

Обобщенный метод расчета облученности от абсолютно черного тела

А. И. Патрашин, А. В. Никонов, В. С. Ковшов

Рассмотрен метод расчета облученности, создаваемой абсолютно черным телом (АЧТ) в произвольной плоскости, параллельной его диафрагме. Метод основан на использовании понятия «коэффициент пропускания холодной диафрагмы МФПУ», описывающего отношение потока излучения, попадающего в заданную точку плоскости сквозь диафрагму, к потоку излучения, падающему в данную точку из полусферы. Установлена полная сходимость результатов расчета величины облученности предложенным методом и единственным нормативным методом, описанным в ГОСТ 17772–88. Рассмотрены результаты расчета облученностей и нормированной разности облученностей от АЧТ с круглыми и квадратными диафрагмами в диапазоне от 0,06 мм до 20 см, и распределения облученности по площади. Показано, что облученность от АЧТ с круглой диафрагмой отличается от облученности, создаваемой АЧТ с квадратной диафрагмой такой же площади, не более, чем на один процент. Установлена полная применимость предложенного метода для расчета облученности, создаваемой АЧТ.

Ключевые слова: облученность, АЧТ, круглая диафрагма, квадратная диафрагма, распределение облученности по площади, неоднородность облученности.

Введение

Абсолютно чёрные тела (АЧТ) играют большую роль в экспериментальной ИК-фотонике и используются для создания облученности с известным спектральным распределением [1–5]. С помощью АЧТ проводят измерения таких характеристик одиночных фотоприемников и матричных ИК фотоприемных устройств (ИК МФПУ), как амперваттную, вольттовую или температурную чувствительность, ограниченную шумом облученность, мощность или разность температур, а также удельную обнаружительную способность и динамический диапазон. С помощью АЧТ можно устанавливать сигнальную и фоновую нагрузку на фотоприемник в нужном спектральном диапазоне. Изменяя температуру и диафрагму АЧТ, а также

расстояние между АЧТ и приемником излучения, мы всегда сможем обеспечить ее необходимую величину.

АЧТ можно разделить на два типа.

Первый тип – это АЧТ с излучающей полостью, на выходе которой установлена диафрагма с заданными размерами и формами, как правило, круговая, ограничивающая размер излучающей площадки. Размеры излучающих площадок таких АЧТ обычно составляют несколько миллиметров, а температура полости АЧТ может достигать 1300 К.

Второй тип – это АЧТ с излучающей плоскостью, характерный размер (диаметр) которой может достигать 20–40 см, а температура может повышаться до 800 К.

При использовании любого АЧТ в стендах для измерения параметров необходимо знать величину облученности, создаваемую в заданной плоскости размещения одиночного фотоприемника или матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ). Для этого требуется корректный метод расчета, как величины, так и распределения облученности, создаваемой АЧТ, по площади, который мы и собираемся представить в данной работе.

Нормативный метод расчета облученности

В единственном нормативном источнике Российской Федерации описан метод расчета потока

Патрашин Александр Иванович¹, в.н.с., к.ф.-м.н.

Никонов Антон Викторович^{1,2}, начальник НИЦ, доцент, к.ф.-м.н.

Ковшов Владимир Сергеевич^{1,2}, инженер.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2017 г.

излучения (энергетического) от АЧТ первого типа, используемого для измерения параметров одиночного или многоэлементного фотоприемника [6]. Метод расчета основан на законе Стефана-Больцмана [7]. Согласно указанному методу, поток излучения Φ , Ватт, с температурой $T_{\text{АЧТ}}$, К, падающий на приёмную площадку фотоприемника площадью A , см², отстоящую от излучающей площадки АЧТ величиной F , см², на расстоянии l , см, равен

$$\Phi = \frac{\sigma_P (\varepsilon_1 T_{\text{АЧТ}}^4 - \varepsilon_0 T_0^4) FA}{\pi l^2}, \quad (1)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \times 10^{-12}$ Вт·см⁻²·К⁻⁴; ε_1 – степень серости излучения АЧТ; ε_0 – степень серости заслонки АЧТ; T_0 – температура заслонки (фонового излучения), К.

На самом деле формула (1) выражает превышение потока излучения от АЧТ над потоком излучения от заслонки. Это превышение используется для измерения фотоэлектрических характеристик фотоприемников, когда приращение потока излучения вызывает приращение сигнала на выходе фотоприемника. Для стационарного потока излучения АЧТ формула (1) должна быть скорректирована с теми же обозначениями в следующем виде:

$$\Phi_{\text{АЧТ}_P} = \frac{\sigma_P \varepsilon_1 T_{\text{АЧТ}}^4 FA}{\pi l^2}. \quad (2)$$

В [6] отсутствует упоминание о фотонном потоке излучения АЧТ. Позволим себе восполнить эту недостачу, которая важна при измерении отдельных параметров фотонных приемников.

Поток излучения (фотонный) от АЧТ первого типа, падающий на приёмную площадку фотоприемника или МФЧЭ, можно выразить, с помощью формулы, описывающей закон Стефана-Больцмана для фотонов [8], в следующем виде:

$$\Phi_{\text{АЧТ}_N} = \frac{\sigma_N \varepsilon_1 T_{\text{АЧТ}}^3 FA}{\pi l^2}, \quad (3)$$

где $\sigma_N = 1,52 \times 10^{11}$ фот·с⁻¹·см⁻²·К⁻³ – постоянная Стефана-Больцмана (фотонная).

Все остальные обозначения, как в (1).

В [6] также указано, что формула (1) с погрешностью не более 1 % справедлива для минимального расстояния от АЧТ до МФЧЭ, $l_{\text{мин}}$, см, удовлетворяющего следующему выражению:

$$l_{\text{мин}} \geq 5\sqrt{F}. \quad (4)$$

Формулы (1), (2), (3) и (4) справедливы, когда размеры фоточувствительной площадки малы по

отношению к расстоянию l , а сама площадка расположена на нормали к центру излучающей площадки АЧТ и параллельна ей. В [6] отсутствует какое-либо упоминание о величине потока излучения, падающего на площадку, расположенную вне нормали к излучающей площадке АЧТ.

Предлагаемый метод

В настоящей работе мы предлагаем новый метод расчета облученности, создаваемой с помощью АЧТ. Наш метод заключается в использовании закона Планка [7] и коэффициента пропускания холодной диафрагмы МФПУ [9] для нахождения искомой величины облученности, создаваемой АЧТ.

Напомним, что коэффициент пропускания диафрагмы в светоизолирующем экране определяется как отношение светового потока, проходящего сквозь неё и попадающего в заданную точку плоскости, отстоящей от диафрагмы на расстоянии l , к интегральному световому потоку, падающему в эту же точку из полусферы [9]. В АЧТ излучающая полость или плоскость расположена достаточно близко к диафрагме, так что можно считать, что излучение падает на диафрагму из полусферы. За диафрагмой оно распространяется внутри конуса к фиксированной точке плоскости, расположенной параллельно диафрагме. Основанием конуса является отверстие диафрагмы, а вершиной – заданная точка на плоскости расположения фотоприемника. Величина коэффициента пропускания диафрагмы всегда меньше единицы.

Выражения для расчета коэффициента пропускания холодной диафрагмы МФПУ, выведенные нами ранее [9], имеют следующий вид:

$$K_{\text{пр}}(x, y, l) = \iint_{S''} \frac{l^2 r dr d\varphi}{\pi \left[l^2 + (r \cos \varphi - x)^2 + (r \sin \varphi - y)^2 \right]^2} \quad (5)$$

$$K_{\text{пр}}(x, y, l) = \iint_{S''} \frac{l^2 d\xi d\eta}{\pi \left[l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 \right]^2}, \quad (6)$$

где x, y – координаты точки плоскости, в которой располагается фотоприемник; l – расстояние между плоскостью диафрагмы АЧТ и плоскостью расположения фотоприемника; S'' – область интегрирования (холодная диафрагма).

Выражение (5) служит и для расчета коэффициента пропускания холодной диафрагмы МФПУ,

форма которой может описываться в полярных координатах. Выражение (6) служит для расчета коэффициента пропускания холодной диафрагмы, форма которой определяется в координатах x и y .

Для АЧТ с диафрагмой круглой формы радиуса R , см, выражение, описывающее её коэффициент пропускания, будет иметь следующий вид:

$$K_{\text{пр}}(x, y, l, R) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \frac{l^2 r}{\pi [l^2 + (r \cos \varphi - x)^2 + (r \sin \varphi - y)^2]^2} dr \quad (7)$$

где x, y – координаты произвольной точки в плоскости фотоприемника или МФЧЭ, см; l – расстояние диафрагма АЧТ – фотоприемная плоскость; r – полярный радиус-вектор в плоскости диафрагмы; φ – полярный угол в плоскости диафрагмы.

Для АЧТ, имеющего диафрагму в форме прямоугольника со сторонами a и b , см, выражение, описывающее её коэффициент пропускания, будет иметь следующий вид:

$$K_{\text{пр}}(x, y, l, a, b) = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} d\xi \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{l^2}{\pi [l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2} d\eta, \quad (8)$$

где x, y – координаты произвольной точки в плоскости фотоприемника или МФЧЭ, см.

За выходным отверстием АЧТ расположена излучающая полость или плоскость АЧТ с температурой $T_{\text{АЧТ}}$, излучение которой, согласно закону Планка, имеет в спектральном диапазоне $[\lambda_1; \lambda_2]$ интегральную плотность мощности, $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}$,

$$P(T_{\text{АЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T_{\text{АЧТ}}}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (9)$$

и интегральную плотность потока фотонов, $\text{фот}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$,

$$N(T_{\text{АЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T_{\text{АЧТ}}}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (10)$$

где $c = 2,998 \times 10^{10}$ $\text{см}\cdot\text{с}^{-1}$ – скорость света; $k_B = 1,381 \times 10^{-23}$ $\text{Вт}\cdot\text{с}\cdot\text{К}^{-1}$ – постоянная Больцмана; $h = 6,626 \times 10^{-34}$ $\text{Вт}\cdot\text{с}^2$ – постоянная Планка.

В расчетах мы использовали величину $\lambda_1 = 0,05$ $\mu\text{м}$ и величину $\lambda_2 = 10^5$ $\mu\text{м}$, что соответствовало, практически, всему спектру излучения АЧТ.

Тогда энергетическая и фотонная облученности от АЧТ с диафрагмой радиуса R в плоскости OXY , отстоящей от АЧТ на расстоянии l , будут определяться следующими выражениями:

$$W_p(x, y, l, R, T_{\text{АЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = K_{\text{пр}}(x, y, l, R) P(T_{\text{АЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2), \quad (11)$$

$$W_n(x, y, l, R, T_{\text{АЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2) = K_{\text{пр}}(x, y, l, R) N(T_{\text{АЧТ}}, \lambda_1, \lambda_2). \quad (12)$$

Аналогичные выражения будут справедливы и для АЧТ с прямоугольной излучающей плоскостью при замене $K_{\text{пр}}(7)$ на $K_{\text{пр}}(8)$.

Следует отметить, что предлагаемый метод позволяет точно рассчитывать облученность от АЧТ с излучающей плоскостью любого размера, расположенной даже на небольших расстояниях от плоскости МФЧЭ, во всех точках фотоприемной плоскости также любого размера. Доказательством этого утверждения может служить вывод коэффициента пропускания диафрагмы МФПУ [9], в котором используются лишь точные формулы без каких-либо приближений.

Исследование возможностей метода

Теперь сравним численные результаты расчета облученностей $\Phi_{\text{АЧТ}}/A$, $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}$ или $\text{фот}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ обоими методами, в точках, расположенных на оптической оси АЧТ. Они указаны в таблице. Все данные в таблице рассчитаны для четырех радиусов излучающей площадки АЧТ, R .

Таблица

Результаты расчета облученностей

Радиус излучающей площадки АЧТ, R , см	0,06	0,12	0,24	0,4
Площадь излучающей площадки АЧТ, F , см ²	0,011	0,045	0,18	0,5
Минимально возможное расстояние от АЧТ до МФЧЭ [6], l , см	0,56	1,13	2,26	3,76
Угол из центра фоточувствительной площадки к краям излучающей площадки АЧТ, α , град.	12,2	12,2	12,2	12,2
Максимальная облученность в центре фоточувствительной площадки при $T_{\text{АЧТ}} = 500$ К, $W_{\text{АЧТ}_P}$, Вт·см ⁻² метод 1 метод 2 $W_{\text{АЧТ}_N}$, фот·с ⁻¹ ·см ⁻² метод 1 метод 2	 3,94×10 ⁻³ 3,90×10 ⁻³ 2,11×10 ¹⁷ 2,09×10 ¹⁷	 3,94×10 ⁻³ 3,90×10 ⁻³ 2,11×10 ¹⁷ 2,09×10 ¹⁷	 3,94×10 ⁻³ 3,90×10 ⁻³ 2,11×10 ¹⁷ 2,09×10 ¹⁷	 3,94×10 ⁻³ 3,90×10 ⁻³ 2,11×10 ¹⁷ 2,09×10 ¹⁷
Относительная разность облученностей, рассчитанные в центре площадки, Δ , %	1	1	1	1
Неоднородность облученности фоточувствительной площадки, метод 2, ΔW , %	79,2	40,5	13,3	5,1

В таблице показаны расчётные минимальные расстояния $l_{\text{мин}}$ [6] между АЧТ с малой излучающей площадкой с $T_{\text{АЧТ}} = 500$ К и плоскостью расположения фоточувствительной площадки, определяемые выражением (4), апертурные углы из центра площадки к краям диафрагмы АЧТ, α , рассчитанные по формуле

$$\alpha = 2 \arctg \left(\frac{R}{l_{\text{мин}}} \right), \quad (13)$$

где R – радиус диафрагмы АЧТ, см.

Показаны также и результаты расчета максимальной облученности, $W_{\text{АЧТ}} = \Phi_{\text{АЧТ}}/A$, рассчитанные нормативным и предложенным методом в центре плоскости расположения фоточувствительной площадки при $T_{\text{АЧТ}} = 500$ К, а также относительные разности облученностей, %, по формуле

$$\Delta = \frac{W_{\text{АЧТ1}} - W_{\text{АЧТ2}}}{W_{\text{АЧТ1}}}, \quad (14)$$

и однородность облученности плоскости расположения фоточувствительной площадки, ΔW , определяемая по следующей формуле

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{АЧТ}}(x, y, l, R) &= \\ &= \frac{W(0, 0, l, R) - W(x, y, l, R)}{W(0, 0, l, R)}, \end{aligned} \quad (15)$$

где x, y – координаты точки, для которой рассчитывается неоднородность облученности в плоскости расположения фоточувствительной площадки.

Относительные отличия для минимально возможного расстояния между АЧТ и фотоприемной площадкой не превышают 1 % для обоих видов облученности, а неоднородность облученности

уменьшается при удалении АЧТ от плоскости расположения фоточувствительной, что и требовалось доказать.

Теперь рассмотрим рис. 1 с распределением облученности от АЧТ в плоскости расположения фоточувствительной площадки.

На рис. 1 показано распределения облученности по площадке, эквивалентной МФЧЭ формата 640×512 с шагом 15 мкм и размером 9,7×7,7 мм, предложенным методом от АЧТ с малыми круглыми диафрагмами (см. таблицу). За диаметр облучаемой площадки примем диагональ площадки, равную 1,24 см.

Рис. 1 показывает, что распределения облученности по площадке, несмотря на одинаковую облученность в центре площадки, совершенно разные. Максимальную неоднородность облученности создает АЧТ с минимальной диафрагмой и минимальным расстоянием от облучаемой площадки.

Таким образом, результаты расчета методом, использующим выражение для коэффициента пропускания диафрагмы МФПУ, совпадают с результатами расчета нормативным методом [6], что указывает на справедливость и корректность предложенного метода расчета облученности. Предлагаемый метод позволяет также рассчитывать облученность и ее неоднородность в любой точке плоскости МФЧЭ.

Расширим метод в сторону увеличения радиуса диафрагмы АЧТ и плавно перейдем от АЧТ с излучающей полостью к АЧТ с излучающей плоскостью. Для этого рассмотрим рис. 2, на котором изображен график зависимости облученности от АЧТ с разными радиусами от расстояния до облучаемой плоскости.

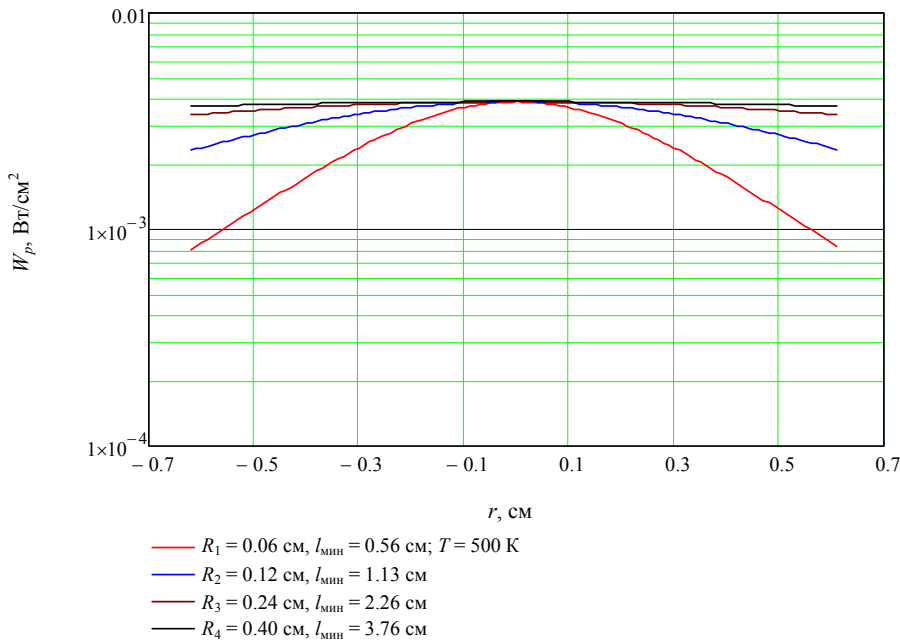


Рис. 1. Распределения облученности W_p по площадке.

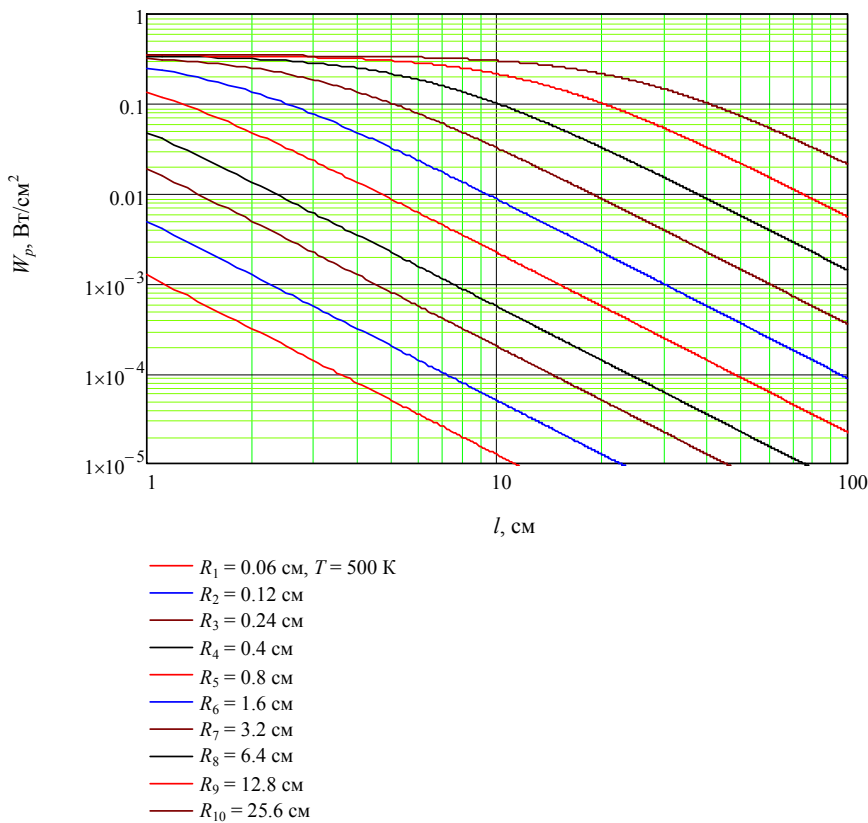


Рис. 2. Зависимость облученности W_p от расстояния до облучаемой плоскости l для АЧТ с разными радиусами диафрагмы R .

Рассматриваемый график имеет стандартную зависимость от расстояния и насыщение, определяемое размером площадки АЧТ. Чтобы убедиться в этом рассмотрим график зависимости, изображенный на рис. 3, с разными температурами АЧТ и постоянным радиусом диафрагмы.

Легко заметить, что все кривые имеют одну и ту же форму, но сдвинуты друг относительно дру-

га на величину прироста облученности, обусловленного температурой АЧТ при постоянном коэффициенте пропускания диафрагмы.

Рассмотрим также распределения облученности по плоскости от АЧТ с двумя диафрагмами для нескольких значений расстояния между АЧТ и облучаемой плоскостью. Эти распределения облученности изображены на рис. 4.

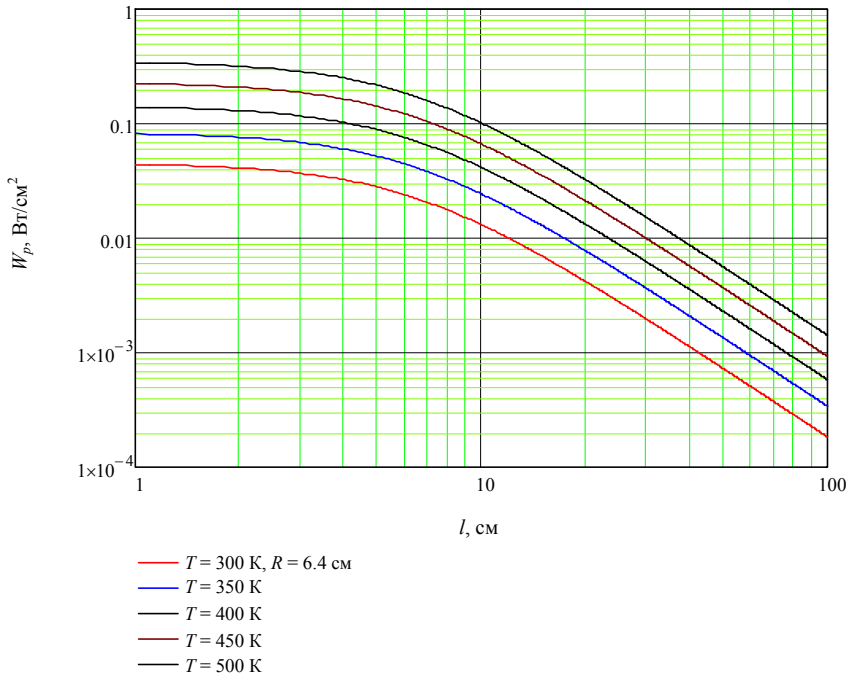


Рис. 3. Зависимость облученности от АЧТ W_p с разными температурами T от расстояния до облучаемой плоскости l при постоянном радиусе диафрагмы R .

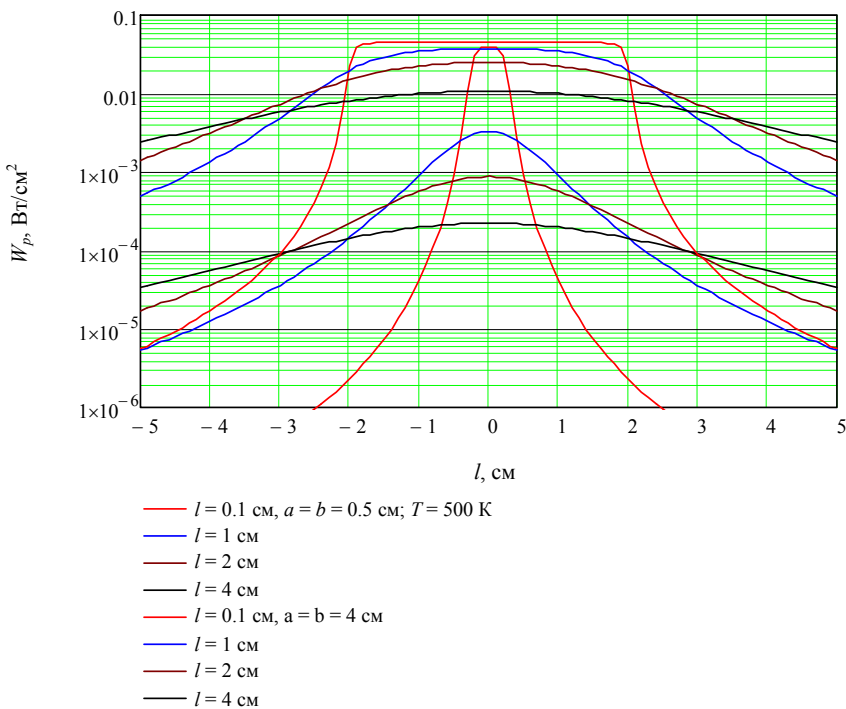


Рис. 4. Распределение облученности W_p в плоскости для двух диафрагм АЧТ и четырех расстояний до АЧТ l .

Для полноты картины следует рассмотреть соответствие облученностей от АЧТ с круглой и квадратной диафрагмами равной площади.

Сторона квадратной диафрагмы АЧТ рассчитывается в этом случае согласно следующей формуле:

$$a = b = \sqrt{\pi R^2} \tag{16}$$

где a, b – сторона квадратной диафрагмы.

Как указывалось ранее, облученность площадки, расположенной на расстоянии l от АЧТ с квадратной (прямоугольной) диафрагмой, описы-

вается выражениями типа (11), (12) с заменой $K_{пр}$ (7) на $K_{пр}$ (8).

Рассмотрим рис. 5. На нем приведены графики зависимости нормированной разности облученностей от АЧТ в центре площадки от расстояния между ними. АЧТ имеет круглые и квадратные равновеликие диафрагмы разных размеров и температуру $T_{АЧТ} = 500$ К. Относительная разность облученностей описывается формулой (14).

Из графика видно, что относительная разность облученностей близка к одному проценту во

всем диапазоне изменения размеров диафрагм АЧТ. Иначе говоря, величины облученностей в центре площадки практически полностью соответствуют друг другу.

Последнее, что осталось проверить – это относительная разность неоднородности облученности от круглой и квадратной диафрагм АЧТ равной площади.

На рис. 6 показана эта зависимость во всем реальном диапазоне размеров диафрагм для размера облучаемой площадки, эквивалентной по размерам МФЧЭ формата 640×512 с шагом 15 мкм. Видно, что для реальных расстояний между АЧТ и облучаемой площадкой не менее 4 см эта разность не превышает одного процента, что еще раз подтверждает эквивалентность круглой и квадратной диафрагм АЧТ.

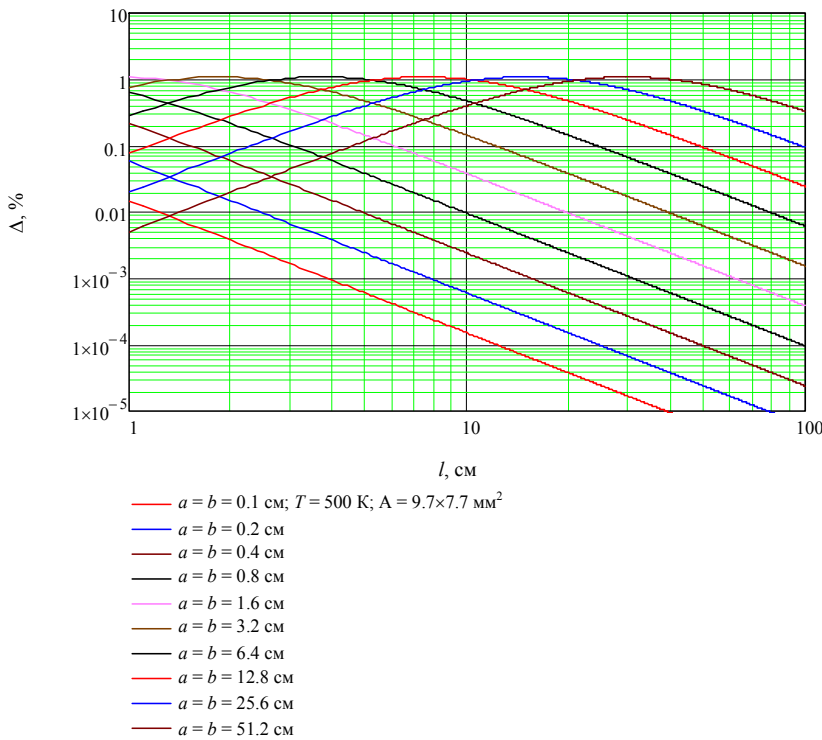


Рис. 5. Зависимость нормированной разности облученностей площадки Δ от АЧТ с круглыми и квадратными диафрагмами от расстояния между ними l .

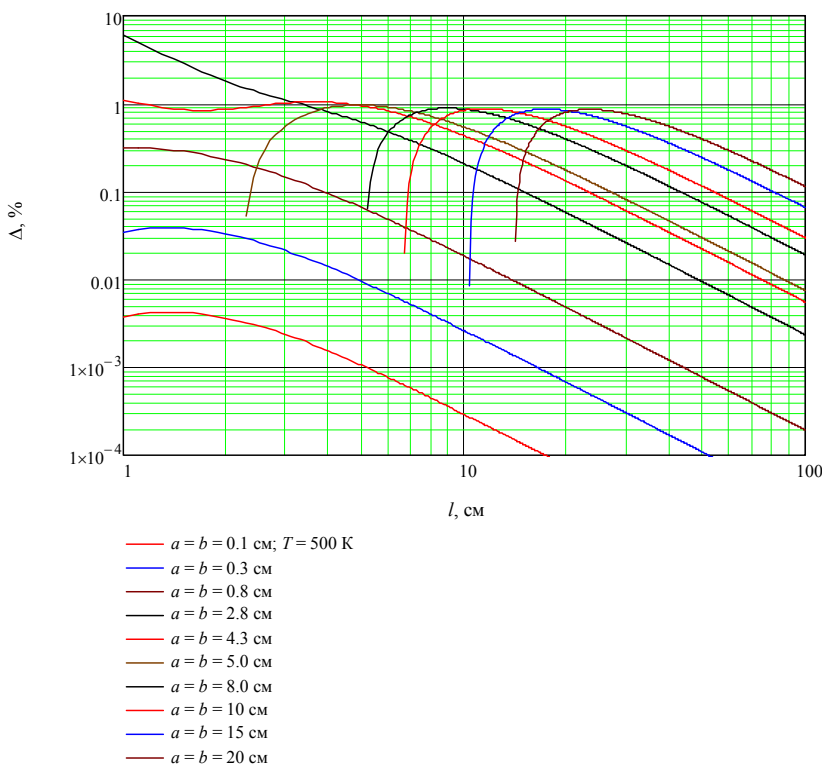


Рис. 6. Зависимость относительной разности неоднородности облученности площадки Δ от круглой и квадратной диафрагм АЧТ равной площади.

Заключение

В работе рассмотрен метод расчета облученности, создаваемой абсолютно черным телом (АЧТ), в произвольной плоскости, параллельной его диафрагме. Метод основан на использовании понятия «коэффициент пропускания холодной диафрагмы МФПУ», описывающего отношение потока излучения, попадающего в заданную точку плоскости сквозь диафрагму, к потоку излучения, падающему в данную точку из полусферы. Установлена полная сходимость результатов расчета величины облученности представленным методом и единственным нормативным методом, описанным в ГОСТ 17772–88. Рассмотрены результаты расчета облученностей и нормированной разности облученностей от АЧТ с круглыми и квадратными диафрагмами в диапазоне от 0,06 мм до 20 см, и распределения облученности по площади. Показано, что облученность от АЧТ с круглой диафрагмой отличается от облученности, создаваемой АЧТ с квадратной диафрагмой такой же площади, не более, чем на один процент. Установлена полная применимость метода для расчета облученности, создаваемой АЧТ.

Предлагаемый метод расчета облученности АЧТ по своим результатам эквивалентен методу,

изложенному в ГОСТ 17772–88, но дополнительно позволяет рассчитать облученность в любой точке плоскости на любом расстоянии плоскости от АЧТ с диафрагмой любой формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов А. В. Опτικο-электронные приборы (Основы теории и расчета). Источники излучения. – М.: «Энергия», 1974.
2. Zisis G. J. Sources of Radiation. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. – SPIE Optical Engineering Press. 1993. Vol. 1.
3. Козелкин В. В., Усольцев И. Ф. Основы инфракрасной техники. – М.: Изд. «Машиностроение», 1967.
4. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. – М.: Изд. «Высшая школа», 1974.
5. Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. Расчет потоков и облученностей на входном зрачке системы. – М.: Логос, 2004.
6. ГОСТ 17772–88. Приложение 4. Госкомитет СССР по стандартам. – М.: Изд. стандартов, 1988.
7. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005.
8. Daniels A. Field Guide to Infrared Systems, IR System Design. – SPIE Press, Bellingham, Washington, USA.
9. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 123.
10. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 98.

PACS: 85.60.Gz, 44.40 +a, 07.57.Kp, 42.88. +h

Generalized method for calculating irradiance from black body

A. I. Patrashin¹, A. V. Nikonov^{1,2}, and V. S. Kovshov^{1,2}

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received December 7, 2017

The method of calculation of the irradiance produced by a black body in an arbitrary plane parallel to its diaphragm is considered. The method is based on the using of the concept of transmittance of the cold diaphragm of IR FPA, describing the ratio of the radiant flux that hits a given point of the plane through the diaphragm, to the radiant flux, that hits this point from hemisphere. Full convergence of calculation results of the irradiance by the presented method and the only normative method, described in GOST 17772–88, has been established. The calculation results of the irradiances and the normalized irradiance differences from black body with round and square diaphragms in the range 0.06 cm to 20 cm, and the area distribution of irradiance are considered. It is shown that the irradiance from black body with round diaphragm differs from the irradiance from black body with square diaphragm of the same area by no more than one percent. Full applicability of the black body irradiance calculation method has been established.

Keywords: irradiance, black body, round diaphragm, square diaphragm, area distribution of the irradiance, nonuniformity of irradiance.

REFERENCES

1. A. V. Pavlov, *Optoelectronic Devices (Fundamental of the Theory and Design). Sources of Light*, (Moscow, Energiya, 1974) [in Russian].
2. G. J. Zissis, *Sources of Radiation. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 1* (SPIE Optical Engineering Press, 1993).
3. V. V. Kozelkin and I. F. Usoltsev, *Fundamental of the Infrared Technique*. (Moscow, Mashinostroenie, 1967) [in Russian].
4. N. A. Soboleva and A. E. Melamid, *Photoelectronic Devices*. (Moscow, Vysshaya Shkola, 1974) [in Russian].
5. V. V. Tarasov and Y. G. Yakushenkov, *Forward Looking Infrared Systems. The Flow and Irradiation Calculation at the System Input Pupil* (Moscow, Logos, 2004) [in Russian].
6. *State Standard 17772–88, Addendum 4. USSR State Committee for Standards*. (Moscow, Izd. Standartov, 1988) [in Russian].
7. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Physical Fundamental*, (Moscow, Fizmatkniga, 2005) [in Russian].
8. A. Daniels, *Field Guide to Infrared Systems, IR System Design*. (SPIE Press, Bellingham, Washington, USA).
9. A. I. Patrashin, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 123 (2010).
10. A. I. Patrashin, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 98 (2011).