности переноса зарядового пакета для ФПЗС с поверхностным каналом	$\xi$	$10^{-4} \dots 10^{-3}$
Множитель, учитывающий дробовый эффект динодов фотоумножителя с электростатической фокусировкой	$B$	1,5
Удельное сопротивление вольфрама при нормальной температуре	$\rho_{\text{м.0}}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$
Температурный коэффициент сопротивления вольфрама	$\alpha_R$	$51 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ СВЕТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДНЕВНОГО ЗРЕНИЯ [3]

$\lambda$ , нм	300	400	500	600	700
0	-	0,0004	0,323	0,631	0,0041
10	-	0012	503	503	0021
20	-	0040	710	381	00105
30	-	0116	862	265	00052
40	-	023	954	175	00025
50	-	038	995	107	00012
60	-	060	995	061	00006
70	-	091	952	032	00003
80	0,000039	139	870	017	000015
90	00012	208	757	0082	-

Таблица 3. КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧТ  
ГЛАЗОМ[8]

Температура ЧТ, К	Коэффициент использования излучения ЧТ глазом $k_z$		Температура ЧТ, К	Коэффициент использования излучения ЧТ глазом $k_z$
1200	$6,10 \cdot 10^{-6}$		3500	$5,57 \cdot 10^{-2}$
1300	$2,00 \cdot 10^{-5}$		3750	$6,82 \cdot 10^{-2}$
1400	$5,60 \cdot 10^{-5}$		4000	$8,10 \cdot 10^{-2}$
1500	$1,42 \cdot 10^{-4}$		4250	$9,24 \cdot 10^{-2}$
1600	$2,82 \cdot 10^{-4}$		4500	$1,03 \cdot 10^{-1}$
1700	$4,77 \cdot 10^{-4}$		4750	$1,11 \cdot 10^{-1}$
1800	$6,00 \cdot 10^{-4}$		5000	$1,19 \cdot 10^{-1}$
1900	$1,58 \cdot 10^{-3}$		5250	$1,25 \cdot 10^{-1}$
2000	$2,45 \cdot 10^{-3}$		5500	$1,30 \cdot 10^{-1}$
2100	$3,63 \cdot 10^{-3}$		5750	$1,34 \cdot 10^{-1}$
2200	$5,16 \cdot 10^{-3}$		6000	$1,36 \cdot 10^{-1}$
2300	$7,03 \cdot 10^{-3}$		6500	$1,37 \cdot 10^{-1}$
2360	$8,50 \cdot 10^{-3}$		7000	$1,35 \cdot 10^{-1}$
2400	$9,33 \cdot 10^{-3}$		7500	$1,31 \cdot 10^{-1}$
2500	$1,20 \cdot 10^{-2}$		8000	$1,26 \cdot 10^{-1}$
2600	$1,51 \cdot 10^{-2}$		8500	$1,21 \cdot 10^{-1}$
2700	$1,88 \cdot 10^{-2}$		9000	$1,14 \cdot 10^{-1}$
2850	$2,43 \cdot 10^{-2}$		9500	$1,07 \cdot 10^{-1}$
3000	$3,09 \cdot 10^{-2}$		10000	$9,88 \cdot 10^{-2}$
3100	$3,52 \cdot 10^{-2}$		20000	$3,06 \cdot 10^{-2}$
3200	$4,04 \cdot 10^{-2}$		40000	$5,37 \cdot 10^{-3}$
3300	$4,47 \cdot 10^{-2}$		60000	$2,64 \cdot 10^{-3}$
3400	$4,95 \cdot 10^{-2}$		70000	$1,33 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4. ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЛАНКА  $y = f(x)$  [4]

$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
0,10	$4,70 \cdot 10^{-15}$	0,66	0,615	1,29	0,867	1,94	0,434
0,15	$7,91 \cdot 10^{-9}$	0,67	0,638	1,30	0,860	1,96	0,424
0,20	$7,37 \cdot 10^{-6}$	0,68	0,661	1,31	0,852	1,98	0,415
0,21	$1,88 \cdot 10^{-5}$	0,69	0,683	1,32	0,845	2,00	0,405
0,22	$4,37 \cdot 10^{-5}$	0,70	0,704	1,33	0,838	2,05	0,383
0,23	$9,31 \cdot 10^{-5}$	0,71	0,725	1,34	0,830	2,10	0,362
0,24	$1,85 \cdot 10^{-4}$	0,72	0,745	1,35	0,820	2,15	0,341
0,25	$3,45 \cdot 10^{-4}$	0,73	0,764	1,36	0,815	2,20	0,323
0,26	$6,10 \cdot 10^{-4}$	0,74	0,783	1,37	0,808	2,25	0,305
0,27	$1,02 \cdot 10^{-3}$	0,75	0,801	1,38	0,800	2,30	0,289
0,28	$1,62 \cdot 10^{-3}$	0,76	0,817	1,39	0,793	2,35	0,273
0,29	$2,54 \cdot 10^{-3}$	0,77	0,834	1,40	0,785	2,40	0,258
0,30	$3,80 \cdot 10^{-3}$	0,78	0,849	1,41	0,778	2,45	0,245
0,31	$5,50 \cdot 10^{-3}$	0,79	0,862	1,42	0,770	2,50	0,232
0,32	$7,74 \cdot 10^{-3}$	0,80	0,877	1,43	0,763	2,55	0,220
0,33	0,0106	0,81	0,890	1,44	0,755	2,60	0,208
0,34	0,0142	0,82	0,903	1,45	0,748	2,65	0,198
0,35	0,0187	0,83	0,914	1,46	0,740	2,70	0,187
0,36	0,0241	0,84	0,925	1,47	0,733	2,75	0,178
0,37	0,0305	0,85	0,934	1,48	0,725	2,80	0,169
0,38	0,0380	0,86	0,943	1,49	0,718	2,85	0,161
0,39	0,0467	0,87	0,952	1,50	0,710	2,90	0,153
0,40	0,0565	0,88	0,959	1,51	0,703	3,00	0,138
0,41	0,0665	0,89	0,966	1,52	0,696	3,10	0,126
0,42	0,0800	0,90	0,972	1,53	0,688	3,20	0,114
0,43	0,0936	0,92	0,983	1,54	0,681	3,30	0,104
0,44	0,108	0,94	0,990	1,55	0,674	3,40	0,0947
0,45	0,124	0,96	0,996	1,56	0,667	3,50	0,0866
0,46	0,142	0,98	0,999	1,57	0,659	3,60	0,0797
0,47	0,160	1,00	1,000	1,58	0,652	3,70	0,0726
0,48	0,180	1,02	0,999	1,59	0,645	3,80	0,0667
0,49	0,200	1,04	0,996	1,60	0,638	3,90	0,0614
0,50	0,222	1,06	0,992	1,62	0,624	4,00	0,0565
0,51	0,244	1,08	0,986	1,64	0,610	4,50	0,0383
0,52	0,267	1,10	0,979	1,66	0,597	5,00	0,0268
0,53	0,291	1,12	0,970	1,68	0,580	6,00	0,0142
0,54	0,315	1,14	0,961	1,70	0,571	7,00	$8,20 \cdot 10^{-3}$
0,55	0,339	1,16	0,951	1,72	0,558	8,00	$5,05 \cdot 10^{-3}$
0,56	0,365	1,18	0,940	1,74	0,546	9,00	$3,27 \cdot 10^{-3}$
0,57	0,390	1,20	0,928	1,76	0,534	10,0	$2,20 \cdot 10^{-3}$
0,58	0,415	1,21	0,921	1,78	0,522	20,0	$1,6 \cdot 10^{-4}$
0,59	0,441	1,22	0,915	1,80	0,510	30,0	$3,2 \cdot 10^{-5}$
0,60	0,466	1,23	0,908	1,82	0,498	40,0	$1,0 \cdot 10^{-5}$
0,61	0,492	1,24	0,902	1,84	0,487	50,0	$4,3 \cdot 10^{-6}$
0,62	0,517	1,25	0,895	1,86	0,476	$\infty$	0
0,63	0,542	1,26	0,888	1,88	0,465	-	-
0,64	0,567	1,27	0,881	1,90	0,455	-	-
0,65	0,615	1,28	0,874	1,92	0,444	-	-

Таблица 5. ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ  $z(x)$  [4]

$x$	$z \cdot 10^2$	$x$	$z \cdot 10^2$	$x$	$z \cdot 10^2$	$x$	$z \cdot 10^2$
0,10	$5,5 \cdot 10^{-16}$	0,80	12,41	1,42	50,24	2,20	76,93
0,20	$0,04 \cdot 10^{-4}$	0,82	13,59	1,44	51,12	2,30	78,94
0,22	$0,31 \cdot 10^{-4}$	0,84	14,79	1,46	52,23	2,40	80,74
0,24	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,86	16,02	1,48	53,19	2,50	82,36
0,26	$6,4 \cdot 10^{-4}$	0,88	17,27	1,50	54,14	2,60	83,81
0,28	$20,3 \cdot 10^{-4}$	0,90	18,54	1,52	55,07	2,70	85,10
0,30	$54,7 \cdot 10^{-4}$	0,92	19,83	1,54	55,98	2,80	86,27
0,32	$1,28 \cdot 10^{-2}$	0,94	21,12	1,56	56,36	2,90	87,33
0,34	$2,69 \cdot 10^{-2}$	0,96	22,44	1,58	57,74	3,00	88,29
0,36	$5,17 \cdot 10^{-2}$	0,98	23,74	1,60	58,58	3,10	89,16
0,38	$9,21 \cdot 10^{-2}$	1,00	25,06	1,62	59,42	3,20	89,96
0,40	$5,4 \cdot 10^{-2}$	1,02	26,38	1,64	60,22	3,30	90,69
0,42	$24,3 \cdot 10^{-2}$	1,04	27,70	1,66	61,02	3,40	91,39
0,44	$36,6 \cdot 10^{-2}$	1,06	29,02	1,68	61,80	3,50	91,99
0,46	$53,0 \cdot 10^{-2}$	1,08	30,33	1,70	62,56	3,60	92,53
0,48	$74,1 \cdot 10^{-2}$	1,10	31,61	1,72	63,31	3,70	93,03
0,50	1,04	1,12	32,89	1,74	64,03	3,80	93,49
0,52	1,36	1,14	34,17	1,76	64,75	3,90	93,91
0,54	1,74	1,16	35,43	1,78	65,44	4,00	94,31
0,56	2,19	1,18	36,67	1,80	66,12	5,00	96,91
0,58	2,70	1,20	37,91	1,82	66,82	6,00	98,21
0,60	3,28	1,22	39,11	1,84	67,46	7,00	98,93
0,62	3,93	1,24	40,31	1,86	68,10	8,00	99,36
0,64	4,64	1,26	41,49	1,88	68,72	9,00	99,63
0,66	5,42	1,28	42,65	1,90	69,32	10,0	99,81
0,68	6,27	1,30	43,79	1,92	69,92	15,0	99,84
0,70	7,17	1,32	44,91	1,94	70,50	20,0	99,93
0,72	8,12	1,34	46,62	1,96	71,06	30,0	99,98
0,74	9,13	1,36	47,10	1,98	71,62	40,0	99,99
0,76	10,18	1,38	48,17	2,00	72,16	50,0	99,995
0,78	11,28	1,40	49,21	2,10	74,68	$\infty$	100,00



Таблица 6. КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОПУСКАНИЯ  
АТМОСФЕРЫ ПО МЕТОДУ ЭЛЬДЕРА-СТРОНГА [9]

Номер спектрального интервала	Спектральный интервал, мкм	$k_I$ , %	$t_0$ , %
I	0,7...0,92	15,1	106,3
II	0,92...1,1	16,5	106,3
III	1,1...1,4	17,1	96,3
IV	1,4...1,9	13,1	81,0
V	1,9...2,7	13,1	72,5
VI	2,7...4,3	12,5	72,3
VII	4,3...5,9	21,2	51,2

Таблица 7. ПРЕДЕЛЬНАЯ АБСОЛЮТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ ВОДЯНОГО ПАРА  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ [9]

Температура, °C	-20	-15	-10	-5	0	5	10	20	30	40	50
Пределная абсолютная влажность, мкг/см <sup>3</sup>	1,0 8	1,60	2,35	3,41	4,86	6,32	9,41	17,32	30,38	51,1	82,8

Таблица 8. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОИ [11,12]

Длина волны, мкм	Относительная спектральная чувствительность		
	Кремниевый ФПЗС 1200ЦМ1	Кремниевый фотодиод ФД-28КП	Германиевый фотодиод ФД-4Г
0,40	0,10	-	0,10
0,45	-	0,15	-
0,50	0,35	0,35	-
0,55	-	0,50	-
0,60	0,55	0,35	0,25
0,65	-	0,70	-
0,70	0,73	0,87	-
0,75	-	0,95	-
0,78	-	1,00	-
0,80	1,00	0,98	0,40
0,85	-	0,85	-
0,90	0,90	0,72	-
0,95	-	0,50	-
1,00	0,62	0,30	0,57
1,05	-	0,15	-
1,10	0,20	0,10	-
1,20	0,10	-	0,75
1,40	-	-	0,93
1,52	-	-	1,00
1,60	-	-	0,94
1,70	-	-	0,55
1,80	-	-	0,05

Таблица 9. СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ПИД АЛ107Б [14]

Длина волны, мкм	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
Относи- тельная СППИ	0,04	0,10	0,55	1,00	0,55	0,30	0,20	0,10	0,04

Таблица 10. КОЭФФИЦИЕНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧТ  
РАЗЛИЧНЫМИ ПОИ [8]

Температура ЧТ, К	Кремниевый фотодиод ФД-28КП	Кремниевый фотодиод ФД-24К	Германиевый фотодиод ФД-4Г	Фотоэлемент Ф-5, фотоум- ножитель ФЭУ-28 (спектр. хар-ка С-1)
800	$2,95 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$5,84 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-5}$
1000	$8,01 \cdot 10^{-5}$	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$2,67 \cdot 10^{-2}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
1200	$6,82 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$6,79 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
1500	$5,26 \cdot 10^{-3}$	$4,32 \cdot 10^{-2}$	0,156	$6,77 \cdot 10^{-3}$
1700	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$7,68 \cdot 10^{-2}$	0,220	$1,45 \cdot 10^{-2}$
2000	$3,41 \cdot 10^{-2}$	0,142	0,309	$3,25 \cdot 10^{-2}$
2200	$5,43 \cdot 10^{-2}$	0,192	-	$4,80 \cdot 10^{-2}$
2360	$7,34 \cdot 10^{-2}$	0,233	0,391	$6,17 \cdot 10^{-2}$
2500	$9,15 \cdot 10^{-2}$	0,269	0,416	$7,43 \cdot 10^{-2}$
2700	0,119	0,319	0,444	$9,27 \cdot 10^{-2}$
2850	0,140	0,356	0,461	0,106
3000	0,161	0,391	0,474	0,120
3200	0,187	0,434	0,486	0,137
3600	0,236	0,508	0,498	0,169
4000	0,274	0,565	0,495	0,196
4200	0,289	0,587	0,491	0,209
4500	0,308	0,614	0,480	0,226
4800	0,321	0,633	0,467	0,242
5000	0,327	0,641	0,456	0,252
5200	0,331	0,647	0,445	0,261
5500	0,335	0,651	0,428	0,274
5850	0,335	0,649	0,408	0,287
6000	0,334	0,647	0,399	0,292

Таблица 10 (продолжение)

Температура ЧТ, К	Фоторезистор СФ4-1А	Фоторезистор ФР1-4
273	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$5,54 \cdot 10^{-5}$
293	$3,58 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$
373	$6,02 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$
500	$9,00 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$
573	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$3,29 \cdot 10^{-2}$
700	$5,55 \cdot 10^{-2}$	$8,05 \cdot 10^{-2}$
800	$9,79 \cdot 10^{-2}$	0,126
1000	0,202	0,220
1200	0,308	0,287
1600	0,466	0,348
2000	0,550	0,340
2200	0,572	0,325
2360	0,583	0,311
2850	0,593	0,264
3000	0,590	0,250
3400	0,578	0,215
3800	0,560	0,184
4000	0,548	0,171
4500	0,517	0,142
5000	0,483	0,118
5850	0,425	$8,88 \cdot 10^{-2}$
6000	0,414	$8,44 \cdot 10^{-2}$

Таблица 11 ПАРАМЕТРЫ ПОИ [11,12]

ПОИ	Диаметр ФЧЭ, мм	Интеграль- ная (спект- ральная) чувстви- тельность	Порог чувстви- тельности (пороговая освещен- ность)	Удельная обнаружи- тельная способ- ность	Темновой ток, А	Темновое сопротив- ление, МОм	Рабочее напряже- ние, В
Фотодиод ФД-28КП	1,24×1,24	3,5 мА/лм (при $\lambda =$ $=0,63$ мкм)	-	-	-	-	-
Фотодиод ФД-24К	10	6 мА/лм	$5 \cdot 10^{-8}$ лм/Гц <sup>1/2</sup>	-	-	-	-
Фотодиод ФД-4Г	2,45	5 мА/лм	$1,5 \cdot 10^{-10}$ лм	-	$3 \cdot 10^{-5}$	-	20
ФПЗС 1200ЦМ1	24×21 мкм	-	$5 \cdot 10^{-2}$ лк	-	-	-	-
Фоторезис- тор ФР1-4	3×5,8	82 В/Вт	-	$0,9 \cdot 10^8$ Гц <sup>1/2</sup> ·см/Вт	-	0,22...1,00	-
Фоторезис- тор СФ4-1А	1×1	1000 В/Вт	-	$5 \cdot 10^8$ Гц <sup>1/2</sup> ·см/Вт	-	1	-
Фотоэле- мент Ф-5	25	8 мкА/лм	-	-	$5 \cdot 10^{-11}$	-	100
Фотоумно- житель ФЭУ-28	25	1 А/лм (анодная) 40 мкА/лм (фотокато- да)	$3,5 \cdot 10^{-11}$ лм/Гц <sup>1/2</sup>	-	$2 \cdot 10^{-7}$	-	-
ЭОП ПИМ-3Ш	-	50 мА/Вт	-	-	-	-	30000
ЭОП ЭП-15 (электрон- но-опти- ческое уве- личение - 1 <sup>х</sup> )	-	180 мА/Вт	-	-	-	-	10000