



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

Учебное пособие

по дисциплине

«Светотехника»

Авторы

Кунаков В.С.,

Литвищенко В.Л.,

Лемешко Г.Ф.,

Попова И.Г.,

Пруцакова Н.В.

Ростов-на-Дону, 2016



Аннотация

В пособие включены основные формулы и законы по разделу «Светотехника», подобраны задачи для аудиторной и самостоятельной работы, а также даны ответы и пояснения к задачам. При решении некоторых задач рекомендуется использовать приложения 1–9.

Предназначено для практических занятий по светотехнике для студентов-бакалавров направления 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника».

Авторы

Кунаков В.С.,
Литвищенко В.Л.,
Лемешко Г.Ф.,
Попова И.Г.,
Пруцакова Н.В.



1. ФОТОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Основные законы и формулы

Энергия фотона, Дж,

$$Q_{\text{фот}} = h\nu = h \frac{c}{\lambda},$$

где $h = 6.624 \cdot 10^{-34}$ Джс – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^{10}$ м/с – скорость света в вакууме, ν – частота излучения фотона, с^{-1} ; λ – длина волны фотона.

Фотонная энергия (число фотонов) равна:

$$Q_{\text{фот}} = N.$$

Поток фотонов, с^{-1} :

$$\Phi_{\text{фот}} = N / t.$$

Единица фотонного потока – 1 фотон.

Единица фотонного потока 1 Эйнштейн = $6,023 \cdot 10^{23}$ фотонов.

Фотонная облученность, $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$:

$$E_{\text{эффо}} = dN_e / dA, \text{ ,}$$

где dN_e – число фотонов лучистого потока; dA – облученная площадь.

Фотонная освещенность, число фотонов, $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^2$:

$$E_{\text{фот}} = dN / dA,$$

где dN – число фотонов светового потока.

Фотонная экспозиция, м^{-2} :

$$H_{\text{фот}} = dQ_{\text{фот}} / dA, \quad H_{\text{фот} \cdot \text{сн}} = E_{\text{фот}} t.$$

Сила фотонного излучения, $\text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, $I_{\text{фот}} = d\Phi_{\text{фот}} / d\Omega$.

Фотонная яркость, $\text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, $I_{\text{фот}} = dI_{\text{фот}} / dA \cos \alpha$.

Задания

1.1. Определите энергию фотона с длинами волн: $\lambda_1 = 200$ нм, $\lambda_2 = 380$ нм, $\lambda_3 = 550$ нм, $\lambda_4 = 760$ нм.

1.2. Определите отношение энергии фотонов с длинами волн $\lambda_1 = 300$ нм и $\lambda_2 = 580$ нм и назовите, к каким участкам спектра принадлежат эти фотоны.

1.3. Монохроматический лучистый поток с $\Phi_c(\lambda, d\lambda) = 10$ Вт, $\lambda_1 = 555$ нм. Определите фотонный поток.

1.4. Фотонный поток источника 10^6 фотон с $\lambda = 0,41$ мкм. Определите время, в течение которого энергия, излучаемая источником, будет равна 1 Дж, и фотонную энергию, испускаемую источником в течение часа.

1.5. По измерениям Пинегина, выполненным в 1946 г., падающий на сетчатку глаза монохроматический лучистый поток $\lambda = 491$ нм, вызывающий пороговое ощущение света в условиях сумеречного зрения, равен $\Phi_c(\lambda, d\lambda) = 3 \cdot 10^{16}$ Дж⁻¹. Определите фотонный поток, падающий на сетчатку глаза в этих условиях освещения.

1.6. Определите фотонную облученность пластинки, если она облучается монохроматическим потоком и имеет облученность $E_{с\lambda} = 2$ Вт/м².

1.7. Черная пластинка, поглощающая 90% падающей на ее поверхность энергии, получает 100 кал тепла в секунду. Площадь пластинки 1 м², она облучается монохроматическим потоком: $\lambda_1 = 500$ нм, $\lambda_2 = 2000$ нм. Определите облученность пластинки.

1.8. Определите фотонную экспозицию, создаваемую монохроматическим потоком с длиной волны $\lambda = 400$ нм, если энергетическая экспозиция равна $H_c = 10$ Дж/м².

1.9. Фотонная экспозиция $H_{фот} = 52 \cdot 10^{20}$ Дж⁻² создается фотонами с длиной волны $\lambda = 520$ нм. Определите экспозицию, создаваемую этим излучением.

1.10. Определите фотонную яркость и фотонную энергетическую яркость монохроматического излучения, если его яркость $L(\lambda, d\lambda) = 1000$ кд/м², а $\lambda = 700$ нм.

1.11. Источник с линейчатым спектром испускает в минуту по 10^{20} фотонов с длинами волн: $\lambda_1 = 200$ нм, $\lambda_2 = 300$ нм, $\lambda_3 = 555$ нм, $\lambda_4 = 2000$ нм, $\lambda_5 = 3000$ нм. Определите лучистые потоки, испускае-

мые этим источником в ультрафиолетовой, видимой, инфракрасной частях спектра.

1.12. Источник монохроматического излучения ($\lambda = 500$ нм) имеет фотонный поток $\Phi_{\text{фот}} = 10$ Эйнштейн. Определите лучистый поток этого источника.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основные законы и формулы

Лучистая энергия Q_e , Дж.

Лучистый поток, Вт:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}; \quad \Phi_{e\text{cp}} = \frac{Q_e}{t}.$$

Лучистый поток монохроматический, Вт:

$$\Phi_e(\lambda, d\lambda) = \frac{Q_e(\lambda, d\lambda)}{dt}.$$

Лучистый поток источника с линейчатым спектром, Вт:

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^N \Phi(\lambda, d\lambda).$$

Спектральная плотность лучистого потока, Вт/мкм :

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi(\lambda, d\lambda)}{d\lambda}.$$

Лучистый поток источника со сплошным спектром, Вт:

$$\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda,$$

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^N \Phi_{e\lambda_i}(\lambda) \Delta\lambda ,$$

где $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – функция спектральной плотности лучистого потока;

$\Phi_{e\lambda_i}(\lambda)$ – среднее значение спектральной плотности лучистого

потока i -го участка спектра; N – число участков спектра шириной $\Delta\lambda$; λ_1, λ_n – границы участка сплошного спектра, в пределах которого определяется лучистый поток.

Телесный угол, ср (стерадиан):

$$\Delta\Omega = \Delta A / r^2 .$$

Элементарный телесный угол, ср: $d\Omega = 2\pi \sin \alpha d\alpha$.

Сила излучения (энергетическая сила света), Вт/ср:

$$I_{e\alpha} = d\Phi_e / d\Omega .$$

Энергетическая яркость участка поверхности в направлении α , Вт/(м²с):

$$L_{e\alpha} = dI_{e\alpha} / dA \cos \alpha ,$$

где $dI_{e\alpha}$ – сила излучения участка поверхности dA в направлении α ;

dA –участок излучающей поверхности; α –угол между перпендикуляром к участку dA и направлением α .

Энергетическая яркость тела (точечного источника) в направлении α , Вт/(м²×ср):

$$L_{e\alpha} = I_{e\alpha} / \sigma , \quad L_{e\alpha} = I_{e\alpha} / A \cos \alpha ,$$

где $I_{e\alpha}$ – сила излучения в направлении, определяемом углом α ;

σ и $A \cos \alpha$ – соответственно проекции светящей поверхности и плоской светящей поверхности A на плоскость, перпендикулярную направлению α .

Энергетическая яркость участка поверхности dA в направлении к вершине телесного угла $d\Omega$, Вт/(м²ср):

$$L_{e\alpha} = dE_{en} / d\Omega,$$

где dE_{en} - нормальная облученность в вершине телесного угла $d\Omega$, опирающегося на участок светящей поверхности dA .

Энергетическая светимость (излучательность), Вт /м²:

$$M_e = d\Phi_e / dA, \quad M_{ecp} = \Phi_e / A,$$

где $d\Phi_e$ и Φ_e - лучистые потоки, соответственно излучаемые участками поверхности dA и A .

Облученность участка поверхности P в точке B , Вт/ м²:

$$E_{eBP} = I_{e\alpha} \cos \beta / l^2,$$

где $I_{e\alpha}$ - сила излучения в направлении к точке B облучаемой поверхности; l - расстояние от точечного источника до точки B облучаемой поверхности; β - угол падения света к точке B .

Энергетическая экспозиция, Дж/ м²:

$$H_e = \int_{t_1}^{t_n} E_{et} dt;$$

$$H_e = E_e t,$$

где E_{et} и E_e - мгновенное и постоянное значения облученности; t_1, t_n, t - отрезки времени, в течение которых облучается участок поверхности.

Задания

2.1. Определите значения телесных углов: а) наибольшего, б) опирающегося на полусферу и имеющего вершину в центре сферы, в) опирающегося на полусферу и имеющего вершину, лежащую на поверхности сферы в точке O_2 , г) опирающегося на участок сферы,

заклученный между двумя вертикальными полуплоскостями, смещенными на угол $\varphi = 10^\circ$ и пересекающимися по диаметру O_1, O_2 (рис. 2.1).

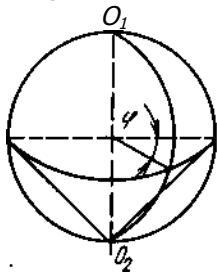


Рис.2.1

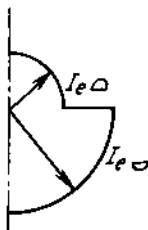


Рис.2.2



Рис.2.3

2.2. Продольная кривая силы излучения источника показана на рис.2.2. Определите поток излучения источника, если $I_{e\phi} = 0,5I_{e\alpha}$.

2.3. Продольные кривые силы излучения источника описываются выражениями: 1) $I_{e\alpha} = 150\cos^2\alpha$, Вт/ср; 2) $I_{e\alpha} = 100\cos\alpha$, Вт/ср. Определите потоки излучения этих источников.

2.4. Боковая поверхность цилиндра испускает лучистый поток и имеет продольную кривую сил излучения (рис.2.3), которая описывается выражением $I_{e\beta} = 100\cos\beta$. Определите лучистый поток этого источника излучения.

2.5. Шаровой источник излучает лучистый поток $\Phi_c = 1257$ Вт. Определите лучистые потоки, излучаемые этим источником в зонах углов α , равных $0 - 10^\circ$ и $80 - 90^\circ$. В каких еще десятиградусных зонах излучаются такие же лучистые потоки?

2.6. Ртутная лампа сверхвысокого давления имеет излучающее тело в виде шара диаметром 6 мм с энергетической светимостью $M_e = -555$ Вт/см². Считая лампу равноркой, определите облученности в точке Б (рис. 2.4), если $H = 5$ м: а) минимальную, б) максимальную, в) на горизонтальной плоскости, г) на вертикальной плоскости Р.

2.7. Равноркий усеченный конус, расположенный, как указано на рис. 2.5, ($D_1 = 1$ см; $D_2 = 0,25$ см; $h = 1$ см; $H = 5$ м), создает в точке Б горизонтальной плоскости облученность $E_{e\beta} = 2$, Вт/м².

Определите энергетическую яркость поверхности усеченного конуса. Как изменится горизонтальная облученность в точке B , если усеченный конус повернуть около точки O так, чтобы его основания стали параллельными горизонтальной плоскости?

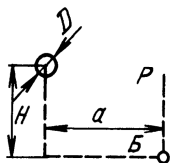


Рис.2.4

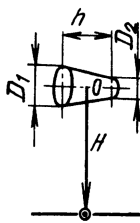


Рис.2.5



Рис.2.6

2.8. На две плоские одинаковые по площади поверхности падают одинаковые лучистые потоки (рис. 2.6). На первую поверхность лучистый поток падает нормально, а на вторую – под углом $\alpha = 60^\circ$. Определите соотношение облученностей этих поверхностей.

2.9. Точечный источник излучения, расположенный на расстоянии H , м, от облучаемой горизонтальной поверхности, создает на ней равномерную облученность E_e в зоне от $\alpha_1 = 0^\circ$ до $\alpha_2 = 60^\circ$ (рис. 2.7). Определите выражение, описывающее продольную кривую силы излучения источника в этой зоне углов α .

2.10. По круглой пластинке, имеющей диаметр $D = 10$ см, облученность распределяется, как указано на рис. 2.8, а, б ($E_{eM} = 3$ Вт/см²). Определите лучистые потоки, падающие на пластинку в одном и другом случаях.

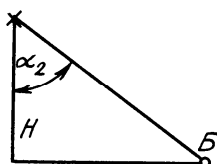
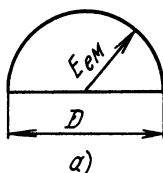
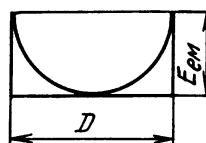


Рис.2.7



а)



б)

Рис.2.8

2.11. Определите энергетическую яркость равнояркого цилиндра, если его размеры $D = 15$ мм и $l = 50$ мм. Цилиндр создает в точке B ($H=3$ м, $a=4$ м) горизонтальную облученность $E_{eB} = 50 \cdot 10^{-4}$ мкВт \times м² (рис. 2.9). Излучает только боковая поверхность цилиндра.

2.12. У равнояркого цилиндра (рис. 2.9, см. задачу 2.11) излучает вся поверхность. Энергетическая яркость цилиндра $L_e = 4,63 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м²ср). Определите облученность горизонтальной плоскости в точке B , создаваемую этим цилиндром.

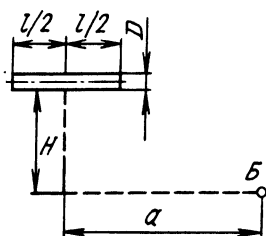


Рис.2.9

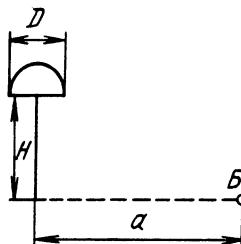


Рис.2.10

2.13. Внутренняя поверхность полой равнояркой полусферы с внутренним диаметром $D = 10$ мм имеет энергетическую светимость $M_e = 112,9$ Вт/см². Определите горизонтальную облученность, создаваемую излучением внутренней поверхности полусферы в точке B ($H=4$ м, $a = 3$ м, рис. 2.10).

3. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

3.1. Законы излучения черного тела

Основные законы и формулы

Закон Кирхгофа

$$\frac{M_e(T)}{\alpha_e(T)} = \frac{M_e(T)_1}{\alpha_e(T)_1} = \frac{M_e(T)_2}{\alpha_e(T)_2} = \dots = \frac{M_e(T)_n}{\alpha_e(T)_n} = M_e^0(T);$$

$$\frac{M_{e\lambda}(\lambda T)_1}{\alpha_e(\lambda T)_1} = \frac{M_{e\lambda}(\lambda T)_2}{\alpha_e(\lambda T)_2} = \dots = \frac{M_{e\lambda}(\lambda T)_n}{\alpha_e(\lambda T)_n} = M_{\lambda e}^0(\lambda T).$$

Закон Планка

$$M_{\lambda e}^0(\lambda T) = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1}.$$

Закон Вина

$$M_{\lambda e}^0(\lambda T) = c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}.$$

Закон Релея – Джинса

$$M_{\lambda e}^0(\lambda T) = \frac{c_1}{c_2} \lambda^{-4} T,$$

где $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт/м², $c_2 = 1,4 \cdot 10^{-2}$ м, T – абсолютная температура.

Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} T = 2896 \text{ мкм} \times K,$$

где λ_{\max} – длина волны, соответствующая максимальному значению функции $M_e^0(\lambda T)$.

Закон Стефана – Больцмана

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

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²×К⁴).

$$M_e^0(\lambda T)_{\max} = c' T^5,$$

где $c' = 1,3 \cdot 10^{11}$ Вт/(м²×мкм×К⁵).

Функция Планка в относительных координатах имеет следующий вид:

$$\eta = 142,3 \xi^{-5} / \left(e^{4,963/\xi} - 1 \right),$$

где $\xi = \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}$; $\eta = M_e^0(\lambda T) / M_e^0(\lambda T)_{\max}$.

Доля лучистого потока, приходящегося на участок спектра с границами от λ_1 до λ_2 ,

$$n = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda}^0(\lambda T) d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{e\lambda}^0(\lambda T) d\lambda} = \frac{\int_0^{\xi_1} \eta d\xi}{\int_0^{\xi_2} \eta d\xi} = \Psi(\xi_2) - \Psi(\xi_1),$$

где $\Psi(\xi_1)$, $\Psi(\xi_2)$ – функции $\Psi(\xi_i) = \int_0^{\xi_i} \eta d\xi / \int_0^{\infty} \eta d\xi$.

3.2. Законы излучения реального тела

Основные законы и формулы

Коэффициенты излучения:

$$\varepsilon_e(\lambda T) = M_{e\lambda}(\lambda T) / M_{e\lambda}^0(\lambda T) = \alpha_e(\lambda T) \gamma_e(\lambda T);$$

$$\varepsilon_{eT} = M_{eT} / M_{eT}^0 = \alpha_{eT} \gamma_{eT},$$

где $\varepsilon_e(\lambda T)$ и ε_{eT} – спектральный и интегральный коэффициенты теплового излучения; $\gamma_e(\lambda T)$ и γ_{eT} – спектральный и интегральный коэффициенты почернения.

Коэффициент направленного излучения:

$$\varepsilon_{\varphi eT} = L_{e\varphi} / L_{eL},$$

где L_{eL} – энергетическая яркость реального тела в направлении l при температуре его T, K ; L_{eL}^0 – энергетическая яркость черного тела в направлении l при той же температуре T, K .

Закон Планка

$$M_{\lambda e}(\lambda T) = \varepsilon_{\lambda T} c_1 \lambda^{-5} \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1}.$$

Закон Вина

$$M_{\lambda e}(\lambda T) = \varepsilon_{\lambda T} c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}.$$

Закон Релея – Джинса

$$M_{\lambda e}(\lambda T) = \varepsilon_{\lambda T} \frac{c_1}{c_2} \lambda^{-4} T.$$

Закон Стефана – Больцмана

$$M_e^0(T) = \varepsilon_{\lambda T} \sigma T^4.$$

Эквивалентные температуры излучения реального тела:

$$T = T_p^0 \sqrt[4]{\varepsilon_T},$$

$$T = \frac{c_2}{\lambda} \frac{1}{c_2 / \lambda T_p^0 + \ln \varepsilon_{\lambda T}},$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} - \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1 T} / \varepsilon_{\lambda_2 T})}{c_2(1/\lambda_2 + 1/\lambda_1)},$$

где T_p , $T_{\text{я}}$, $T_{\text{ц}}$, T – радиационная, яркостная, цветовая и истинная температура соответственно.

Задания

3.1. Определите лучистый поток, излучаемый черным телом с площади выходного отверстия $A = 0,5305 \text{ мм}^2$ при температуре за твердевания платины $T = 2042 \text{ К}$.

3.2. Черное тело излучает в минуту $0,13$ кал тепла с поверхности 1 см^2 . Определите температуру черного тела и поверхностную плотность его излучения.

3.3. В результате колебания напряжения в сети температура вольфрамовой нити накала изменяется на $\pm 100 \text{ К}$. Определите, во сколько раз изменится поток, излучаемый нитью. При номинальном напряжении температура нити $T = 2400 \text{ К}$.

3.4. Определите истинную температуру вольфрамовой поверхности, если она имеет энергетическую светимость $M_e = 14,22 \text{ Вт/см}^2$.

3.5. Черное тело нагрето до 6000 К . Определите лучистый поток, излучаемый с поверхности этого тела ($A = 10 \text{ см}^2$) в видимой части спектра ($0,38\text{--}0,78 \text{ мкм}$).

3.6. Черное тело нагрето до 1500 К . Определите поверхностную плотность излучения этого тела в пределах ультрафиолетовой ($0,01\text{--}0,38 \text{ мкм}$), видимой ($0,38\text{--}0,78 \text{ мкм}$) и инфракрасной ($0,78\text{--}350 \text{ мкм}$) частях спектра.

3.7. Определите лучистый поток Φ_e , излучаемый боковой поверхностью вольфрамового цилиндра диаметром $D = 0,2 \text{ мм}$ и длиной $l = 20 \text{ см}$, имеющего яркостную температуру 2207 К ($\lambda = 0,665 \text{ мкм}$).

3.8. Яркостная температура обычно измеряется с красным светофильтром ($\lambda_1 = 665 \text{ нм}$). Определите яркостную температуру вольфрамового цилиндра (см. задачу 3.7) при измерении ее с голубым светофильтром ($\lambda_2 = 467 \text{ нм}$).

3.9. Вольфрамовый куб со стороной, равной 1 мм , имеет цветовую температуру 2874 К . Определите минимальную и максималь-

ную силы излучения, создаваемые этим кубом в плоскости, перпендикулярной грани куба.

3.10. Вольфрамовый шарик диаметром $D = 2$ см создает на горизонтальной поверхности в точке B облученность $0,173 \text{ Вт} \times \text{м}^2$. Определите истинную температуру шарика. Высота расположения шарика над горизонтальной поверхностью $H = 3$ м. Излучение шарика падает в точку B под углом $\alpha = 60^\circ$.

3.11. Определите силу излучения плоского равнояркого вольфрамового диска под углом $\alpha = 45^\circ$, если диаметр диска $D = 10$ мм и его температура $T = 2327$ °С. Угол α отсчитывается от перпендикуляра к поверхности диска. Во сколько раз увеличится сила излучения в направлении α , если диаметр диска увеличить в 10 раз, не изменяя его температуру и толщину. Толщиной диска пренебречь, принимая его за круг.

3.12. Вольфрамовый равнояркий цилиндр диаметром $D = 88$ мкм и длиной $l = 5$ см нагрет до $T = 2800$ К. Определите энергетическую яркость цилиндра и силу излучения в направлении, перпендикулярном оси цилиндра.

3.13. Определите значения спектральной плотности энергетической светимости излучения вольфрама для длин волн $\lambda_1 = 0,555$ мкм и $\lambda_2 = 1$ мкм, если температура вольфрама $T = 1800$ К.

4. ЭФФЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Основные законы и формулы

Эффективный поток приемника, облучаемого:

а) однородным лучистым потоком $\Phi_e(\lambda, d\lambda)$:

$$\Phi_{\text{эф}} = S_{n\lambda} \Phi_e(\lambda, d\lambda) = S_{n, \max} \Phi_e(\lambda, d\lambda) V_{n\lambda};$$

б) сложным лучистым потоком:

$$\Phi_{\text{эф}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda} \Phi_{e\lambda}(\lambda) S_n(\lambda) d\lambda = S_{n, \max} \int_{\lambda_1}^{\lambda} \Phi_e(\lambda) V_n(\lambda) d\lambda,$$

где $S_{n\lambda}$, $S_{n, \max}$, $S_n(\lambda)$ – спектральная чувствительность, максимальная спектральная чувствительность и функция спектральной

чувствительности приемника соответственно; $S_{n\lambda} = C\alpha_{\lambda}\eta_{\lambda}$,
 $V_{n\lambda} = S_{n\lambda} / S_{n,\max}$ где $V_{n\lambda}$ – относительная спектральная чувст-
 вительность приемника; α_{λ} – спектральный коэффициент по-
 глощения приемником однородного потока излучения;
 η_{λ} – энергетический выход преобразования приемником одно-
 родного потока излучения.

Активности излучения:

$$A = \frac{\Phi_{\text{ЭФ}}}{\Phi_{\text{об}}} = \frac{k_{n,\max} \int \Phi_{e\lambda}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{k_{об,\max} \int \Phi_{e\lambda}(\lambda) S_{об}(\lambda) d\lambda},$$

где $k_{n,\max}$ и $k_{об,\max}$ – максимальные чувствительности данного и
 образцового приемников; $s(\lambda)$ и $s_{об}(\lambda)$ – соответственно
 функции относительной спектральной чувствительности данного
 и образцового приемников.

Относительная активность

$$a = \frac{A}{A_{\text{Э}}} = \frac{\int \Phi_{e\lambda}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \Phi_{e\lambda}(\lambda) S_{об}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e\lambda}(\lambda) S_{об}(\lambda) d\lambda \Phi_{e\lambda}(\lambda) S(\lambda) d\lambda},$$

где $\Phi_{\lambda}(\lambda)$, $\Phi_{\text{Э}\lambda}(\lambda)$ - функции спектральной плотности излучения
 источника и эталонного источника (в качестве эталонного источ-
 ника часто используется источник с $T_u = 5000$ К).

4.1. Световые характеристики излучения

Основные законы и формулы

Относительная спектральная чувствительность органа днев-
 ного и ночного зрения (относительная спектральная световая эффек-
 тивность):

$$V_{\lambda} = k_{\lambda} / k_{\max}; \quad V'_{\lambda} = k'_{\lambda} / k'_{\max}.$$

Максимальная спектральная чувствительность дневного зрения:

$$(k_{\lambda})_{\max} = k_{\max} = 683 \text{ лм/Вт}; \lambda_{\max} = 555 \text{ нм.}$$

Максимальная спектральная чувствительность ночного зрения:

$$k'_{\max} = 1700 \text{ лм/Вт}; \lambda'_{\max} = 505 \text{ нм.}$$

Световая эффективность излучения при дневном зрении, лм/Вт:

$$k = \frac{\Phi}{\Phi_e} = \frac{k_{\max} \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda},$$

где $\lambda_1 = 380 \text{ нм}$, $\lambda_n = 780 \text{ нм}$.

Относительная световая эффективность сложного излучения:

$$V = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{k}{k_{\max}}.$$

Световая эффективность излучения при ночном зрении, лм/Вт:

$$k' = \frac{\Phi'}{\Phi_e} = \frac{k'_{\max} \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}.$$

Световой поток однородного излучения при дневном зрении, лм:

$$\Phi(\lambda, d\lambda) = 683 \Phi_e(\lambda, d\lambda) V_{\lambda}.$$

Световой поток однородного излучения при ночном зрении, лм:

$$\Phi(\lambda, d\lambda) = 1700 \Phi_e(\lambda, d\lambda) V'_{\lambda}.$$

Световой поток источников с линейчатым (а) и сплошным (б) спектром при дневном зрении, лм:

$$а) \Phi(\lambda, d\lambda) = k_{\max} \sum_{i=1}^n \Phi_e(\lambda_i, d\lambda),$$

$$б) \Phi(\lambda, d\lambda) = k_{\max} \sum_{i=1}^n \Phi_{e\lambda}(\lambda) \Delta\lambda,$$

где $\Phi_e(\lambda_i, d\lambda)$ – лучистый поток i -й линии спектра; $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – среднее значение спектральной плотности лучистого потока i -го участка спектра шириной $\Delta\lambda$.

Сила света в направлении α , кд,

$$I_\alpha = d\Phi / d\Omega.$$

Яркость в направлении α , кд/м²:

$$L_\alpha = \frac{dI_\alpha}{dA \cos \alpha}; \quad L_\alpha = \frac{I_\alpha}{\sigma}; \quad L = \frac{I_\alpha}{A \cos \alpha}; \quad L = \frac{dE_n}{d\Omega},$$

где dA – элемент излучающей поверхности; A – участок поверхности плоского точечного источника; σ – проекция точечного источника на плоскость, перпендикулярную направлению l ; α – угол, определяющий положение направления l ; $d\Omega$ – телесный угол; dE_n – нормальная освещенность в вершине телесного угла $d\Omega$, в пределах которого расположен элемент dA излучающей поверхности.

Яркость пучка лучей, кд/м²:

$$L_{12} = \Delta\Phi / \Delta G,$$

где $\Delta\Phi$ – световой поток пучка лучей; ΔG – мера множества пучка лучей,

$$\Delta G = \frac{\Delta A_1 \cos \alpha_1 \Delta A_2 \cos \alpha_2}{l_{12}^2},$$

$$d^2G = \cos \alpha_1 dA_1 d\Omega_1.$$

Светимость, лм/м²:

$$M = d\Phi / dA, \quad M_{cp} = \Phi / A,$$

где dA и A – элемент и участок **излучающей** поверхности.

Освещенность, лм / м² (лк):

$$E = d\Phi / dA, \quad E_{cp} = \Phi / A, \quad E = (I_1 / l^2) \cos \alpha,$$

где dA и A – элемент и участок **освещаемой** поверхности.

Экспозиция, лк×с,

$$H = \int_{t_1}^{t_n} E_t dt, \quad H = E \cdot t,$$

где E_t и E – мгновенное и постоянное значения освещенности;
 t_1 и t_n – время начала и конца освещения участка поверхности.

4.2. Бактерицидные характеристики излучения

Основные законы и формулы

Бактерицидный поток, бк,

$$\Phi_{\bar{\sigma}\kappa} = \int_{\lambda_1 = 200 \text{ нм}}^{\lambda = 480 \text{ нм}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V_{\bar{\sigma}\kappa}(\lambda) d\lambda,$$

где $V_{\bar{\sigma}\kappa}(\lambda)$ – функция относительной спектральной бактерицидной эффективности; $\Phi_{\bar{\sigma}\kappa} = 1$ Вт лучистого потока при $\lambda = 254$ нм.

Бактерицидная энергия, бк×ч, $Q = \Phi_{\bar{\sigma}\kappa} t$.

Бактерицидная эффективность, бк/Вт, $S_{\bar{\sigma}\kappa} = \Phi_{\bar{\sigma}\kappa} / \Phi_e$.

Сила бактерицидного излучения, бк/ср, $I_{\alpha \bar{\sigma}\kappa} = d\Phi_{\bar{\sigma}\kappa} / d\Omega$.

Бактерицидная яркость $L_{\bar{\sigma}\kappa} = dI_{\bar{\sigma}\kappa} / dA \cos \alpha$.

Бактерицидная экспозиция, бк×ч/м², $H = E t$.

Бактерицидная облученность, бк/м², $E_{\bar{\sigma}\kappa} = d\Phi_{\bar{\sigma}\kappa} / dA$.

4.3. Витальные характеристики излучения

Основные законы и формулы

Витальный (эритемный) поток, вит,

$$\Phi_{\text{вит}} = \int_{\lambda_1 = 280 \text{ нм}}^{\lambda = 400 \text{ нм}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) S_{\text{вит}}(\lambda) d\lambda.$$

1 вит равен 1 Вт лучистого потока при $\lambda = 297$ нм.

$V_{\text{вит}}(\lambda)$ – функция относительной витальной эффективности излучения (приведена в прил.8).

Витальная энергия $Q_{\text{вит}} = \Phi_{\text{вит}} t$.

Витальная эффективность, вит/Вт,

$$S_{\text{вит}} = \Phi_{\text{вит}} / \Phi_e$$

Сила витального излучения, вит/ср,

$$I_{\text{вит}} = \frac{d\Phi_{\text{вит}}}{d\Omega}$$

Витальная яркость, вит/(ср·м²),

$$L_{e\text{вит}} = \frac{dI_{\text{вит}}}{A \cos \alpha}$$

Витальная экспозиция, вит×ч/м²,

$$H_{\text{вит}} = \int_0^t E_{\text{вит}} dt,$$

$$H_{\text{вит}} = E_{\text{вит}} \cdot t$$

Витальная облученность, вит/м²,

$$E_{\text{вит}} = d\Phi_{\text{вит}} / dA$$

Задания

4.1. Лучистый поток монохроматического излучения $\Phi_e(\lambda, d\lambda) = 10$ Вт. Определите световой поток этого излучения, если $\lambda = 700$ нм.

4.2. Лучистые потоки монохроматических излучений по 100 Вт каждый с длиной волны $\lambda_1 = 400$ нм, $\lambda_2 = 555$ нм и $\lambda_3 = 740$ нм испускает источник с линейчатым спектром. Определите световые потоки этих излучений.

4.3. Две плоские белые пластинки, имеющие одинаковые площади и один и тот же коэффициент отражения, облучаются потоком с длиной волны $\lambda_1 = 0,46$ мкм и потоком с длиной волны

$\lambda_2 = 0,55$ мкм. Каким должно быть отношение лучистых потоков, падающих на освещаемые пластинки, для равносветлого восприятия в условиях дневного и ночного зрения? Значения относительных спектральных световых эффективностей для ночного зрения $V'_{\lambda_1} = 0,42$ и $V'_{\lambda_2} = 0,50$.

4.4. Две одинаковые грани белой призмы (рис. 4.1) облучаются однородными лучистыми потоками $\Phi_e(\lambda_1, d\lambda)$ и $\Phi_e(\lambda_2, d\lambda)$ и имеют одинаковые яркости и условия дневного зрения. Если $\Phi_e(\lambda_1, d\lambda) = 10$ Вт ($\lambda_1 = 0,5$ мкм и $\lambda_2 = 0,45$ мкм), то чему равен поток $\Phi_e(\lambda_2, d\lambda)$?



Рис. 4.1

4.5. Даны монохроматические световые потоки $\Phi_e(\lambda_1, d\lambda) = \Phi_e(\lambda_2, d\lambda) = \Phi_e(\lambda, d\lambda) = 680$ лм. Определите лучистые потоки этих излучений, если $\lambda_1 = 0,390$ мкм, $\lambda_2 = 0,555$ мкм, $\lambda_3 = 0,760$ мкм.

4.6. Источник монохроматического излучения с длиной волны $\lambda_1 = 680$ нм излучает постоянный по значению световой поток. Определите, какие монохроматические источники с какими длинами волн будут излучать такие же световые потоки, а лучистые потоки – в 10 раз большие по значению.

4.7. Два монохроматических источника излучают одинаковые световые потоки с длинами волн $\lambda_1 = 0,555$ мкм и $\lambda_2 = 0,65$ мкм. Определите отношение лучистых потоков этих источников.

4.8. Определите световой поток, излучаемый черным телом в интервале длин волн от $\lambda_1 = 0,525$ мкм до $\lambda_2 = 0,575$ мкм. Площадь

поверхности излучателя $A = 0,5 \text{ см}^2$, температура излучателя $T=2400 \text{ К}$.

4.9. Определите световой поток, излучаемый вольфрамовым цилиндром, в интервале длин волн от $\lambda_1 = 0,525 \text{ мкм}$ до $\lambda_2 = 0,575 \text{ мкм}$. Поверхность излучателя равна $A = 0,5 \text{ см}^2$, его температура $T=2400 \text{ К}$.

4.10. Определите световую отдачу (в %) некоторых источников света, если: а) лампа накаливания мощностью 100 Вт при напряжении 110 В имеет световой поток $\Phi = 2000 \text{ лм}$; б) лампа накаливания мощностью 15 Вт при напряжении 220 В имеет световую отдачу $\eta = 7 \text{ лм/Вт}$; в) лучшие люминесцентные лампы имеют световую отдачу $\eta = 80 \text{ лм/Вт}$; г) опытные образцы натриевых ламп имеют световую отдачу $\eta = 150 \text{ лм/Вт}$; д) кварцевая трубчатая галогенная лампа КГ-220-1000 мощностью 100 Вт имеет световой поток $\Phi = 22000 \text{ лм}$.

4.11. Черное тело при температуре $T= 6000 \text{ К}$ имеет световую отдачу излучения $\eta = 12,6 \%$. Определите его яркость при этой температуре.

4.12. Равнояркий цилиндр излучает в видимой части спектра монохроматический световой поток $\Phi(\lambda, d\lambda) = 6830 \text{ лм}$ ($\lambda = 0,59 \text{ мкм}$). Диаметр цилиндра $D=20 \text{ см}$, его длина $l=50 \text{ см}$. Определите лучистую яркость цилиндра, если излучает только боковая поверхность его.

4.13. Равнояркий шар излучает световой поток $\Phi=1257 \text{ лм}$. Определите яркость шара, если его диаметр $D=10 \text{ см}$.

4.14. Определите светимость равнояркого круга с площадью $A=10 \text{ см}^2$, излучающего в перпендикулярном к поверхности круга направлении силу света $I = 100 \text{ кд}$.

4.15. Определите телесный угол, в пределах которого заключена половина светового потока, излучаемого равноярким кругом.

4.16. Равнояркий диск диаметром $D = 2 \text{ см}$ излучает световой поток $\Phi = 41,7 \text{ лм}$ в пределах телесного угла $\Omega = 1 \text{ ср}$. Ось телесного угла совпадает с перпендикуляром к плоскости диска, проведенным

из его центра. Определите яркость диска и световой поток, излучаемый одной стороной диска. Толщиной диска пренебречь.

4.17. Точечный источник света, помещенный в центр полого шара с диаметром $D = 1$ м, создает на участке его поверхности $\Delta A = 4 \text{ см}^2$ освещенность $E = 400$ лк. Определите силу света источника в направлении центра площадки ΔA и яркость внутренней поверхности шара с коэффициентом отражения $\rho_{ш} = 0,78$.

4.18. Шаровой точечный источник света излучает монохроматический световой поток $\Phi(\lambda, d\lambda) = 1360$ лм с длиной волны 500 нм. Определите энергетическую яркость, силу излучения этого источника и направление в пространстве, которому соответствует найденная сила излучения.

4.19. В центре шара, внутренний диаметр которого 2 м, а коэффициент отражения $\rho = 0,7$, помещен шаровой точечный источник света, излучающий монохроматические лучистые потоки: $\Phi_e(\lambda_1, d\lambda) = \Phi_e(\lambda_2, d\lambda) = 100$ Вт; $\lambda_1 = 433$ нм; $\lambda_2 = 644$ нм. Определите освещенность участка внутренней поверхности шара $\Delta A = 100 \text{ см}^2$, световой поток, падающий на этот участок, и яркость внутренней поверхности шара: 1) с учетом, 2) без учета многократных отражений, принимая эту поверхность равномерно диффузно отражающей свет.

4.20. Светильник (глубокоизлучатель эмалированный – Гэ) с лампой 1000 лм имеет указанное ниже светораспределение:

α град	0	5	15	25	35	45	55	60	75	85
I_{α} , кд	263	269	259	237	215	179	91	30	12	1

Определите световой поток этого светильника.

4.21. Люминесцентная лампа типа ЛДЦЗО мощностью 30 Вт имеет световой поток $\Phi = 1450$ лм. Светящая часть лампы – цилиндр диаметром 2,5 см и длиной 88 см. Принимая излучающую поверхность лампы равной в продольных плоскостях, определите поверхностную плотность светового потока, яркость и силу света, излучаемую лампой в направлении, перпендикулярном оси лампы.

4.22. В безоблачный летний полдень на $41,5^{\circ}$ северной широты на уровне моря Солнце и безоблачное небо создают следующие спектральные значения облученностей участками спектра $\Delta\lambda = 10$ нм:

$\Delta\lambda$, нм	$E_e(\lambda, d\lambda)$, 10^{-4} мкВт / м ²		
	Солнце	Небо	Суммарная облученность
295	2,2	2,2	4,4
305	20,0	20,0	40,0
315	84,0	78,0	1620
325	180,0	160,0	340,0
335	240,0	200,0	440,0
345	290,0	230,0	520,0
355	340,0	260,0	600,0
365	380,0	280,0	660,0
375	380,0	280,0	660,0
385	380,0	320,0	800,0

Определите бактерицидный поток, падающий на участок поверхности земли $A = 10$ м².

4.23. Определите бактерицидный и витальный потоки, излучаемые лампой типа ДРТ1000 на участке спектра от $\lambda_1 = 248,3$ нм до $\lambda_2 = 269,2$ нм. На этом участке лампа имеет линейчатый спектр. Монохроматические лучистые потоки этого участка лампы типа ДРТ1000 приведены ниже:

λ , нм	248,3	253,7	265,2	269,2
$\Phi_e(\lambda, d\lambda)$, Вт	7,2	12,4	3,75	3,75

4.24. Излучающая часть поверхности лампы типа ДРТ375 имеет форму цилиндра с диаметром 20 мм и длиной 100 мм. Лучистый, витальный и бактерицидный потоки этой лампы имеют следующие значения: $\Phi_e = 87,5$ Вт, $\Phi_{вит} = 10$ вит, $\Phi_{бак} = 10$ бк. Принимая эту лампу за равнояркий излучатель, определите яркости этой лампы: а) лучистую, б) витальную, в) бактерицидную.

4.25. Лампа типа ДРТ1000, излучающей поверхностью которой является боковая поверхность цилиндра с диаметром 30 мм и образующей – 318 мм, излучает потоки: лучистый $\Phi_e = 303$ Вт, ви-

тальный $\Phi_{\text{вит}}=112$ вит и бактерицидный $\Phi_{\text{бак}}=136$ бк. Определите горизонтальные и максимальные облученности, создаваемые этими потоками в точке B (рис. 4.2), если $H=2$ м, $a=1$ м.

4.26. Лампа ДРТ1000 расположена относительно точек O и B , лежащих в плоскости, перпендикулярной оси лампы (рис. 4.2), $H=0,5$ м, $a=0,5$ м. Краткое описание лампы дано в задаче 4.5. Определите витальные горизонтальные и максимальные облученности в этих точках, принимая лампу за разные источники излучения: а) точечный, б) протяженный равномерный. Определите относительную погрешность, которая возникает, если принимать лампу за точечный источник излучения.

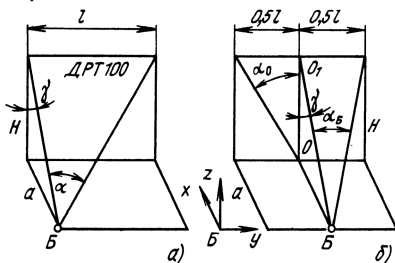


Рис. 4.2

4.27. В летний полдень небосвод создает бактерицидную облученность в горизонтальной плоскости на земле $E_{\text{бак.гор}}=2,3 \cdot 10^{-4}$ мкбк. Определите: а) бактерицидную яркость небосвода, считая его равномерным, б) вертикальную бактерицидную облученность в той же точке.

4.28. Определите активничность и относительную активничность излучения черного тела с температурой 2600 К для пленки, относительная спектральная эффективность которой приведена ниже:

λ , нм	420	440	460	480	500	520	540	560
$V_n(\lambda)$	0,84	1,0	0,8	0,18	0,05	0,08	0,08	0,1
λ , нм	580	600	620	640	660	680	700	---
$V_n(\lambda)$	0,11	0,12	0,13	0,1	0,08	0,6	0,02	---

За образцовый приемник принимается глаз в условиях дневного зрения.

4.29. Киносъемка производится на панхроматическую пленку. Освещенность объекта съемки $E = 1000$ лк при освещении лампами накаливания со световой отдачей $\eta = 21$ лм/Вт. Определите необходимую освещенность при освещении объекта съемки ртутными лампами со световой отдачей $\eta = 37$ лм/Вт, если относительные активности соответственно равны: $a_1 = 0,76$, $a_2 = 2,49$.

5. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛ

Основные законы и формулы

$$\rho_\lambda = \frac{\Phi_e(\lambda, d\lambda)_\rho}{\Phi_e(\lambda, d\lambda)}; \quad \tau_\lambda = \frac{\Phi_e(\lambda, d\lambda)_\tau}{\Phi_e(\lambda, d\lambda)}; \quad \alpha_\lambda = \frac{\Phi_e(\lambda, d\lambda)_\alpha}{\Phi_e(\lambda, d\lambda)};$$

$$\rho_\lambda + \tau_\lambda + \alpha_\lambda = 1,$$

где $\Phi_e(\lambda, d\lambda)$ – монохроматический лучистый поток, падающий на тело; $\Phi_e(\lambda, d\lambda)_\rho$, $\Phi_e(\lambda, d\lambda)_\tau$, $\Phi_e(\lambda, d\lambda)_\alpha$ – монохроматические лучистые потоки отраженные, пропущенные и поглощенные телом.

Интегральные коэффициенты отражения, пропускания и поглощения лучистого потока:

$$\rho_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d(\lambda)}; \quad \tau_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d(\lambda)};$$

$$\alpha_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d(\lambda)},$$

где $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$ – соответственно функции спектральных коэффициентов отражения, пропускания и поглощения излучения.

Интегральные коэффициенты отражения, пропускания и поглощения светового потока:

$$\rho = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \rho(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d(\lambda)} ; \quad \tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \tau(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d(\lambda)} ;$$

$$\alpha = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \alpha(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d(\lambda)} ,$$

где $\lambda_1 = 380$ нм, $\lambda_n = 780$ нм; $V(\lambda)$ – функция относительной спектральной световой эффективности.

Коэффициент яркости в направлении

$$\beta_l = L_l / L_u ,$$

где L_l – яркость в направлении l ; L_u – яркость поверхности с равномерно-диффузным отражением и коэффициентом отражения $\rho = 1$, находящейся в тех же условиях.

Коэффициент лучистой яркости в направлении α

$$\beta_{e\alpha} = L_{e\alpha} / L_{eu} ,$$

где $L_{e\alpha}$ – лучистая яркость поверхности в направлении α ; L_{eu} – то же, но поверхность с равномерно-диффузным отражением.

Коэффициент яркости поверхности с диффузным (направленно-рассеянным) отражением в направлении α_i (направленно-рассеянным), с отражением в направлении α_i (индикатриса рассеивания вытянутый эллипс).

$$\beta_{\alpha_i} = \frac{C \operatorname{Atg} \alpha_i}{\cos \alpha \left[A^2 (1 - p^2) \sin^2 \alpha_i + p^2 \right]} ,$$

где $p = a/b$; a и b – большая и малая полуоси индикатрисы рассеивания; $A = \cos \theta \sin \alpha_i + \operatorname{ctg} \alpha_i \cos \alpha$, C – константа; α_i и

θ – углы (рис. 5.1), определяющие направление l_i , в котором описывается коэффициент яркости; α – угол падения света на образец.

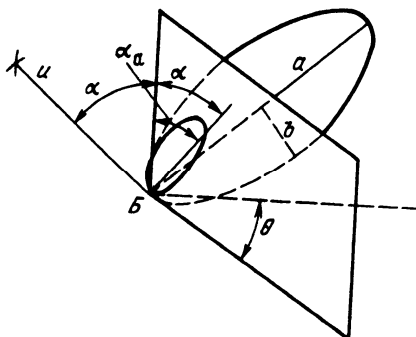


Рис. 5.1

При $\theta = 0^\circ$ и $\alpha_i = \alpha$, $A_1 = 1/\sin\delta$, $C = L_{\delta} p \cos^2 \delta / E$,
где E – освещенность образца; L_{δ} – яркость образца в направлении
зеркального отражения.

При $\theta \neq 0^\circ$ и $\alpha_i \neq \alpha$, $A_2 = \cos(\alpha_i - \alpha) / \sin \alpha_i$

$$p = \sqrt{\frac{[L_a \cos \alpha - L_{a_i} \cos \alpha_i \cos(\alpha_i - \alpha)] \cos(\alpha_i - \alpha)}{L_{a_i} \cos \alpha_i \sin^2(\alpha_i - \alpha)}}$$

где L_a – яркость образца в направлении зеркального отражения;

L_{a_i} – яркость образца в произвольном направлении, опреде-

ляемом углами $\theta = 0^\circ$, $\alpha_i \neq \alpha$.

Коэффициент многократных отражений

$$\gamma = \frac{1}{1 - \rho(1 - u_{12})}$$

где ρ – коэффициент отражения; u_{12} – коэффициент использова-
ния потока, отраженного от первой поверхности относительно
второй поверхности.

Прохождение света через границу двух сред (диэлектриков):

$$\sin i / \sin j = n_2 / n_1;$$

$$n_1 \sin i = n_2 \sin j,$$

где i – угол падения; j – угол преломления; n_1, n_2 – показатели преломления первой и второй среды.

Инвариант Штраубеля

$$n_1^2 d^2 G_1 = n_2^2 d^2 G_2,$$

где $d^2 G_1$ и $d^2 G_2$ – соответственно меры множества пучка лучей в первой и второй средах.

Отражение пучка лучей от гладкой поверхности диэлектрика:

$$\rho_{i0} = [(1 - n_{21}) / (1 + n_{21})]^2,$$

где n_{21} – показатель преломления второй среды относительно первой, $n_{21} = \sin i / \sin j$; ρ_{i0} – коэффициент отражения для пучка лучей, падающих перпендикулярно на поверхность диэлектрика; i – угол падения света; j – угол преломления света.

Коэффициент отражения для плоскополяризованного света, у которого вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости падения света,

$$\rho_{\perp} = \sin^2(i - j) / \sin^2(i + j).$$

Коэффициент отражения плоскополяризованного света, у которого вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости падения света,

$$\rho_{\parallel} = \operatorname{tg}^2(i - j) / \operatorname{tg}^2(i + j).$$

Коэффициент отражения естественного пучка лучей, падающего под углом i ,

$$\rho = 0,5 \left[\sin^2(i - j) / \sin^2(i + j) + \operatorname{tg}^2(i - j) / \operatorname{tg}^2(i + j) \right],$$

$$\Delta\rho = (\rho_{\perp} - \rho_{\parallel}) / (\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}),$$

где $\Delta\rho$ – степень поляризации отраженного пучка лучей.

Угол падения, при котором отраженный луч полностью поляризован (i_B – угол Брюстера), может быть определен из уравнения

$$\operatorname{tg} i_B = n_2 / n_1.$$

Степень поляризации преломленного пучка лучей

$$\Delta_{II} = \Delta_{0\rho} / (1 - \rho).$$

Степень поляризации пучка лучей, прошедшего через стопу прозрачных пластин,

$$\Delta_{\tau} = m / \left[m + 2n_c / (1 - n_c^2) \right]^2,$$

здесь n_c – показатель преломления стекла пластины; m – число пластин в стопе.

Показатель преломления просветляющей пленки

$$n_{II} = \sqrt{n_c n_v},$$

где n_v – показатель преломления воздуха.

Оптическая толщина пленки

$$l_{II} = dn_{II} = (2N - 1)\lambda / 4,$$

где d – геометрическая толщина пленки; N – любое целое положительное число.

Коэффициент пропускания слоя вещества толщиной l

$$\tau = e^{-\mu' l} = 10^{-\mu l},$$

где l – длина пути луча в веществе, м; μ' – натуральный показатель ослабления, м^{-1} ; μ – десятичный показатель ослабления, м^{-1} ,

$$\mu = \chi + \sigma,$$

здесь χ и σ – соответственно десятичные показатели поглощения и рассеивания; $\chi = 0,434 \chi'$; $\mu = 0,434 \mu'$.

Прозрачность вещества

$$\tau' = e^{-\mu l_1} = 10^{-\mu l_1},$$

здесь l_1 – длина пути луча, равная 1 м.

Оптическая плотность слоя вещества

$$D = \lg(l/\tau),$$

где τ – коэффициент пропускания слоя вещества.

Коэффициент пропускания эффективного потока светофильтра

$$\tau_3 = \frac{\int \Phi_{e\lambda}(\lambda) \tau(\lambda) k(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e\lambda}(\lambda) k(\lambda) d\lambda} = \frac{\int \Phi_{e\lambda}(\lambda) \tau(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda},$$

где $k(\lambda)$ – функция спектральной чувствительности приемника;

$V(\lambda)$ – функция относительной спектральной чувствительности приемника.

Эффективная оптическая плотность светофильтра

$$D_3 = \lg(l/\tau_3).$$

Кратность светофильтра

$$\beta = l/\tau_3, \quad D_3 = \lg \beta, \quad \beta = l/\tau = (\tau')^{-l},$$

где τ' – прозрачность нейтрального светофильтра; l – толщина светофильтра, мм.

Задания

5.1. Участок поверхности с равномерно диффузным отражением имеет коэффициент отражения $\rho = 0,8$ и освещенность $E = 3140$ лк. Определите коэффициент яркости этого участка.

5.2. Участок зеркальной плоской поверхности имеет коэффициент зеркального отражения $\rho_3 = 0,8$ и освещенность $E = 3140$ лк. Определите коэффициент яркости в направлении зеркального отражения, если яркость источника света в направлении к центру участка $L = 3,14 \cdot 10^6$ кд/м².

5.3. Образец (участок плоской поверхности) с диффузным (направленно-рассеивающим) отражением имеет следующие параметры: $\rho = 36$, $c = 132$. Образец освещается точечным источником света, угол падения света на образец $\alpha = 30^\circ$. Определите коэффи-

циенты яркости его в направлениях: 1) $\alpha_1 = 30^\circ$, $\theta_1 = 0$;
2) $\alpha_2 = 30^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$; 3) $\alpha_3 = 30^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$.

5.4. Условия освещения и образец тот же, что и в предшествующей задаче. Освещенность образца $E = 200$ лк. Определите яркость этого образца в направлениях: 1) $\alpha_1 = \alpha = 30^\circ$, $\theta = 0$;
2) $\alpha_2 = \alpha = 30^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$; 3) $\alpha_3 = \alpha = 30^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$.

5.5. Равнояркий цилиндр, у которого светится вся поверхность, имеет яркость $L = 10^5$ кд/м² и расположен, как показано на рис. 5.2. 1. Определите коэффициент яркости в направлении θ участка горизонтальной плоскости, лежащего в окрестностях точки Б, если яркость его $L_0 = 0,5$ кд·м⁻². 2. Чему будет равен коэффициент яркости этого участка в том же направлении, если ось цилиндра расположить горизонтально в плоскости рисунка, не изменяя положения центра цилиндра? При этом размеры (см. рис. 5.2): $H = 1$ м, $l = 2$ м, $D = 2,5$ см, $h = 6$ см.

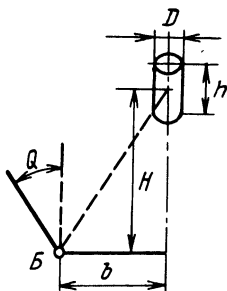


Рис. 5.2

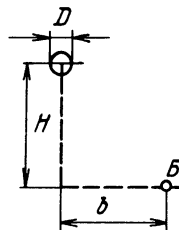


Рис. 5.3

5.6. Равнояркий шар диаметром $D = 50$ см освещает зеркало, расположенное горизонтально в окрестностях точки Б (рис. 5.3). Определите коэффициент яркости в направлении зеркального отражения, если измеренная в этом направлении яркость зеркала $L_3 = 800$ кд·м⁻²; коэффициент отражения зеркала $\rho = 0,6$, $H = 3$ м и $l = 2$ м.

5.7. Образец с диффузным (направленно-рассеянным) отражением освещается точечным источником, угол падения света на образец $\alpha = 30^\circ$. Измерена яркость образца в направлениях зеркального отражения: 1) $\alpha_1 = 30^\circ$, $\theta_1 = 0$, $L_{\alpha_1\theta_1} = 5000$ кд·м⁻²; 2) $\alpha_2 = 45^\circ$, $\theta_2 = 0$, $L_{\alpha_2\theta_2} = 600$ кд/м². Освещенность образца $E = 200$ лк. Определите параметры образца c и p .

5.8. Определите яркость образца, описанного в предыдущей задаче 5.7, в направлениях: 1) $\alpha_3 = 45^\circ$, $\theta_3 = 45^\circ$; 2) $\alpha_4 = 45^\circ$, $\theta_4 = 90^\circ$.

5.9. Образец с диффузным отражением освещается точечным источником света. Угол падения света на образец $\alpha = 30^\circ$. Освещенность образца $E = 314$ лк. Параметры образца $p = 3$, $c = 0,5$. Определите яркость образца в направлениях: 1) $\alpha_1 = 30^\circ$, $\theta_1 = 0$; 2) $\alpha_2 = 30^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$; 3) $\alpha_3 = 30^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$.

5.10. Образец с диффузным отражением освещается точечным источником света. Угол падения света $\alpha = 45^\circ$. Освещенность поверхности образца $E = 500$ лк. Параметры образца $p = 14$. Яркость образца в направлении $\alpha_1 = \alpha$, $\theta_1 = 0^\circ$, $L_{\alpha_1\theta_1} = 10\,000$ кд. Определите яркость образца в направлениях: 1) $\alpha_2 = 0$, $\theta_2 = 0$; 2) $\alpha_3 = 45^\circ$, $\theta_3 = 45^\circ$.

5.11. На внутреннюю поверхность конуса $A_1 = 0,8$ м² с равномерно-диффузным отражением и коэффициентом $\rho_1 = 0,7$ падает световой поток $\Phi = 2000$ лм. Площадь основания конуса $A_1 = 0,2$ м², $\tau_2 = 1$. Определите яркость внутренней поверхности конуса и освещенность основания конуса.

5.12. На внутреннюю поверхность равной полусферы с коэффициентом отражения $\rho = 0,8$ падает световой поток $\Phi' = 2720$ лм. Внутренний диаметр полусферы $D = 1$ м. Коэффициент пропускания основания полусферы $\tau = 1$. Определите освещенность в центре основания полусферы с учетом многократных отражений и яркость поверхности полусферы.

6. СВЕТОВОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

А. Ортогональные проекции светового вектора в точке Б (рис. 6.1, а)

$$\varepsilon_x = \frac{I_\alpha}{l^3} x; \quad \varepsilon_y = \frac{I_\alpha}{l^3} y; \quad \varepsilon_z = \frac{I_\alpha}{l^3} z.$$

Ортогональные проекции светового вектора в точке Б поля точечных излучателей:

$$\varepsilon_x = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_x)_i; \quad \varepsilon_y = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_y)_i; \quad \varepsilon_z = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_z)_i,$$

где $(\varepsilon_x)_i, (\varepsilon_y)_i, (\varepsilon_z)_i$ - ортогональные проекции светового вектора,

создаваемые в точке Б i -м точечным излучателем.

Модуль светового вектора в точке Б

$$\varepsilon_B = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2}.$$

Косинусы направляющих углов светового вектора в точке Б. Индексы x, y, z в обозначениях средних цилиндрических освещенностей указывают ту координатную ось, с которой совпадает ось элементарного цилиндра; x_1, y_1, H - координаты положения точечного источника.

$$\cos \beta_x = \varepsilon_x / \varepsilon; \quad \cos \beta_y = \varepsilon_y / \varepsilon; \quad \cos \beta_z = \varepsilon_z / \varepsilon.$$

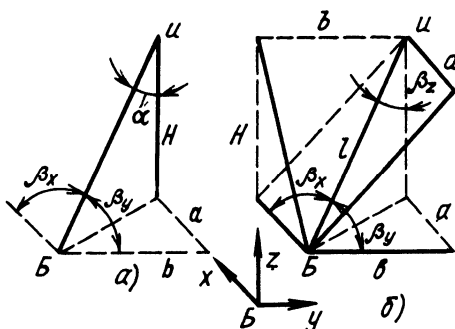


Рис. 6.1

Б. Средние цилиндрические освещенности в точке Б (рис.6.1, б)

$$\varepsilon_{yx} = \frac{I_\alpha}{\pi l^3} \sin \beta_x; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{I_\alpha}{\pi l^3} \sin \beta_y; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{I_\alpha}{\pi l^3} \sin \beta_z.$$

$$\sin \beta_x = \sqrt{H^2 + b^2} / l; \quad \sin \beta_y = \sqrt{H^2 + a^2} / l;$$

$$\sin \beta_z = \sqrt{H^2 + b^2} / l; \quad l = \sqrt{H^2 + a^2 + b^2}.$$

В. Средняя сферическая освещенность в точке Б

$$E_{4\pi} = I_\alpha / 4l^2 = 0.25E_H,$$

где E_H - нормальная (максимальная) освещенность в точке Б светового поля точечного источника света.

Г. Средняя полусферическая освещенность в точке Б всегда описывается выражением

$$E_{2\pi} = E_{4\pi} I_\alpha + 0.25E,$$

где E – освещенность плоскости основания полусферы.

Ориентация средней полусферической освещенности определяется положением перпендикуляра к внутренней стороне плоскости основания. Средние полусферические освещенности с ориентациями вдоль координатных осей:

$$E_{2\pi x} = E_{4\pi} + 0.25\varepsilon_x; \quad E_{2\pi y} = E_{4\pi} + 0.25\varepsilon_y;$$

$$E_{2\pi z} = E_{4\pi} + 0.25\varepsilon_z.$$

6.1. Поле линейного излучателя

Светораспределение в продольной плоскости элемента поверхности линейного излучателя длиной dy

$$dI_{\alpha\gamma} = I_\gamma \cos^N \alpha dy.$$

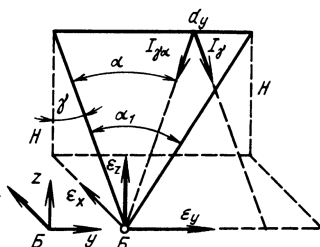


Рис.6.2

А. Проекции светового вектора в точке Б (рис. 6.2):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xN} &= \frac{I_\gamma \sin \gamma \cos \gamma}{H} \int_0^{\alpha_1} \cos^{N+1} \alpha d\alpha = \frac{I_\gamma}{H} \varepsilon'_{xN}; \\ \varepsilon_{yN} &= \frac{I_\gamma \cos \gamma}{H} \int_0^{\alpha_1} \cos^N \alpha \sin \alpha d\alpha = \frac{I_\gamma}{H(N+1)} (1 - \cos^{N+1} \alpha_1); \\ \varepsilon_{zN} &= \frac{I_\gamma \cos^2 \gamma}{H} \int_0^{\alpha_1} \cos^{N+1} \alpha d\alpha = \frac{I_\gamma}{H} \varepsilon'_{zN},\end{aligned}$$

где I_γ – сила света линейного излучателя длиной 1 м в поперечной плоскости по направлению γ ; α_1 – угол, под которым видна светящая линия из точки Б; γ – плоский угол, образованный перпендикуляром к светящейся части поверхности линейного источника и линией l_1 ; l_1 – отрезок прямой, соединяющей точку Б с точкой пересечения оси линейного источника с плоскостью, проходящей через точку Б и перпендикулярную оси линейного источника; H – высота расположения линейного источника над точкой Б.

Б. Средние цилиндрические освещенности в точке Б:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{цхN}} &= \frac{I_\gamma \cos \gamma}{H} \int_0^{\alpha_1} \cos \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \alpha} d\alpha = \frac{I_\gamma}{H} E'_{\text{цхN}}; \\ \varepsilon_{\text{цzN}} &= \frac{I_\gamma \cos \gamma}{\pi H} \int_0^{\alpha_1} \cos^N \alpha \sqrt{1 - \cos^2 \gamma \cos^2 \alpha} d\alpha = \frac{I_\gamma}{H} E'_{\text{цzN}}.\end{aligned}$$

В. Средняя сферическая освещенность в точке Б:

$$E_{4\pi N} = \frac{I_\gamma \cos \gamma}{4H} \int_0^{\alpha_1} \cos^N \alpha d\alpha.$$

Г. Средние полусферические освещенности с ориентациями вдоль координатных осей:

$$E_{2\pi xN} = E_{4\pi N} + 0.25\varepsilon_{xN}; \quad E_{2\pi yN} = E_{4\pi N} + 0.25\varepsilon_{yN};$$

$$E_{2\pi zN} = E_{4\pi N} + 0.25\varepsilon_{zN}.$$

Поле линейного излучателя (пример)

Линейный источник с светораспределением $dI_{\gamma\alpha} = I_\gamma \cos^N \alpha d\alpha$ расположен, как показано на рис. 6.3. В этом случае все характери-

стики светового поля определяются разностью между значениями характеристик поля линейного источника длиной \overline{ab} и характеристик поля линейного источника с длиной $\overline{a'b}$.

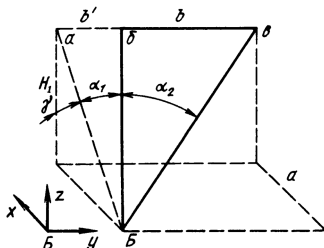


Рис. 6.3

Например, проекция светового вектора на ось x линейного источника с длиной $\overline{b'b}$

$$\varepsilon_{xN} = \frac{I_\gamma \sin \gamma \cos \gamma}{H} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^{N+1} \alpha d\alpha.$$

Наклонно расположенный линейный излучатель (рис. 6.4). Светораспределение участка поверхности

$$dI_{\gamma\alpha} = I_\gamma \cos^N \alpha d\alpha.$$

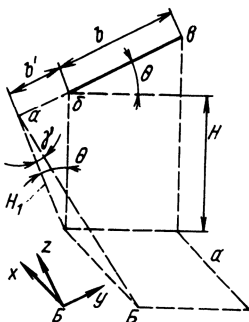


Рис. 6.4

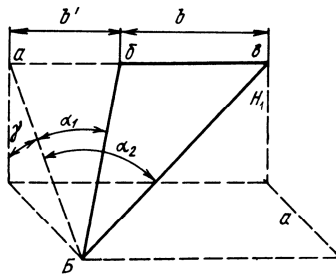


Рис. 6.5

В этом случае соответствующим выбором ортогональной системы координат (y и z соответственно параллельны b и H) можно расположение линейного источника (рис. 6.4) заменить эквивалентным (рис. 6.5), где $H_1 = H \cos \theta$. Высота H и угол θ показаны на

рис.6.4. Используя рис. 6.5, можно все характеристики светового поля наклонно расположенного линейного источника, кроме средних цилиндрических освещенностей ε_{uyN} и ε_{uzN} , рассчитывать по выражениям, приведенным ранее.

6.2. Линейный излучатель, равнояркий в продольной плоскости

Сила света участка dy

$$dI_{\gamma\alpha} = I_{\gamma} \cos \alpha \, dy.$$

А. Проекция светового вектора в точке B (см. рис. 6.2):

$$\varepsilon_x = \frac{I_{\gamma}}{2H} \left(\alpha_1 + \frac{\sin 2\alpha_1}{2} \right) \sin \gamma \cos \gamma, \quad \varepsilon_y = \frac{I_{\gamma}}{2H} \cos \gamma \sin^2 \alpha_1,$$

$$\varepsilon_z = \frac{I}{2H} \left(\alpha_1 + \frac{\sin 2\alpha_1}{2} \right) \cos^2 \gamma.$$

Б. Средние цилиндрические освещенности в точке B (см. рис. 6.2):

$$E_{ux} = \frac{I_{\gamma}}{\pi H} \cos \gamma \int_0^{\alpha_1} \cos \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \alpha} \, d\alpha = \frac{I_{\gamma}}{H} E'_{ux},$$

$$E_{uy} = \frac{I_{\gamma}}{2\pi H} \cos \gamma \left(\alpha_1 + \frac{\sin^2 \alpha_1}{2} \right) = \frac{I_{\gamma}}{H} E'_{uy},$$

$$E_{uz} = \frac{I_{\gamma}}{\pi H} \cos \gamma \int_0^{\alpha_1} \cos \alpha \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \alpha} \, d\alpha = \frac{I_{\gamma}}{H} E'_{uz}.$$

В. Средняя сферическая освещенность в точке B (см. рис. 6.2):

$$E_{4\pi} = \frac{I_{\gamma}}{4H} \cos \gamma \sin \alpha_1.$$

Г. Средние полусферические освещенности в точке B (см. рис. 6.2):

$$E_{2\pi x} = E_{4\pi} + 0,25\varepsilon_x, \quad E_{2\pi y} = E_{4\pi} + 0,25\varepsilon_y, \quad E_{2\pi z} = E_{4\pi} + 0,25\varepsilon_z.$$

6.3. Поле светящегося, горизонтально расположенного прямоугольника

Основные законы и формулы

Светораспределение элементарного участка поверхности

$$d^2 I_{\alpha \gamma} = L_0 dx dy \cos^N \alpha \cos^M \gamma .$$

А. Проекции светового вектора в точке *Б* (рис. 6.6, а):

$$\varepsilon_{xN} = L_0 \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{n dn dm}{l_{омн} c_{омн}}, \quad \varepsilon_{yN} = L_0 \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{m dn dm}{l_{омн} c_{омн}},$$

$$\varepsilon_{zN} = L_0 \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{dn dm}{l_{омн} c_{омн}},$$

где $l_{омн} = \sqrt{1 + n^2 + m^2}^{(N+3)}$, $c_{омн} = \sqrt{1 + n^2}^{(M-N)}$,

$n = x/H$, $m = y/H$, $n_1 = a/H$, $m_1 = b/H$.

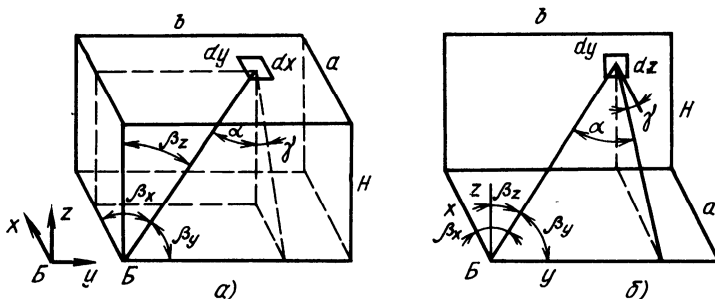


Рис. 6.6

Б. Средние цилиндрические освещенности в точке *Б* (см. рис. 6.6, а):

$$E_{ux} = \frac{L_0}{\pi} \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{\sqrt{1 + m^2} dn dm}{l_{омн} c_{омн}}, \quad E_{uy} = \frac{L_0}{\pi} \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{\sqrt{1 + n^2} dn dm}{l_{омн} c_{омн}},$$

$$E_{uz} = \frac{L_0}{\pi} \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{\sqrt{n^2 + m^2} dn dm}{l_{омн} c_{омн}},$$

где $l_{омн} = \sqrt{1+n^2+m^2}^{(N+3)}$, $c_{омн} = \sqrt{1+n^2}^{(M-N)}$,
 $n = x/H$, $m = y/H$, $n_1 = a/H$, $m_1 = b/H$, L_0 – яркость прямогольника в направлении, перпендикулярном его плоскости.

В. Средняя сферическая освещенность в точке B :

$$E_{4\pi N} = \frac{L_0}{4} \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{dn dm}{\sqrt{1+n^2+m^2}^{(N+2)} \sqrt{1+n^2}^{(M-N)}}.$$

6.4. Поле светящегося, вертикально расположенного прямогольника

Основные законы и формулы

Светораспределение элементарного участка поверхности

$$d^2 I_{\alpha \gamma} = L_0 dy dz \cos^N \alpha \cos^M \gamma.$$

А. Проекции светового вектора в точке B (см. рис. 6.6, б):

$$\varepsilon_{xN} = L_0 \int_0^{v_1} \int_0^{w_1} \frac{dv dw}{l_{омн} c_{омн}}, \varepsilon_{yN} = L_0 \int_0^{v_1} \int_0^{w_1} \frac{w dv dw}{l_{омн} c_{омн}},$$

$$\varepsilon_{zN} = L_0 \int_0^{v_1} \int_0^{w_1} \frac{v dv dw}{l_{омн} c_{омн}},$$

где $l_{омн} = \sqrt{1+v^2+w^2}$, $c_{омн} = \sqrt{1+v^2}^{(M-N)}$,

$$v = z/a, \quad w = y/a, \quad v_1 = H/a_1, \quad w_1 = b/a.$$

Б. Средние цилиндрические освещенности в точке B (см. рис. 6.6, б):

$$E_{ux} = \frac{L_0}{\pi} \int_0^{v_1} \int_0^{w_1} \frac{\sqrt{v+w^2} dv dw}{l_{омн} c_{омн}}, \quad E_{ux} = \frac{L_0}{\pi} \int_0^{v_1} \int_0^{w_1} \frac{\sqrt{1+v^2} dv dw}{l_{омн} c_{омн}},$$

$$E_u = E_{uz} = \frac{L_0}{\pi} \int_0^{v_1} \int_0^{w_1} \frac{\sqrt{1+w^2} dv dw}{l_{омн} c_{омн}}$$

В. Средняя сферическая освещенность в точке *Б* (см. рис.6.6, б):

$$E_{4\pi} = \frac{L_0}{\pi} \int_0^{v_1} \int_0^{w_1} \frac{dv dw}{\sqrt{1+v^2+w^2}^{(N+2)}}$$

6.5. Равнояркий, горизонтально расположенный прямоугольник

Основные законы и формулы

$$\varepsilon_x = \frac{L}{2} \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cos(\beta_x)_i, \quad \varepsilon_y = \frac{L}{2} \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cos(\beta_y)_i.$$

Проекцию светового вектора, средние цилиндрические освещенности и $E_{4\pi}$ можно определять по ранее приведенным выражениям при $N = 1, M = 1$.

А. Проекции светового вектора в точке *Б* (рис.6.7):

$$\varepsilon_z = \frac{L}{2} \sum_{i=1}^4 \alpha_i \cos(\beta_z)_i,$$

где α_i – угол, под которым видна из точки *Б* *i*-я сторона прямоугольника,

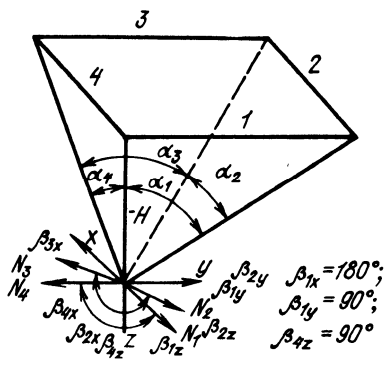


Рис.6.7

$\beta_x, \beta_y, \beta_z$ – внешние углы с вершиной в точке *Б* между нормалью к поверхности *i*-й грани пирамиды и соответствующей координатной осью; L – яркость светящегося прямоугольника.

На рис. 6.7 показаны углы $\beta_{4x} = 90^\circ, \beta_{4y} = 180^\circ, \beta_{4z} = 90^\circ$. N_4 – внешняя нормаль к 4-й грани.

Б. Средняя сферическая освещенность (см. рис. 6.7):

$$E_{4\pi} = \frac{L}{4} \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{dn dm}{\sqrt{1+n^2+m^2}^3},$$

где $n_1 = a/H$, $m_1 = b/H$, $dn = dy/H$, $dm = dx/H$.

Телесный угол с вершиной в точке B , опирающийся на прямоугольник со сторонами a и b :

$$\Omega = \int_0^{n_1} \int_0^{m_1} \frac{dn dm}{\sqrt{1+n^2+m^2}^3}.$$

Для малых значений n_1 и m_1 по Гершуну телесный угол

$$\Omega' = \text{arctg} \frac{n_1 m_1}{\sqrt{1+n^2+m^2}},$$

при $n_1 \approx m_1 \approx 1$, $\Omega'/\Omega \approx 1,1$.

6.6. Равнояркий круг

А. Средняя цилиндрическая освещенность с ориентацией (вертикальной) в точке B (рис. 6.8):

$$E_y = 2L_0 \int_0^{\alpha_1} \sin^2 \alpha d\alpha = L_0 \left(\alpha_1 - \frac{\sin 2\alpha_1}{2} \right).$$

Б. Средняя сферическая освещенность в точке B (см. рис. 6.8):

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} \int_{\Omega} L d\Omega = \frac{1}{4} \int_{\Omega} dE_n = 0,25L(1 - \cos \alpha_1),$$

где $d\Omega$ - элементарный телесный угол,
 dE_n - освещенность плоскости, перпендикулярной оси элементарного телесного угла (нормальная освещенность).

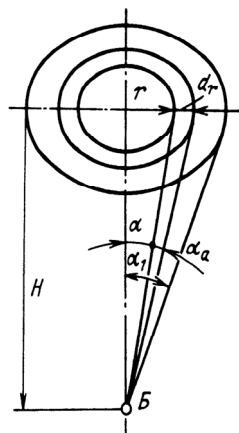


Рис. 6.8

Задания

Интегральные характеристики светового поля

6.1. Определите средние цилиндрические освещенности в точке B поля точечного источника света. Точка B является началом координат. Положение точечного источника определяется координатами: $x=1\text{ м}$, $y = 2\text{ м}$, $H=z = 3\text{ м}$. Сила света в направлении к точке B $I_\alpha = 6280\text{ кд}$.

6.2. Определите среднюю сферическую $E_{4\pi}$ и среднюю полусферическую $E_{2\pi}$ освещенности (ориентация вертикальная, плоскость основания расположена горизонтально), создаваемые в точке B точечным источником света. Сила света, излучаемая в направлении точки B , $I_\alpha = 5000\text{ кд}$. Источник расположен над горизонтальной плоскостью на расстоянии $H=3\text{ м}$. Угол падения света в точку B $\alpha = 53^\circ 10'$.

6.3. В поле двух точечных источников света (рис. 6.9) определите среднюю сферическую и среднюю полусферическую освещенности в точке B . При расчете принять: $H_1 = a_2 = 4\text{ м}$, $H_2 = a_1 = 3\text{ м}$, $I_{\alpha_1} = 500\text{ кд}$, $I_{\alpha_2} = 250\text{ кд}$. Плоскость основания полусферы горизонтальна.

6.4. Определите с ориентациями по координатным осям средние цилиндрические освещенности в точке B поля двух точечных источников (рис. 6.9). Условия освещения изложены в задаче 6.3.

6.5. Равнояркая полусфера с диаметром $D = 20\text{ см}$ имеет яркость $L = 2 \cdot 10^5\text{ кд/м}^2$. Определите средние сферическую и полусферическую освещенности в точке B (рис. 6.10). При расчете принять: $H=3\text{ м}$, $a = 2\text{ м}$, плоскость ориентации полусферической освещенности горизонтальна.

6.6. Можно ли одним источником света создать такие условия освещения, при которых в заданной точке поля средняя сферическая освещенность была бы равна средней полусферической освещенности?

6.7. Определите среднюю сферическую освещенность, создаваемую люминесцентной лампой типа ЛД15 в точке B (рис. 6.11, a).

При расчете принять: $H=0,15$ м; $a = 0,1$ м; $D = 0,025$ м; $l=0,42$ м и $\Phi = 590$ лм. Чему будет равно значение $E_{4\pi}$ в точке B , если лампу принять за равнояркий источник.

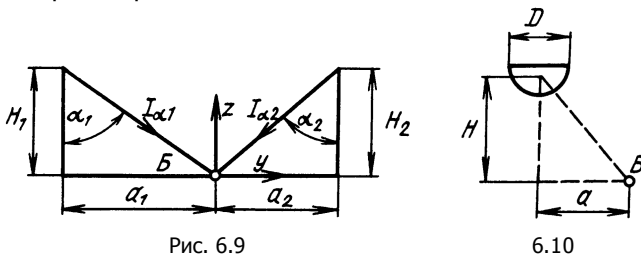


Рис. 6.9

6.10

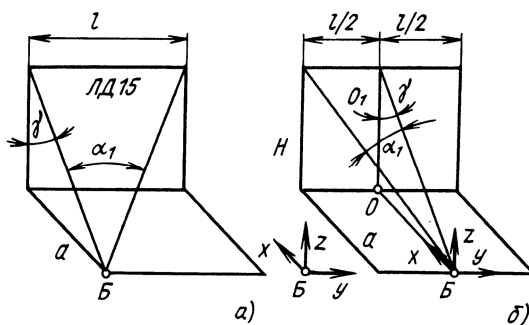


Рис. 6.11

6.8. Определите средние цилиндрические освещенности в точке B светового поля люминесцентной лампы типа ЛБ30, принимая лампу: а) за точечный источник света; б) за протяженный источник света, равнояркий в продольных плоскостях. Положение лампы относительно точки B указано на рис. 6.11,б ($H = 4$ м, $a = 2$ м). Поток лампы $\Phi = 2100$ лм, длина лампы $l = 880$ мм.

6.9. Чему будет равно значение $E_{4\pi}$ в точке B , если: а) лампу типа ЛД15 разместить так, как показано на рис. 6.11,б; б) лампу повернуть около точки O (рис. 6.11,б) и ось ее направить вдоль линии OO_1 ($H = 0,15$ м; $a = 0,1$ м).

6.10. Равнояркий диск, расположенный горизонтально, излучает световой поток $\Phi = 1972$ лм. Определите средние цилиндриче-

скую, сферическую и полусферическую освещенности в точке B , расположенной под центром диска на расстоянии $H = 0,5$ м. Плоскость ориентации полусферической освещенности горизонтальная. При расчете толщиной диска пренебречь.

6.11. Определите средние цилиндрическую, сферическую и полусферическую освещенности, создаваемые равнояркой полый полусферой в центре ее основания. Основание полусферы расположено горизонтально. Яркость внутренней поверхности полусферы $L = 1000$ кд/м². Плоскости ориентации полусферических освещенностей горизонтальная и вертикальная. Коэффициент отражения основания полусферы $\rho = 0$.

6.12. Определите средние цилиндрическую и сферическую освещенности в точке B —центре основания полого равнояркого параллелепипеда. Коэффициент отражения основания, на котором находится точка B , $\rho = 0$. В точке B средняя полусферическая освещенность с плоскостью ориентации, совпадающей с основанием параллелепипеда, $E_{2\pi} = 100$ лк.

6.13. Равнояркий шар с диаметром $D=40$ мм имеет яркость $L = 16 \cdot 10^6$ кд/м². Определите интегральные характеристики в точке B светового поля этого шара: средние цилиндрическую, сферическую и полусферическую освещенности. Положение шара относительно точки B показано на рис. 6.12, $H = 5$ м, $a = 3$ м, $b = 4$ м.

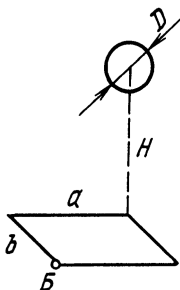


Рис.6.12

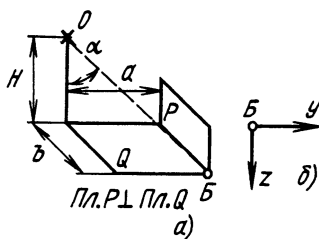


Рис. 6.13

6.14. Как нужно расположить точечный источник света O относительно точки B , чтобы получить в точке B одинаковые средние полусферические освещенности в двух взаимно перпендикулярных

плоскостях Q и P (рис. 6.13, a). Определите, чему будут равны в этом случае средние цилиндрические и сферические освещенности в точке B . При расчете принять, что источник имеет продольную кривую силы света, описываемую уравнением $I_{\alpha} = 2000 \cos \alpha$, кд. Максимальная сила света направлена перпендикулярно плоскости Q , $H = 3$ м, $b = 4$ м.

6.15. Точечный источник света O создает в точке B плоскости P среднюю полусферическую освещенность с плоскостью ориентации, совпадающей с плоскостью P , $E_{2,р} = 169$ лк (рис. 6.13, a), $H = 3$ м, $b = 4$ м, $a = 3$ м. Определите в точке B средние освещенности: цилиндрическую, сферическую и полусферическую с плоскостью ориентации, совпадающей с плоскостью Q .

Световой вектор

6.16. Определите значение и направление светового вектора и средние значения цилиндрической, сферической и полусферической освещенностей в центре полого равнорядного шара, если яркость внутренней поверхности шара $L = 1000$ кд/м².

6.17. Определите значение и направление светового вектора и средние значения цилиндрической, сферической и полусферической освещенностей в центре основания светящей равнорядкой полусферы, яркость внутренней поверхности которой $L = 1000$ кд/м², при условиях: а) яркость внешнего пространства равна нулю; б) яркость внешнего пространства $L = 500$ кд/м². Плоскостью ориентации полусферической освещенности является плоскость основания светящей полусферы.

6.18. Определите значение и направление светового вектора и средние значения цилиндрической и сферической освещенностей в точке B светового поля шарового источника света. Равнорядкий шар излучает световой поток $\Phi = 6280$ лм. Диаметр шара D , за центр ортогональной координатной системы принимаем точку B , в этой системе центр шара имеет координаты: $x=0$, $y = 3$ м, $z = 4$ м (рис. 6.13, b).

6.19. Определите значение и направление светового вектора в точке B поля двух точечных излучателей (рис. 6.14). Продольная

кривая силы света каждого излучателя описывается уравнением $I_{\alpha} = 1000 \cos \alpha$, кд, $a_1 = 2$ м, $a_2 = 3$ м, $H = 4$ м.

6.20. Элемент плоскости, расположенный в точке B , освещается двумя точечными источниками света (рис. 6.14). Определите положение этого элемента, когда он имеет наибольшее значение освещенности, и значение этой освещенности, если продольная кривая силы света каждого источника описывается уравнением $I_{\alpha} = 1000 \cos \alpha$, кд, $a_1 = 2$ м, $a_2 = 3$ м, $H = 4$ м.

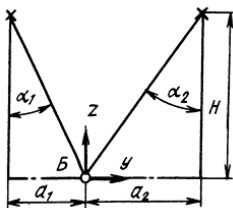


Рис. 6.14

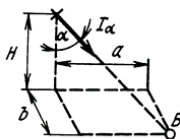


Рис. 6.15

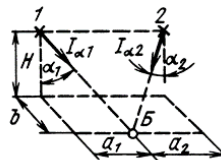


Рис. 6.16

6.21. Постройте продольное сечение тела освещенности, создаваемое в течение B точечным источником с силой света $I_{\alpha} = 100 \sin \alpha$, кд, и определите значение светового вектора в точке B при $H = 3$ м, $a = 3$ м, $b = 4$ м (рис. 6.15).

6.22. Два точечных источника света 1 и 2 ($I_{\alpha 1} = 1000 \cos \alpha_1$ кд; $I_{\alpha 2} = 1000 \sin \alpha_2$, кд) расположены, как указано на рис. 6.16. Определите тело распределения освещенности в точке B и световой вектор, создаваемый источниками в точке B , при $H = 3$ м, $2a_1 = a_2 = 4$ м и $b = 3$ м.

6.23. Люминесцентная лампа типа ЛБ80, светящимся телом которой является равноякий цилиндр с диаметром $D = 38$ мм и длиной $l = 1466$ мм, излучает световой поток $\Phi = 5250$ лм. Положение лампы относительно точек B и B_1 указано на рис. 6.17 ($H = 30$ см, $b = 60$ см). Определите: а) световой вектор в точках B и B_1 и направляющие косинусы этих векторов; б) средние сферические освещенности в этих же точках.

6.24. Положение люминесцентной лампы типа ЛБ80 показано на рис. 6.18 ($l=1466$ мм, $D=38$ мм, $H=300$ мм, $b=600$ мм). Световой поток лампы $\Phi = 5220$ лм. Принимая лампу за равнояркий источник, определите: а) световой вектор и косинусы его направляющих углов; б) вертикальную освещенность в точках B_2 и B_3 плоскости xB_2z и xB_3z ; в) средние сферические освещенности в точках B_2 и B_3 ; г) средние цилиндрические освещенности в точках B_2 и B_3 , принимая лампу: 1) за протяженный равнояркий источник и 2) за точечный источник.

6.25. Определите значение и направление светового вектора и среднюю цилиндрическую освещенность в точке B_1 (рис. 6.19) при $l=10$ м; $D=38$ мм; $H=0,5$ м; $b=1$ м, если точка B_1 находится в световом поле: а) равнояркого цилиндра с яркостью $L_d = 5 \cdot 10^3$ кд/м²; б) равнояркой полосы, расположенной вертикально, ширина которой равна 38 мм и яркость $L = 5 \cdot 10^3$ кд/м².

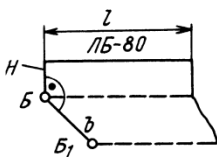


Рис. 6.17

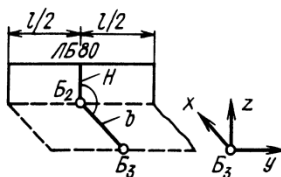


Рис. 6.18

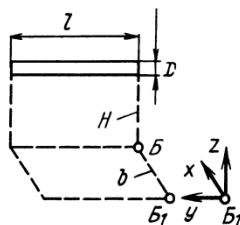


Рис. 6.19

6.26. Равнояркая полоса (рис. 6.20) имеет светимость $M=4000$ лм/м² и ширину $D=25$ см. Остальные размеры (см. рис. 6.20): $H=a=3$ м, $b=4$ м. Определите в точке B светового поля полосы: а) освещенность наклонной плоскости P_1 , пересекающей горизонтальную плоскость вдоль оси x и образующей с этой плоскостью угол $H_1=45^\circ$; б) освещенность наклонной плоскости P_2 , пересекающую плоскость xBu также по оси x и образующей с осью u угол $\vartheta_1=45^\circ$; в) средние значения цилиндрической, сферической и полусферической освещенности. Плоскость ориентации средней полусферической освещенности горизонтальная.

6.27. Равнояркая полоса (рис. 6.21) имеет яркость $L=2000$ кд/м². Ширина полосы $D=200$ мм, длина $b=4$ м, плоскость полосы D_b горизонтальная ($H=a=3$ м). Определите в точке

Б светового поля полосы: а) освещенность наклонной плоскости P , пересекающей горизонтальную плоскость xBy вдоль оси y и образующей с этой плоскостью угол $\vartheta_1 = 45^\circ$; б) средние значения: цилиндрической с ориентацией вдоль оси y , сферической и полусферической освещенностей. Плоскость ориентации средней полусферической освещенности совпадает с плоскостью P .

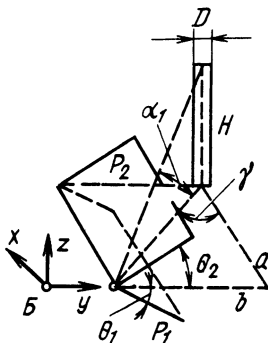


Рис. 6.20

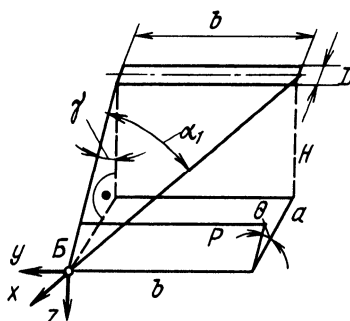


Рис. 6.21

6.28. Светящая полоса имеет светораспределение $I_{y\alpha} = 3000 \cos^2 \alpha$,кд, в продольной плоскости, проходящей через точку B и ось полосы (см. рис. 6.21). Определите световой вектор и косинусы направляющих углов его в точке B светового поля полосы при $H = a = 3$ м, $b = 4$ м.

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

Фотонные характеристики излучения

- 1.1. $Q_{1фот} = 9,94 \cdot 10^{-19}$ Дж; $Q_{2фот} = 5,2 \cdot 10^{-19}$ Дж;
 $Q_{3фот} = 3,58 \cdot 10^{-19}$ Дж; $Q_{4фот} = 2,54 \cdot 10^{-19}$ Дж.
- 1.2. $\nu_1 / \nu_2 = 1,9$; λ_1 – к УФ участку спектра, λ_1 – к видимому.
- 1.3. $\Phi_{фот} = 279 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$.
- 1.4. $t = 5,73 \cdot 10^8$ ч, $Q_{фот} = 36 \cdot 10^8$ фотон.
- 1.5. $\Phi_{фот} = 795 \text{ с}^{-1}$.
- 1.6. $E_{фот} = 6,04 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.
- 1.7. $E_{фот} = 11,7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.
- 1.8. $H_{фот} = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$.
- 1.9. $H_{фот} = 95,8$ лк·с.
- 1.10. $L_{фот} = 5,18 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$; $L_{eфот} = 1,2610 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$.
- 1.11. $\Phi_{eуф} = 2.755$ Вт; $\Phi_{e\lambda_3} = 0.596$ Вт; $\Phi_{eук} = 0.276$ Вт.
- 1.12. $\Phi_e(\lambda, d\lambda) = 2.39 \cdot 10^6$ Вт.

Энергетические характеристики оптического излучения

- 2.1. 1) 4π ; 2) 2π ; 0,580; 0,111.
- 2.2. $\Phi_e = 3\pi I_{e0}$.
- 2.3. $\Phi_{e1} = \Phi_{e2} = 314 \text{ Вт}$.
- 2.4. $\Phi_e \approx 986 \text{ Вт}$.
- 2.5. $\Phi_e(0-10^\circ) = \Phi_e(170-180^\circ) = 9,5 \text{ Вт}$;
 $\Phi_e(80-90^\circ) = \Phi_e(90-100^\circ) = 109,4 \text{ Вт}$.

$$2.6. \text{ а) } (E_{eB})_{\min} = 0;$$

$$(E_{eB})_{\min} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}; (E_{eB})_{\text{зоп}} = (E_{eB})_p = 0,707 \text{ Вт/м}^2.$$

$$2.7. \text{ 1) } L_e = 8 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср}); \text{ 2) увеличится на } 0,51 \text{ Вт/м}^2.$$

$$2.8. E_{e1} : E_{e2} = 1.$$

$$2.9. I_{e\alpha} = E_e H^2 / \cos^3 \alpha.$$

2.10. Цилиндр относительно точки Б является точечным источником излучения. Сила излучения боковой поверхностью цилиндра в направлении к точке Б

$$I_{e\alpha} = L_e D l \cos \alpha \quad \text{Вт/ср}.$$

2.11. Горизонтальная облученность в точке Б, создаваемая боковой поверхностью цилиндра:

$$E_{eB} = \frac{I_{e\alpha}}{H^2 + a^2} \cos \alpha = \frac{L_e D a \cos^2 \alpha \cdot 10^{-4}}{H^2 + a^2}.$$

Определяем энергетическую яркость боковой поверхности цилиндра:

$$L_e = \frac{E_{eB} (H^2 + a^2)}{D a \cdot 10^4 \cos^2 \alpha} = \frac{50 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot 25}{5 \cdot 1,5 \cdot 9 \cdot 10^{-4}} = 463 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср}).$$

$$2.12. E_{eB} = 90,7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2.$$

$$2.13. E_{eB} = 0,72 \text{ Вт/м}^2.$$

Тепловое излучение

$$3.1. \Phi_e \approx 0,53 \text{ Вт}.$$

$$3.2. T = 200 \text{ К}; M_e = 90,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2.$$

$$3.3. \text{ При } \Delta T = 100 \text{ К } \Phi_{eT+\Delta T} : \Phi_{eT} = 1,2; \text{ при } \Delta T = 100 \text{ К } \Phi_{eT-\Delta T} : \Phi_{eT} = 0,8; \Phi_{eT+\Delta T} : \Phi_{eT-\Delta T} = 1,476.$$

3.4. Определим энергетическую температуру вольфрама, имеющего поверхностную плотность излучения $M_e = 14,22 \text{ Вт/м}^2$:

$$T_e = \sqrt[4]{M_e / \sigma} = 10^3 \sqrt[4]{14,22 / 5,67} = 1255 \text{ К}.$$

Из прил. 2 определим приближенную к истинной температуру вольфрама $T_W = 1800 \text{ К}$.

Проверим правильность определения $T_{\text{э}}$:

$$M_e = 0,24 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot 1800^4 = 0,24 \cdot 5,672 \cdot 1,8^4 = 14,3 \text{ Вт/м}^2.$$

3.5. Определим длину волны, на которую приходится максимум функции $M_e^0(\lambda)$:

$$\lambda_{\text{max}} = 2896 / T = 2896 / 6000 = 0,482 \text{ мкм}.$$

Для границ видимого участка спектра определим значения

$$\xi_1 = \lambda_1 / \lambda_{\text{max}} = 0,38 / 0,482 = 0,788 \approx 0,79$$

и

$$\xi_2 = \lambda_2 / \lambda_{\text{max}} = 0,77 / 0,482 = 1,6.$$

Из прил. 2 определим значения функций

$$\Psi(\xi) = [(12,37 + 11,23) / 2] \cdot 10^{-2} = 11,8 \cdot 10^{-2};$$

$$\Psi(\xi) = 58,46 \cdot 10^{-2}.$$

Доля потока, приходящегося на видимую область спектра,

$$n_{\text{вид}} = \Psi(\xi_2) - \Psi(\xi_1) = 58,46 \cdot 10^{-2} - 11,8 \cdot 10^{-2} \approx 0,48.$$

Определим плотность излучения абсолютно черного тела при $T=6000 \text{ К}$:

$$M_e^0 = \sigma T^4 = 5,672 \cdot 10^{-12} \cdot 6^4 \cdot 10^{12} \approx 7350 \text{ Вт/м}^2.$$

Определим поток, излучаемый этим телом с поверхности $A = 10 \text{ см}^2$ в видимой области спектра:

$$\Phi_e^0 = (M_e^0 A)_{\text{вид}} = 7350 \cdot 10 \cdot 0,467 = 34300 \text{ Вт}.$$

3.6. $M_{e\text{уф}} = 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$; $M_{e\text{вид}} = 0,044 \text{ Вт/см}^2$;

$$M_{e\text{ук}} = 28,6 \text{ Вт/см}^2.$$

3.7. $\Phi_e = 45,5$ Вт.

3.8. $T_{я}^0 = 2080$ К.

3.9. $I_{e\ min} = 0,371$ Вт/ср; $I_{e\ max} = 0,523$ Вт/ср.

3.10. Определим силу излучения в направлении точки Б:

$$E_{eБ} = I_{eБ} \cos^3 \beta / H^2 ;$$

$$E_{eБ} = E_{eБ} H^2 / \cos^3 \beta = 0,173 \cdot 9 / 0,125 = 12,45 \text{ Вт / ср} .$$

Определим поверхностную плотность излучения шарика:

$$M_e = \pi L_e = 4\pi I_{eБ} / \pi D^2 = 12,45 \cdot 4 / 4 = 12,45 \text{ Вт / см}^2 .$$

Определим радиационную температуру шарика, принимая его за черное тело:

$$T_p^0 = \sqrt[4]{M_e / \sigma} = 10^3 \sqrt[4]{12,45 / 5,67} = 1220 \text{ К} .$$

Путем подбора определим истинную температуру вольфрамового шарика. Из прил. 2 определим приближенную температуру шарика: $T_l = 1800$ К.

Определим радиационную температуру:

$$T_{p1}^0 = T_l \sqrt[4]{\varepsilon_{T1}}; \quad \varepsilon_{T1} = 0,24;$$

$$T_{p1}^0 = 1800 \sqrt[4]{0,24} \approx 1260 \text{ К} .$$

Радиационная температура шарика 1220 К, мы получили 1260 К.

Зададимся еще раз температурой шарика: $T_2 = 1770$ К. Определим интегральный коэффициент излучения из прил. 2:

$$\varepsilon_{T2} = 0,21 + 0,03 \cdot 170 / 200 = 0,236 .$$

Определим радиационную температуру:

$$T_{p2}^0 = T_2 \sqrt[4]{\varepsilon_{T2}} = 1770 \sqrt[4]{0,236} = 1770 \cdot 0,695 = 1230 \text{ К} .$$

Радиационная температура шарика 1220 К, мы получили 1230 К. Задаемся еще раз температурой шарика $T_{p3} = 1750$ К. Определим еще раз интегральный коэффициент излучения:

$$\varepsilon_{T3} = 0,21 + 0,03 \cdot 150 / 200 = 0,232 ;$$

снова определим радиационную температуру:

$$T_{p3}^0 = 1750 \sqrt[4]{0,232} = 1215 \text{ К}.$$

Мы получили расхождение в радиационных температурах на 5 К и можем приближенно считать, что температура нашего шарика равна 1750 К.

3.11. $I_{ea} = 14,6$ Вт/ср. Увеличив диаметр диска в 10 раз, силу излучения увеличим в 100 раз.

3.12. $L_e = 37,1$ Вт/(см²·ср); $I_{ea} = 1,63$ Вт/ср; $L_{e\alpha} = 37,1 \cdot 10^{-4}$ Вт/(ср · м²).

3.13. Определим длину волны, на которую приходится максимум функции $M_e^0(\lambda T)$:

$$\lambda_{max} = 2896 / 1800 = 1,6 \text{ мкм}.$$

Определим отношения:

$$\xi_1 = \lambda_1 / \lambda_{max} = 0,555 / 1,6 = 0,346;$$

$$\xi_2 = \lambda_2 / \lambda_{max} = 1 / 1,6 = 0,625.$$

По прил. 4 находим значения η_1 и η_2 :

$$\eta_1 = 1,425 \cdot 10^{-2} + (0,445 \cdot 0,006 / 0,01) 10^{-2} = 1,70 \cdot 10^{-2};$$

$$\eta_2 = 51,7 \cdot 10^{-2} + 2,53 \cdot 0,005 / 0,01 = 52,96 \cdot 10^{-2}.$$

Определим максимальное значение функции $M_e^0(\lambda T)_m$:

$$\begin{aligned} M_e^0(\lambda T)_m &= 1,31 \cdot 10^{-15} \cdot T^5 = 1,31 \cdot 10^{-15} \cdot 1,8^5 \cdot 10^{15} = \\ &= 1,31 \cdot 18,9 = 24,8 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм)}, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} M_e^0(\lambda T) &= \eta_1 M_e^0(\lambda T)_m = 1,70 \cdot 10^{-2} \cdot 24,8 \cdot 10^{-4} = \\ &= 0,422 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм)}, \end{aligned}$$

$$M_e^0(\lambda T) = \eta_2 M_e^0(\lambda T)_m = 52,96 \cdot 10^{-2} \cdot 24,8 = 13,1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм)}.$$

Из прил. 1 находим спектральные коэффициенты излучения вольфрама для длин волн $\lambda_1 = 0,555$ мкм и $\lambda_2 = 1$ мкм и температуры $T = 1800$ К:

$$\varepsilon(\lambda_1 T) = 0,488; \varepsilon(\lambda_2 T) = 0,303.$$

Зная значения спектральных энергетических светимостей черного тела для интересующих нас длин и температуры, находим значения $M_e(\lambda_1 T)$ и $M_e(\lambda_2 T)$ для вольфрама:

$$M_e(\lambda_1 T) = \varepsilon(\lambda_1 T) M_e^0(\lambda_1 T) = 0,448 \cdot 0,422 = 0,189 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм)}.$$

$$M_e(\lambda_2 T) = \varepsilon(\lambda_2 T) M_e^0(\lambda_2 T) = 0,303 \cdot 13,1 = 3,97 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм)}.$$

Эффективные характеристики излучения

4.1. $\Phi(\lambda, d\lambda) = 27,2 \text{ лм}.$

4.2. $\Phi(\lambda_1, d\lambda) = 27,2 \text{ лм}; \Phi(\lambda_2, d\lambda) = 68000 \text{ лм};$

$\Phi(\lambda_3, d\lambda) = 17 \text{ лм}.$

4.3. В условиях дневного зрения

$\Phi_e(\lambda_1, d\lambda) : \Phi_e(\lambda_2, d\lambda) = 16,6.$

В условиях ночного зрения $\Phi_e(\lambda_1, d\lambda) : \Phi_e(\lambda_2, d\lambda) = 1,19.$

4.4. $\Phi_e(\lambda_2, d\lambda) = 85 \text{ Вм}.$

4.5. $\Phi_e(\lambda_1, d\lambda) = 8333 \text{ Вм}; \Phi_e(\lambda_2, d\lambda) = 1 \text{ Вм};$

$\Phi_e(\lambda_3, d\lambda) = 16700 \text{ Вм}.$

4.6. $\lambda_1 = 413 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 713 \text{ нм}.$

4.7. $\Phi_e(\lambda_1, d\lambda) : \Phi_e(\lambda_2, d\lambda) = 9,35.$

4.8. Интервал спектра от $\lambda_1 = 525 \text{ нм}$ до $\lambda_2 = 575 \text{ нм}$ разобьем на пять участков (525-535 нм; 535-545 нм и т.д.), в пределах каждого из которых за спектральную плотность энергетической светимости примем значение ее для середины данного участка спектра. Для проведения расчета составим таблицу. Столбец второй заполняем из прил. 6 для $T = 2400 \text{ К}$. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматических излучений для средней длины волны каждого участка спектра выписываем из прил. 9. Составляем таблицу:

$\lambda, \text{нм}$	$M_{e\lambda}^0(\lambda T),$ $10^{-4}\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$	V_λ	$M_{e\lambda}^0(\lambda T)V_\lambda,$ $10^{-4}\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$
530	11,41	0,862	9,84
540	12,8	0,954	12,2
550	14,28	0,995	14,2
560	15,83	0,995	15,75
570	17,47	0,952	16,65

$$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} M_{e\lambda}^0(\lambda T) V_\lambda \Delta\lambda = 68,64 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм});$$

$$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} M_{e\lambda}^0(\lambda T) V_\lambda \Delta\lambda = 680 \cdot 0,5 \cdot 0,01 \cdot 68 \cdot 64 = 233 \text{ лм}.$$

4.9. $\Phi = 104 \text{ лм}.$

4.10. а) $\eta = 2,94\%$; б) $\eta = 1,03\%$; в) $\eta = 11,8\%$;

г) $\eta = 22\%$; д) $\eta = 3,2\%$.

4.11. $L = 1,98 \cdot 10^9 \text{ кд}/\text{м}^2.$

4.12. $L_e(\lambda, d\lambda) = 13,46 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ср}).$

4.13. $L_{ш} = 12700 \text{ кд}/\text{м}^2.$

4.14. $M = 31,4 \cdot 10^4 \text{ лм}/\text{м}^2.$

4.15. Для равнорядного круга мы можем записать:

$I_\alpha = I_0 \cos \alpha$, где I_0 и I_α - сила света, излучаемая горизонтально расположенным кругом в перпендикулярном направлении и в направлении, составляющем с перпендикуляром угол α .

Световой поток, излучаемый кругом,

$$\Phi = 2\pi I_0 \int_0^{0,5\pi} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha = \pi I_0.$$

Рассчитаем угол α , определяющий телесный угол Ω , в пределах которого одна сторона диска излучает половину светового потока:

$$0,5I_0\pi = 2\pi I_0 \int_0^{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha;$$

$$0,5 = 2 \int_0^{\alpha} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha = \sin^2 \alpha,$$

откуда $\alpha = 45^0$.

Определяем интересующий нас телесный угол:

$$\Omega = 2\pi \int_0^{45^0} \sin \alpha d\alpha = 2\pi(1 - \cos 45^0) = 1,84 \text{ ср.}$$

4.16. $L = 14,5 \cdot 10^4 \text{ кд} / \text{м}^2$; $\Phi = 143 \text{ лм}$.

4.17. 100 кд.

4.18. $I_e = 0,445 \text{ Вт} / \text{ср}$.

4.19. $E = 864 \text{ лк}$; $\Phi_{\Delta A} = 8,64 \text{ лм}$.

4.20. $\Phi = 607,7 \text{ лм}$.

4.21. $M = 2,1 \cdot 10 \text{ лм} / \text{м}^2$; $L = 0,668 \cdot 10^4 \text{ кд} / \text{м}^2$; $I_{\perp} = 147 \text{ кд}$.

4.22. $\Phi_{\text{бак}} = 0,5 \text{ бк}$.

4.23. $\Phi_{\text{бак}} = 34,3 \text{ бк}$; $\Phi_{\text{вум}} = 22,7 \text{ вум}$.

4.24. $L_e = 0,445 \text{ Вт} / (\text{ср} \cdot \text{см}^2)$; $L_{\text{вум}} = 0,0505 \text{ вум} / (\text{ср} \cdot \text{см}^2)$;

$L_{\text{бак}} = 0,54 \text{ бк} / (\text{ср} \cdot \text{см}^2)$.

4.25. Принимаем лампу за равнояркий цилиндр для лучистых, витальных и бактерицидных потоков. Тогда каждая из горизонтальных облученностей в точке Б (см. рис.4.2, а) описывается выражением, которое для горизонтальной облученности точки Б₁ имеет вид

$$E_{eB_1} = \frac{I_e \gamma}{2l} \left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \cos \gamma, \quad (1)$$

I_e – сила излучения лампы с длиной $l=1 \text{ м}$ в перпендикулярном оси лампы направлении,

$$I_{e\gamma} = \frac{\Phi_e}{\pi^2 l}; \quad (2)$$

здесь $l=0,318$ м.

Определяем численные значения сил излучения по формуле (2):

$$I_{e\gamma} = 303/9,86 \cdot 0,318 \approx 96,5 \text{ Вт/ср},$$

$$I_{\text{эрг}} = 112/9,86 \cdot 0,318 \approx 35,5 \text{ вим/ср},$$

$$I_{\text{бак}\gamma} = 136/9,86 \cdot 0,318 = 43,4 \text{ бк/ср}.$$

Вычисляем

$$\frac{l}{2l_l} \left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \cos \gamma = 0,056. \quad (3)$$

По формулам (1) и (3) находим:

$$E_{eB} = 96,5 \cdot 0,056 = 5,4 \text{ Вт/м}^2;$$

$$E_{\text{эрг}B} = 35,5 \cdot 0,056 \approx 2 \text{ вим/м}^2;$$

$$E_{\text{бак}B} = 43,4 \cdot 0,056 \approx 2,44 \text{ бк/м}^2.$$

Максимальные облученности в точке Б определяем по формулам (1) и (3), принимая $\gamma = 0$:

$$\frac{l}{2l_l} \left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) = 0,062;$$

$$(E_{\text{эрг}B})_{\text{max}} = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ вим/м}^2;$$

$$(E_{\text{бак}B})_{\text{max}} = 2,71 \cdot 10^{-4} \text{ бк/м}^2.$$

$$4.26. \text{ а) } (E_{0\text{эрг}})_{\text{max}} = (E_{0\text{эрг}})_{\text{гор}} = 45,2 \text{ вим/м}^2;$$

$$(E_{B\text{эрг}})_{\text{max}} = 22,6 \text{ вим/м}^2; (E_{B\text{эрг}})_{\text{гор}} = 16 \text{ вим/м}^2;$$

$$\text{б) } (E_{0\text{эрг}})_{\text{max}} = (E_{0\text{эрг}})_{\text{гор}} = 42,6 \text{ вим/м}^2;$$

$$(E_{B\text{вим}})_{\text{max}} = 21,8 \text{ вим/м}^2; (E_{B\text{эрг}})_{\text{гор}} = 15,4 \text{ вим/м}^2;$$

$$\Delta E_{0\text{вим}} = 6,1\%; \Delta (E_{B\text{вим}})_{\text{гор}} = 3,9\%.$$

$$4.27. \text{ а) } L_{\bar{\sigma}_{ак}} = 0,732 \cdot 10^{-2} \text{ бк}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2);$$

$$E_{\bar{\sigma}_{ак,вер}} = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ бк}/\text{м}^2.$$

$$4.28. A = 0,35; a = 0,51.$$

$$4.29. E = 305 \text{ лк}.$$

Фотометрические характеристики тел

$$5.1. \beta = 0,8.$$

$$5.2. \beta_3 = 2,51 \cdot 10^3.$$

$$5.3. \beta_{a1\theta1} = 176; \beta_{a2\theta2} = 1,92; \beta_{a3\theta3} = 0,252.$$

$$5.4. 1) L_{a1\theta1} = 11210 \text{ кд}/\text{м}^2; 2) L_{a2\theta2} = 186 \text{ кд}/\text{м}^2;$$

$$3) L_{a3\theta3} = 16,1 \text{ кд}/\text{м}^2.$$

$$5.5. \beta_1 = 0,112; \beta_2 = 0,159.$$

$$5.6. \beta = 150.$$

$$5.7. c = 7,1; p = 11,54.$$

$$5.8. L_{45^0,45^0} = 20,6 \text{ кд}/\text{м}^2; L_{45^0,90^0} = 4,68 \text{ кд}/\text{м}^2.$$

$$5.9. L_{30^0,0^0} = 470 \text{ кд}/\text{м}^2; L_{30^0,30^0} = 293 \text{ кд}/\text{м}^2;$$

$$L_{30^0,90^0} = 0,775 \text{ кд}/\text{м}^2.$$

$$5.10. L_{0^0,0^0} = L_{0^0,45^0} = L_{0^0,90^0} = 50,640 \text{ кд}/\text{м}^2;$$

$$L_{45^0,45^0} = 151,8 \text{ кд}/\text{м}^2; L_{45^0,90^0} = 34,2 \text{ кд}/\text{м}^2.$$

$$5.11. L = 1170,4 \text{ кд}/\text{м}^2; E_1 = E_2 = 5250 \text{ лк}.$$

$$5.12. E = 2892,4 \text{ лк}; L = 184,3 \text{ кд}/\text{м}^2.$$

СВЕТОВОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА

6.1. $E_{\varphi} = 85,6$ лк; $E_{\varphi x} = 38,4$ лк; $E_{\varphi y} = 76,8$ лк.

6.2. $E_{4\pi} = 50$ лк; $E_{2\pi} = 80$ лк.

6.3. $E_{4\pi} = 110$ лк; $E_{2\pi} = 202$ лк.

6.4. $E_{\varphi x} = 9,5$ лк; $E_{\varphi y} = 7$ лк; $E_{\varphi} = 6,3$ лк.

6.5. $E_{4\pi} = 110$ лк; $E_{2\pi} = 202$ лк.

6.6. Это будет всегда, если точечный источник света и основание полусферы лежат в одной плоскости. Другой случай определите сами.

6.7. Запишем уравнение, определяющее среднюю сферическую освещенность от светящей линии (см. рис. 6.11, а):

$$E_{4\pi B} = \frac{I_{\gamma} \cos \gamma}{4H} \sin \alpha_1; \quad I_{\gamma} = I_{\perp} / l = \Phi / 9,25 \cdot 0,42 = 151 \text{кд};$$

$$\sin \alpha_1 = l / \sqrt{H^2 + a^2 + l^2} = 0,920;$$

$$\cos \alpha_{\gamma} = H / \sqrt{H^2 + a^2} = 0,834; \quad E_{4\pi B} = 194 \text{лк}.$$

Если лампу принять за равнояркий источник, то $I_{\gamma} = I_{\perp} / l = \Phi / \pi^2 l = 142 \text{кд}$. При этом $E_{4\pi B} = 194 \text{лк}$.

6.8. а) $E_{\varphi x} = 4,7$ лк; $E_{\varphi y} = 5,6$ лк; $E_{\varphi} = 3,1$ лк;

б) $E_{\varphi y} = 5,25$ лк; $E_{\varphi} = 3$ лк; $E_{\varphi x} = 3,4$ лк.

6.9. а) $E_{4\pi B} = 315 \text{лк}$; б) $E_{4\pi B} = 536 \text{лк}$.

6.10. $E_{\varphi} = 114$ лк; $E_{4\pi} = 184 \text{лк}$; $E_{2\pi} = 262 \text{лк}$.

6.11. $E_{\varphi} = 1570$ лк; $E_{4\pi} = 1570 \text{лк}$; $(E_{2\pi})_{\text{гор}} = 2355 \text{лк}$;

$(E_{2\pi})_{\text{верт}} = 1962 \text{лк}$.

6.12. $E_{\varphi} = 67$ лк; $E_{4\pi} = 67 \text{лк}$.

6.13. $E_u = 90$ лк; $E_{ux} = 105$ лк; $E_{uy} = 115$ лк; $E_{4\pi} = 100$ лк ;
 $E_{2\pi} = 171$ лк .

6.14. $E_{2\pi Q} = E_{2\pi P}$ при $H = a$ (см.рис.6.13).

6.15. $E_u = 122$ лк; $E_{ux} = 103$ лк; $E_{uy} = 122$ лк; $E_{4\pi} = 112$ лк;
 $E_{2\pi Q} = 169$ лк.

6.16. $\varepsilon = 0$; $E_u = 3140$ лк; $E_{4\pi} = E_{2\pi} = 3140$ лк.

6.17. а) $\varepsilon = 3140$ лк; $E_{2\pi} = 2355$ лк; $E_{4\pi} = 1570$ лк;

б) $\varepsilon = 1570$ лк; $E_u = 2360$ лк; $E_{2\pi} = 2750$ лк; $E_{4\pi} = 2360$ лк.

6.18. $\varepsilon = 20$ лк; $(\vec{\varepsilon} \wedge \vec{z}) = 36^{\circ}55'$; $E_u = 3,8$ лк; $E_{4\pi} = 5$ лк.

При этом условии $E_{4\pi B} = 7,56$ лк.

6.19. Задача может быть решена двумя способами: 1) графоаналитическим; 2) аналитическим.

1. Определим косинусы углов падения света в точку Б от первого и второго источников света (рис.П1):

$$\cos \alpha_1 = H / \sqrt{H^2 + a_1^2} = 4 / \sqrt{16 + 4} = 0,9.$$

$$\cos \alpha_2 = H / \sqrt{H^2 + a_2^2} = 4 / \sqrt{16 + 9} = 0,8.$$

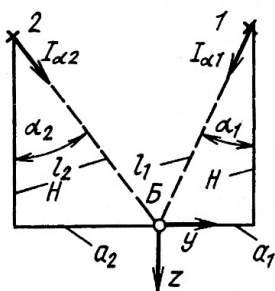


Рис. П1

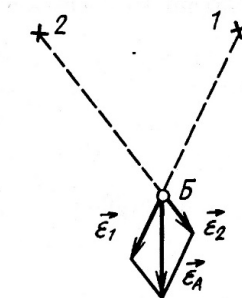


рис. П2

Определим силы света, излучаемые в направлении точки Б источниками света:

$$I_{\alpha_1} = 1000 \cos \alpha_1 = 900 \text{кД};$$

$$I_{\alpha_2} = 1000 \cos \alpha_2 = 800 \text{кД}.$$

Далее определим модули световых векторов, создаваемых в точке Б первым и вторым источниками света:

$$\varepsilon_1 = \frac{I_{\alpha_1}}{l_1^2} = 900 / 20 = 45 \text{лк};$$

$$\varepsilon_2 = \frac{I_{\alpha_2}}{l_2^2} = 800 / 25 = 32 \text{лк}.$$

Зная модули и направления световых векторов от каждого точечного источника света, находим по правилу параллелограмма направление и значение светового вектора в точке Б (рис. П2):
 $\varepsilon_B = 66,1 \text{лк}; \alpha = 0^\circ$.

2. Определим косинусы углов падения и силы света каждого источника в направлении точки Б. Выбираем направление координатных осей, указанное на рис. П1.

Определяем проекции световых векторов $\vec{\varepsilon}_1$ и $\vec{\varepsilon}_2$ на координатные оси: $\varepsilon_{1x} = \varepsilon_{2x} = 0$; так как направления световых векторов $\vec{\varepsilon}_1$ и $\vec{\varepsilon}_2$ перпендикулярны оси X, то

$$\varepsilon_{1y} = \frac{I_{\alpha_1}}{l_1^2} \cos(90^\circ + \alpha_1^0) = \frac{2}{\sqrt{2}} \frac{900}{3} = -20 \text{лк};$$

$$\varepsilon_{2y} = \frac{I_{\alpha_2}}{l_2^2} \cos(90^\circ + \alpha_2^0) = \frac{800}{25} \frac{3}{5} = 19,2 \text{лк};$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{1y} + \varepsilon_{2y} = -20 \text{лк} + 19,2 \text{лк} = -0,8 \text{лк};$$

$$\varepsilon_{1x} = \frac{I_{\alpha_1}}{l_1^2} \cos \alpha_1 = \frac{900}{3} 0,9 = 40,5 \text{лк};$$

$$\varepsilon_{2_x} = \frac{I_{\alpha 2}}{l_2^2} \cos \alpha_2 = \frac{800}{25} 0,8 = 25,6 \text{лк};$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{1_x} + \varepsilon_{2_x} = 40,5 \text{лк} + 25,6 \text{лк} = 66,1 \text{лк}.$$

Зная проекции светового вектора на координатные оси, определим его модуль:

$$|\vec{\varepsilon}_B| = \sqrt{\varepsilon_y^2 + \varepsilon_x^2} \approx 66,1 \text{лк}.$$

Определяем направляющие косинусы светового вектора в точке Б:

$$\cos(\vec{\varepsilon}_B, \vec{x}) = 0; \cos(\vec{\varepsilon}_B, \vec{y}) = \varepsilon_y / |\vec{\varepsilon}_B| = -0,0121;$$

$$\cos(\vec{\varepsilon}_B, \vec{z}) = \varepsilon_z / |\vec{\varepsilon}_B| \approx 1;$$

$$(\vec{\varepsilon}_B, \vec{z}) = \alpha = 0^\circ.$$

6.20. Элемент плоскости будет иметь максимальную освещенность, если он расположен перпендикулярно световому вектору. Максимальная освещенность равна модулю светового вектора.

6.21. Тело распределения освещенности в точке Б, создаваемое точечным источником, - шар. Диаметр шара равен модулю светового вектора: $D = |\vec{\varepsilon}_B| = 2,5 \text{лк}$ (рис. П3).

6.22. Максимальная освещенность в точке Б создается на плоскости, перпендикулярной световому вектору. Тело распределения освещенности показано на рис. П4.

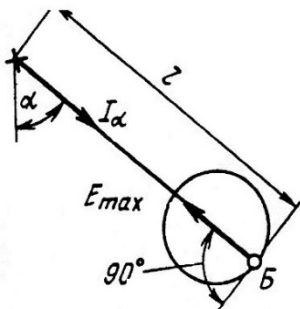


Рис. П3

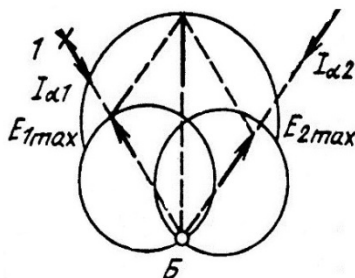


Рис. П4

6.23. а) $\varepsilon_B = 1120$ лк; $\cos(\vec{\varepsilon}_B \wedge \vec{x})=0$; $\cos(\vec{\varepsilon}_B \wedge \vec{y})=0,336$;
 $\cos(\vec{\varepsilon}_B \wedge \vec{z})=0,84$; $\varepsilon_{B_1}=460$ лк; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{x})=0,786$;
 $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{y})=487$; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{z})=0,4$; б) $(E_B)_{4\pi}=294$ лк;
 $(E_{B_1})_{4\pi}=123$ лк.

6.24. а) $\varepsilon_{B_2}=1840$ лк; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_2} \wedge \vec{z})=1$;
 $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_2} \wedge \vec{x})=\cos(\vec{\varepsilon}_{B_2} \wedge \vec{y})=0$; $\varepsilon_{B_3}=720$ лк; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_3} \wedge \vec{x})=0,9$;
 $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_3} \wedge \vec{y})=0$; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_3} \wedge \vec{z})=0,45$; б) $(E_{B_2})_{xB_2z}=515$ лк;
 $(E_{B_3})_{xB_3z}=152$ лк; в) $(E_{B_2})_{4\pi}=514$ лк; $(E_{B_3})_{4\pi}=149$ лк; г) 1.
 $(E_{B_2})_{\text{цх}}=720$ лк; $(E_{B_2})_{\text{цy}}=580$ лк; $(E_{B_2})_{\text{цz}}=326$ лк; $(E_{B_3})_{\text{цх}}=314$ лк;
 $(E_{B_3})_{\text{цy}}=360$ лк; $(E_{B_3})_{\text{цz}}=336$ лк; 2. $(E_{B_2})_{\text{цх}}=(E_{B_2})_{\text{цy}}=1880$ лк;
 $(E_{B_2})_{\text{цz}}=0$; $(E_{B_3})_{\text{цх}}=168$ лк; $(E_{B_3})_{\text{цy}}=376$ лк; $(E_{B_3})_{\text{цz}}=336$ лк.

6.25. а) $\varepsilon_{B_1}=143$ лк; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{x})=0,74$; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{y})=0,584$;
 $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{z})=0,368$; $E_{\text{ц}B_1}=51,7$ лк; б) $\varepsilon_{B_1}=139$ лк;
 $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{x})=0,76$; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{y})=0,536$; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{z})=0,38$;
 $\varepsilon_{B_1\text{пол}}=128$ лк; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{x})=0,74$; $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{y})=0,576$;
 $\cos(\vec{\varepsilon}_{B_1} \wedge \vec{z})=0,364$; $E_{\text{ц}B_1}=46$ лк.

6.26. а) $E_{P_1}=14,2$ лк; б) $E_{P_2}=7$ лк; в) $E_{B_{\text{ц}}}=6$ лк;
 $E_{B_{4\pi}}=2,5$ лк; $E_{B_{2\pi}}=3,8$ лк.

6.27. а) $E_{BP}=42$ лк; б) $E_{B_{\text{цy}}}=18,8$ лк; $E_{B_{4\pi}}=15,6$ лк;
 $E_{B_{2\pi}}=26$ лк.

6.28. $\varepsilon_B=50$ лк; $\cos(\vec{\varepsilon}_B \wedge \vec{z})=0,68$ лк; $\cos(\vec{\varepsilon}_B \wedge \vec{y})=0,154$ лк.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Спектральный коэффициент излучения вольфрама

λ , нм	Т, К							
	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
300	0,488	0,486	0,483	0,481	0,478	0,475	0,473	0,470
325	0,476	0,474	0,472	0,470	0,469	0,467	0,465	0,463
350	0,469	0,468	0,467	0,466	0,465	0,464	0,463	0,462
375	0,476	0,475	0,473	0,472	0,471	0,470	0,469	0,468
400	0,479	0,476	0,474	0,471	0,468	0,466	0,463	0,460
425	0,473	0,470	0,467	0,463	0,460	0,457	0,453	0,450
450	0,470	0,466	0,463	0,459	0,456	0,449	0,449	0,445
500	0,459	0,456	0,453	0,450	0,447	0,444	0,441	0,438
550	0,453	0,451	0,448	0,446	0,443	0,441	0,439	0,436
600	0,447	0,445	0,443	0,441	0,438	0,436	0,436	0,432
650	0,440	0,438	0,436	0,434	0,432	0,430	0,428	0,426
700	0,436	0,434	0,431	0,429	0,427	0,425	0,423	0,420
750	0,430	0,426	0,422	0,418	0,414	0,410	0,405	0,401
800	0,418	0,409	0,401	0,392	0,383	0,375	0,366	0,357
900	0,398	0,387	0,376	0,365	0,354	0,342	0,331	0,320
1000	0,375	0,347	0,351	0,339	0,327	0,315	0,302	0,290
1100	0,345	0,334	0,322	0,311	0,290	0,288	0,276	0,265
1200	0,317	0,308	0,298	0,289	0,279	0,270	0,260	0,251
1300	0,295	0,288	0,280	0,273	0,266	0,258	0,251	0,241
1400	0,278	0,273	0,268	0,263	0,258	0,253	0,247	0,242
1500	0,264	0,261	0,258	0,256	0,253	0,250	0,247	0,244

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Характеристики вольфрама

T, К	Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda T}$ для $\lambda=0,655$ мкм	Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda T}$ для $\lambda=0,467$ мкм	Спектральный коэффициент излучения в видимой части спектра ε	Интегральный коэффициент излучения ε_T	Яркостная температура, $T_{я}, К$	Цветовая температура, $T_{ц}, К$	Радиационная температура, К
300	0,47	0,505	-	-	-	-	-
400	0,468	0,501	-	-	-	-	-
600	0,464	0,494	-	-	-	-	-
800	0,460	0,488	-	-	-	-	-
1000	0,456	0,483	0,463	0,100	966	1005	562
1200	0,452	0,478	0,456	0,140	1149	1208	733
1400	0,448	0,475	0,452	0,176	1330	1412	907
1600	0,443	0,471	0,449	0,210	1508	1618	1093
1800	0,439	0,469	0,446	0,240	1624	1823	1259
2000	0,435	0,466	0,446	0,264	1857	2030	1434
2100	0,433	0,465	0,444	0,275	1943	2134	1521
2200	0,431	0,463	0,443	0,285	2207	2238	1608
2300	0,429	0,462	0,441	0,295	2111	2342	1695
2400	0,427	0,461	0,440	0,304	2192	2244	1782
2500	0,425	0,460	0,439	0,312	2275	2554	1868
2600	0,423	0,459	0,437	0,320	2356	2660	1955
2700	0,421	0,457	0,436	0,328	2437	2676	2042
2800	0,419	0,456	0,434	0,334	2515	2874	2128
2900	0,417	0,455	0,433	0,341	2595	2983	2214
3000	0,415	0,454	0,432	0,347	2674	3092	2300
3200	0,411	0,452	0,429	0,356	2827	3312	2472
3400	0,407	0,450	0,427	0,365	2978	3522	2643
3655	0,402	0,447	0,424	0,372	3166	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Значение энергетической светимости, яркости и светимости
черного тела при различных температурах

Температура T , К	Энергетическая светимость M_e^0 , Вт·м ⁻²	Яркость L^0 , кд·м ⁻²	Светимость M^0 , лм·м ⁻²
1200	$11,84 \cdot 10^4$	$0,0144 \cdot 10^4$	$0,452 \cdot 10^4$
1400	$21,93 \cdot 10^4$	$0,2429 \cdot 10^4$	$0,763 \cdot 10^4$
1600	$37,41 \cdot 10^4$	$2,085 \cdot 10^4$	$6,550 \cdot 10^4$
1700	$43,68 \cdot 10^4$	$5,093 \cdot 10^4$	$16,0 \cdot 10^4$
1800	$59,93 \cdot 10^4$	$11,31 \cdot 10^4$	$35,53 \cdot 10^4$
1900	$74,4 \cdot 10^4$	$23,17 \cdot 10^4$	$72,79 \cdot 10^4$
2000	$91,34 \cdot 10^4$	$44,28 \cdot 10^4$	$139,1 \cdot 10^4$
2100	$111,03 \cdot 10^4$	$79,73 \cdot 10^4$	$250,5 \cdot 10^4$
2200	$133,74 \cdot 10^4$	$136,3 \cdot 10^4$	$428,2 \cdot 10^4$
2300	$160,30 \cdot 10^4$	$222,7 \cdot 10^4$	$699,6 \cdot 10^4$
2400	$189,41 \cdot 10^4$	$349,6 \cdot 10^4$	$1098,3 \cdot 10^4$
2500	$223,00 \cdot 10^4$	$530,2 \cdot 10^4$	$1696 \cdot 10^4$
2600	$260,89 \cdot 10^4$	$778,9 \cdot 10^4$	$2447 \cdot 10^4$
2700	$303,40 \cdot 10^4$	$1114 \cdot 10^4$	$3500 \cdot 10^4$
2800	$350,91 \cdot 10^4$	$1552 \cdot 10^4$	$4876 \cdot 10^4$
2900	$403,8 \cdot 10^4$	$2116 \cdot 10^4$	$6628 \cdot 10^4$
3000	$462,4 \cdot 10^4$	$2827 \cdot 10^4$	$8881 \cdot 10^4$
3500	$856,7 \cdot 10^4$	$9432 \cdot 10^4$	$29630 \cdot 10^4$
4000	$1461 \cdot 10^4$	$2,34 \cdot 10^4$	$7,35 \cdot 10^4$
5000	$3568 \cdot 10^4$	$8,41 \cdot 10^4$	$2,64 \cdot 10^4$
6000	$7399 \cdot 10^4$	$1,98 \cdot 10^4$	$6,23 \cdot 10^4$
7000	$13707 \cdot 10^4$	$3,67 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^4$
8000	$23384 \cdot 10^4$	$5,82 \cdot 10^4$	$1,83 \cdot 10^4$
10000	$57090 \cdot 10^4$	$1,12 \cdot 10^4$	$3,50 \cdot 10^4$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Функция Планка $\eta = 142,3\xi^{-5} \left(e^{4,965 / \xi^{-1}} \right)^{-1}$
в относительных координатах

ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$	ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$
0,10	$4,7 \cdot 10^{-13}$	0,48	17,97
0,15	$7,91 \cdot 10^{-6}$	0,49	20,03
0,20	$7,37 \cdot 10^{-4}$	0,50	22,17
0,21	$0,188 \cdot 10^{-2}$	0,51	24,39
0,22	$0,437 \cdot 10^{-2}$	0,52	26,70
0,23	$0,931 \cdot 10^{-2}$	0,53	29,06
0,24	$1,85 \cdot 10^{-2}$	0,54	31,48
0,25	$3,45 \cdot 10^{-2}$	0,55	33,92
0,26	$6,10 \cdot 10^{-2}$	0,56	36,45
0,27	0,102	0,57	38,98
0,28	0,162	0,58	41,52
0,29	0,254	0,59	44,08
0,30	0,380	0,60	46,93
0,31	0,550	0,61	49,17
0,32	0,774	0,62	51,70
0,33	1,062	0,63	54,20
0,34	1,425	0,64	56,67
0,35	1,870	0,65	59,08
0,36	2,41	0,66	61,45
0,37	3,051	0,67	63,78
0,38	3,801	0,68	66,06
0,39	4,667		
0,40	5,648	0,69	68,25
0,41	6,76	0,70	70,42
		0,71	72,48
0,42	8,00	0,72	74,48
0,43	9,36	0,73	76,42
0,44	10,84		
0,45	12,45	0,74	78,28
0,46	14,18	0,75	80,05
0,47	16,02	0,76	81,74
		0,77	83,36

Продолжение прил. 4

ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$	ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$
0,78	84,91	1,11	97,47
0,79	86,36	1,12	97,04
0,80	87,74		
0,81	89,94	1,13	96,59
0,82	90,26	1,14	96,12
0,83	91,40	1,15	95,63
		1,16	95,11
0,84	92,46	1,17	94,56
0,85	93,45	1,18	93,99
0,86	94,35		
0,87	95,16	1,19	93,39
0,88	95,95	1,20	92,77
		1,21	92,14
0,89	96,63	1,22	91,50
0,90	97,24	1,23	90,85
0,91	97,28	1,24	90,19
0,92	98,26		
0,93	98,68	1,25	89,51
		1,26	88,82
0,94	99,04	1,27	88,12
0,95	99,34	1,28	87,41
0,96	99,59	1,29	86,70
0,97	99,78	1,30	85,98
0,98	99,90		
		1,31	85,26
0,99	99,97	1,32	84,53
1,00	100,00	1,33	83,79
1,01	99,98	1,34	83,05
1,02	99,91	1,35	82,30
1,03	99,79	1,36	81,55
1,04	99,63	1,37	80,80
1,05	99,44	1,38	80,04
1,06	99,20	1,39	79,09
1,07	98,92	1,40	78,53
1,08	98,60	1,41	77,77
1,09	98,26	1,42	77,01
1,10	97,88		

Продолжение прил. 4

ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$	ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$
1,43	76,26	1,77	52,76
1,44	75,51	1,78	52,16
1,45	74,76	1,79	51,57
1,46	74,01		
1,47	73,27	1,80	50,99
1,48	72,52	1,82	49,84
1,49	71,78	1,84	48,70
1,50	71,04	1,86	47,60
1,51	70,30	1,88	46,52
1,52	69,56	1,90	45,46
1,53	68,83	1,92	44,43
1,54	68,10	1,94	43,42
1,55	67,38	1,96	42,43
1,56	66,66	1,98	41,47
1,57	65,94	2,00	40,54
1,58	65,20	2,05	38,27
1,59	64,51		
1,60	63,80	2,10	36,14
1,61	63,10	2,15	34,14
		2,20	32,28
1,62	62,41	2,25	30,53
1,63	61,73	2,30	28,87
1,64	61,05	2,35	27,31
1,65	60,38		
1,66	59,72	2,40	25,85
1,67	59,06	2,45	24,47
		2,50	23,18
1,68	58,40	2,55	21,96
1,69	57,75	2,60	20,83
1,70	57,11	2,65	19,76
1,71	56,47		
1,72	55,84	2,70	18,75
		2,75	17,79
1,73	55,21	2,80	16,88
1,74	54,59	2,85	16,05
1,75	53,98	2,90	15,28
1,76	53,37	2,95	14,53

Окончание прил. 4

ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$	ξ	$\eta \cdot 10^{-2}$
3,00	13,83	5,00	2,68
3,10	12,57	6,00	1,421
3,20	11,41	7,00	0,820
3,30	10,38	8,00	0,505
3,40	9,47	9,00	0,327
3,50	8,66	10,00	0,223
3,60	7,92	15,00	$4,78 \cdot 10^{-2}$
3,70	7,26	20,00	$1,58 \cdot 10^{-2}$
3,80	6,67	30,00	$32,5 \cdot 10^{-4}$
3,90	6,14	40,00	$10,5 \cdot 10^{-4}$
4,00	5,65	50,00	$4,36 \cdot 10^{-4}$
4,50	3,83		

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

$$\text{Функция } \psi(\xi) = \frac{\int_0^{\xi} \eta d\xi}{\int_0^{\infty} \eta d\xi}$$

ξ	$\psi(\xi)$	ξ	$\psi(\xi)$
0,1	$5,5 \cdot 10^{-16}$	1,6	58,46
0,2	$0,04 \cdot 10^{-4}$	1,7	62,43
0,3	$54,7 \cdot 10^{-4}$	1,8	65,98
0,4	$15,4 \cdot 10^{-2}$	1,9	69,15
0,5	1,0054	2,0	71,96
0,6	3,25	2,5	82,14
0,7	7,12	3,0	88,07
0,8	12,37	3,5	91,7
0,9	17,5	4,0	94,01
1,0	25	6,0	97,89
1,1	31,55	8,0	99,03
1,2	37,81	10,0	99,48
1,3	43,71	20	99,93
1,4	49,11	40	99,99
1,5	54,03	50	99,995

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Спектральная плотность энергетической светимости черного тела

$$M_{e\lambda}^0(\lambda, T), 10^{-4} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм)}$$

$\lambda, \text{нм}$	Т. К																
	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000
380	0,0032	0,30	0,169	0,707	2,367	6,666	16,352	35,854	71,679	135	232	376	585	890	1300	1800	2500
400	0,0085	0,060	0,309	1,200	3,781	10,110	23,712	49,990	96,537	177	292	476	720	1060	1510	2080	2790
420	0,0171	0,111	0,525	1,913	5,707	14,563	32,795	66,728	124,885	220	345	563	836	1300	1730	2330	3120
440	0,0324	0,192	0,844	2,892	8,209	20,073	43,566	85,728	156,122	268	432	660	950	1450	1920	2540	3340
460	0,0058	0,312	1,284	4,176	11,327	26,642	55,909	106,943	189,540	321	498	740	1072	1585	2080	2730	3580
480	0,0094	0,482	1,872	5,079	15,079	34,225	69,638	129,655	224,382	370	570	839	1184	1670	2240	2900	3730
500	0,152	0,714	2,625	7,770	19,457	42,736	84,521	153,504	259,897	417	634	922	1292	1800	2390	3040	3880
520	0,223	1,018	3,560	10,106	24,429	52,059	100,294	178,022	295,376	464	704	1000	1380	1910	2470	3140	3960
540	0,332	1,404	4,687	12,799	29,946	62,051	116,679	202,756	330,180	510	754	1080	1450	1980	2560	3220	4050
560	0,46	1,879	6,010	15,834	35,939	72,559	133,398	227,288	363,652	551	810	1130	1520	2050	2620	3280	4070
580	0,64	2,451	7,530	19,185	42,332	83,421	150,186	251,244	395,652	594	856	1185	1575	2100	2660	3310	4080
600	0,84	3,122	9,239	22,819	49,038	94,479	166,798	274,303	425,505	632	900	1200	1620	2130	2695	3320	4065
620	1,01	3,894	11,128	26,694	55,969	105,578	183,015	296,190	453,046	660	936	1225	1650	2150	2705	3310	4040
640	1,39	4,767	13,182	30,767	63,036	116,578	198,649	316,723	489,641	700	976	1200	1685	2160	2700	3100	3940
660	1,75	5,737	15,382	34,993	70,153	127,351	213,543	335,718	500,532	711	988	1310	1690	2159	2690	3250	3920
680	2,11	6,799	17,708	39,323	77,241	137,786	227,570	353,074	520,321	732	1010	1325	1700	2150	2670	3210	3830
700	2,55	7,946	20,138	43,712	84,224	147,789	240,635	368,726	537,468	748	1020	1338	1700	2125	2620	3150	3760
720	3,06	9,170	22,648	48,115	91,038	157,280	252,667	382,644	552,025	761	1030	1340	1680	2100	2590	3100	3660
740	3,52	10,446	25,215	52,490	97,626	161,160	263,622	394,830	564,078	767	1035	1339	1660	2070	2550	3020	3570

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Значения угловых коэффициентов (зональных телесных углов)

Интервал изменений угла α		Зональный телесный угол, ср
Нижнее полупространство	Верхнее полупространство	
0-10	170-180	0,096
10-20	160-170	0,284
20-30	150-160	0,463
30-40	140-150	0,628
40-50	130-140	0,774
50-60	120-130	0,897
60-70	110-120	0,992
70-80	100-110	1,057
80-90	90-100	1,092

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Относительная спектральная витальная эффективность излучения

λ , нм	$V_{\text{вит}}(\lambda)$		λ , нм	$V_{\text{вит}}(\lambda)$	
	В области УФ-В	В области УФ-А		В области УФ-В	В области УФ-А
280	0	0	320	0	0,010
285	0,09	0	325	0	0,007
289	0,25	0	330	0	0,005
290	0,31	0	334	0	0,004
295	0,98	0	340	0	0,003
297	1,00	0	350	0	0,002
300	0,83	0	360	0	0,0014
302	0,55	0	365	0	0,0012
305	0,33	0	370	0	0,0011
310	0,11	0	380	0	0,0007
313	0,025	0,005	390	0	0,0003
315	0,01	0,08	400	0	0

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Относительная спектральная световая эффективность излучения

λ , нм	V_λ	λ , нм	V_λ
380	0,00004	565	0,09786
385	0,00006	570	0,9520
390	0,00012	575	0,9154
395	0,00022	580	0,8700
400	0,00040	585	0,8163
405	0,00064	590	0,7570
410	0,00120	595	0,6949
415	0,00218	600	0,6310
420	0,00400	605	0,5668
425	0,00726	610	0,5030
430	0,0116	615	0,4412
435	0,0168	620	0,3810
440	0,0230	625	0,3210
445	0,0298	630	0,2650
450	0,0380	635	0,2170
455	0,0480	640	0,1750
460	0,0600	645	0,1382
465	0,0739	650	0,1070
470	0,0910	655	0,0816
475	0,1126	660	0,0610
480	0,1390	665	0,0446
485	0,1693	670	0,0320
490	0,2080	675	0,0232
495	0,2586	680	0,0170
500	0,3230	685	0,0119
505	0,4073	690	0,00820
510	0,5030	695	0,00573
515	0,6083	700	0,00410
520	0,7100	705	0,00291
525	0,7932	710	0,00210
530	0,8620	715	0,00148
535	0,9149	720	0,00105
540	0,9540	725	0,00074
545	0,9803	730	0,00052
550	0,9950	735	0,00036
555	1,0001	740	0,00025
560	0,9950		
745	0,00017	760	0,00006
750	0,00012	765	0,00004
755	0,00008	770	0,00003

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Относительная спектральная бактерицидная эффективность

λ , нм	$V_{бак}(\lambda)$		λ , нм	$V_{бак}(\lambda)$	
	В области УФ - С и УФ - В	В области УФ - А		В области УФ - С и УФ - В	В области УФ - А
220	0,25	0	330	0	0,0016
230	0,40	0	340	0	0,0009
240	0,63	0	350	0	0,00046
260	0,99	0	360	0	0,00030
280	0,59	0	370	0	0,00019
290	0,30	0	380	0	0,00015
302	0,045	0	390	0	0,00012
310	0,013	0	400	0	0,00010
315	0,003	0,003			
320	0	0,004			

Литература

Гуторов М.М. Сборник задач по основам светотехники: учеб. пособие для вузов, 3-е изд. перераб. и доп. / М.М. Гуторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

Содержание

1. ФОТОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ	3
2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	5
3. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	10
3.1. Законы излучения черного тела	10
3.2. Законы излучения реального тела	12
4. ЭФФЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ	14
4.1. Световые характеристики излучения	15
4.2. Бактерицидные характеристики излучения	18
4.3. Витальные характеристики излучения	18
5. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛ	25
6. СВЕТОВОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА	33
6.1. Поле линейного излучателя	34
6.2. Линейный излучатель, равнорядный в продольной плоскости	37
6.3. Поле светящегося горизонтально расположенного прямоугольника	38
6.4. Поле светящегося, вертикально расположенного прямоугольника	39
6.5. Равнорядный, горизонтально расположенный пря- моугольник	40
6.6. Равнорядный круг	41
ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ	49
ПРИЛОЖЕНИЯ	
1. Спектральный коэффициент излучения вольф- рама	64
2. Характеристики вольфрама	65
3. Значение энергетической светимости, яркости и светимости черного тела при различных темпера- турах	66

4. Функция Планка $\eta = 142,3\xi^{-5}(e^{4,965/\xi-1})^{-1}$ в относительных координатах	67
5. Функция $\psi(\xi) = \int_0^{\xi} \eta d\xi / \int_0^{\infty} \eta d\xi$	70
6. Спектральная плотность энергетической светимости черного тела $M_{e\lambda}^0(\lambda T)$, 10^{-4} Вт/(м ² ·мкм)..	71
7. Значения угловых коэффициентов (зональных телесных углов)	72
8. Относительная спектральная витальная эффективность излучения	72
9. Относительная спектральная световая эффективность излучения	73
10. Относительная спектральная бактерицидная эффективность	74
Литература	74