

**Влияние пространственной неоднородности абсолютно черного тела на результаты измерения параметров фотоприемных устройств второго поколения с «холодной» диафрагмой**

А. В. Полесский, Н. А. Соломонова

*В статье рассмотрен вопрос влияния неравномерности распределения температуры по излучающей поверхности АЧТ при проведении измерений параметров ФПУ второго поколения с «холодной» диафрагмой. В результате проведенных исследований выявлена необходимость проведения дополнительных проверок АЧТ с большой излучающей поверхностью при их использовании для контроля параметров ФПУ второго поколения с «холодными» диафрагмами.*

*Ключевые слова:* фотоприемное устройство второго поколения, погрешность измерения, поток излучения, абсолютно черное тело, холодная диафрагма.

**Ссылка:** Полесский А. В., Соломонова Н. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 2. С. 148.

**Reference:** A. V. Poleskiy and N. A. Solomonova, Usp. Prikl. Fiz. 8 (2), 148 (2020).

### Введение

Для ФПУ второго поколения средневолнового и длинноволнового инфракрасного (ИК) диапазона с «холодной» диафрагмой используют «протяженные» модели АЧТ [1], которые обеспечивают засветку всех фоточувствительных элементов (ФЧЭ) во всем апертурном угле «холодной» диафрагмы ФПУ.

При расчетах считается, что температура распределена по поверхности АЧТ равномерно

но [2, 3], однако, если принять во внимание [4] на АЧТ Mikron M345, то видно что неравномерность распределения температуры по излучающей поверхности АЧТ допускается и составляет от  $\pm 0,15$  °С до  $\pm 0,3$  °С. Причем типовые излучатели АЧТ (например, Mikron M345X6 с размером рабочей поверхности 152×152 мм) построены на основе термоэлектрических охладителей/нагревателей (ТЭО), сформированных в матрицу  $N \times N$  элементов.

По этой причине можно ожидать неравномерность температуры излучающей поверхности не только от центра к краю, но в виде регулярной структуры с некоторым шагом, соответствующим матрице ТЭО. Очевидно, неравномерность распределения температуры вносит дополнительные погрешности в среднюю величину потока и его дисперсию. Схема хода лучей от АЧТ при засветке ФПУ с «холодной» диафрагмой приведена на рис. 1.

---

Полесский Алексей Викторович, главный метролог, к.т.н.

Соломонова Наталья Алексеевна, инженер 2 кат.

АО «НПО «Орион».

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

E-mail: av22236@bk.ru

Статья поступила в редакцию 22 мая 2020 г.

© Полесский А. В., Соломонова Н. А., 2020

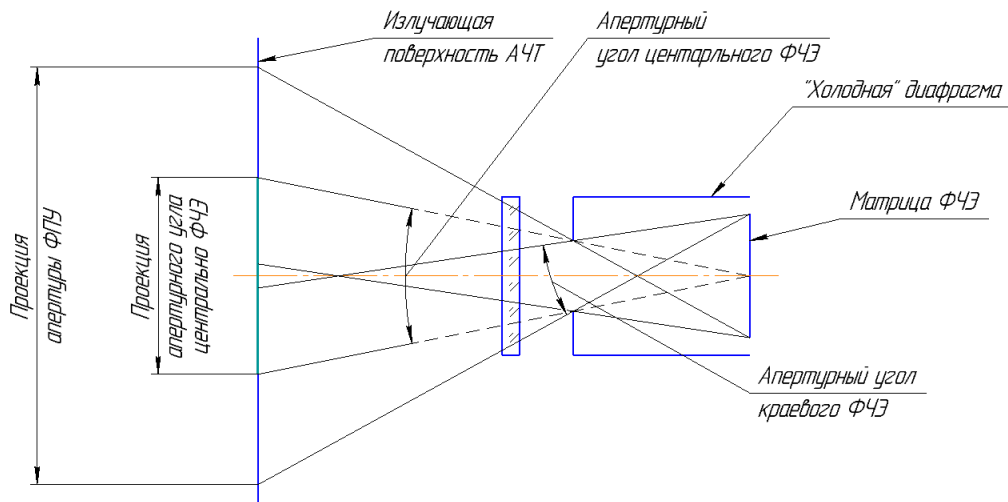


Рис. 1. Схема хода лучей при засветке ФПУ с «холодной» диафрагмой.

### Описание расчетной модели

При измерении фотоприемных устройств с «холодными» диафрагмами используется «разностный» поток излучения, который вычисляется как разница потоков от АЧТ с температурой 27 и 30 °С (300 К и 303 К соответственно). Именно «разностный» поток используется при расчете параметров ФПУ и его погрешность, вызванную неравномерностью распределения температуры по излучающей поверхности АЧТ, необходимо определить.

Величины «разностного» потока, вычисленные по формулам из [5], приведены в табл. 1.

Для расчета влияния неравномерности температуры по поверхности АЧТ на величину падающего потока воспользуемся формулами фотометрии, приведенными в [6]. Для элементарного излучателя, излучающего согласно закону Ламберта, величина потока  $d^2\Phi$ , падающего на элементарную площадку  $dQ_2$ , выражается формулой (1)

$$d^2\Phi = L \cdot dQ_1 \cdot d\Omega_1 \cdot \cos(\varepsilon), \quad (1)$$

где  $d^2\Phi$  – величина потока, падающего на элементарную площадку  $dQ_2$ ;  $dQ_1$  – площадь элементарного излучателя;  $d\Omega_1$  – величина телесного угла, соответствующего элементарной площадке  $dQ_2$ ;  $\varepsilon$  – угол между нормалью и направлением на площадку.

Для случая, когда элементарный излучатель и элементарная площадка ориентированы в одной плоскости, формула распределение потока по поверхности будет иметь вид (2).

$$d\Phi = d\Phi_0 \cdot \cos^4(\varepsilon), \quad (2)$$

где  $d\Phi_0$  – величина потока в центре (когда излучатель и площадка расположены на одной оси);  $d\Phi$  – величина потока в точке, которая расположена под углом  $\varepsilon$ ;  $\varepsilon$  – угол между нормалью и направлением на площадку.

Для проведения расчетов введем сетку на «холодной» диафрагме ФПУ, и свяжем сетку на диафрагме с поверхностью АЧТ с помощью проекционных связей (рис. 2).

Таблица 1

Величины «разностного» потока

Спектральный диапазон, мкм	Величина «разностного» потока (центральный элемент) для холодной диафрагмы $D = 5,1$ мм и $h = 20,5$ мм, Вт	Изменение «разностного» потока (центральный элемент) для $\Delta T = +0,3$ °С, %
3–5	$2,288 \times 10^{-12}$	9,6
8–12	$2,065 \times 10^{-11}$	9,9

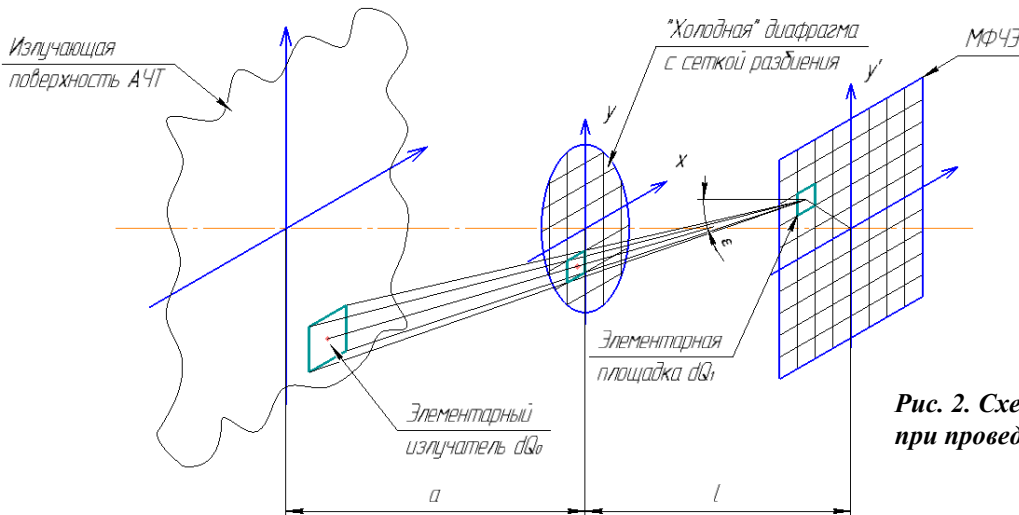


Рис. 2. Схема трассировки лучей при проведении анализа.

Поток, падающий на любой элемент ФПУ, можно выразить следующим образом (3)

$$\Phi = \sum_n d\Phi_0 \cdot \cos^4(\varepsilon) = \sum_n \frac{M}{\pi} \cdot dQ_0 \cdot \frac{dQ_1}{l^2} \cdot \cos^4(\varepsilon), \quad (3)$$

где  $\Phi$  – величина потока;  $\Phi_0$  – величина потока в центре;  $M$  – светимость АЧТ в заданном спектральном диапазоне;  $dQ_0$  – площадь элементарного излучателя;  $dQ_1$  – площадь фоточувствительного элемента;  $l$  – высота «холодной» диафрагмы;  $\varepsilon$  – угол между нормалью и направлением на площадку.

Поскольку излучающую поверхность АЧТ можно представить регулярной структурой с шагом, соответствующим матрице ТЭО, то в расчетную модель неравномерность АЧТ задавалась следующим образом (4):

$$T(x, y) = T_0 + \Delta T \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot y}{a}\right), \quad (4)$$

где  $T(x, y)$  – температура поверхности АЧТ в точке с координатами  $x, y$ ;  $T_0$  – температура АЧТ;  $\Delta T$  – неоднородность распределения температуры по рабочей поверхности АЧТ;  $a$  – расстояние между элементами ТЭО.

Для расчета «разностного» потока излучения использовалось выражение (5)

$$\Phi = \sum_n \frac{M(T_0(x, y) + \Delta T)}{\pi} dQ_0 \cdot \frac{dQ_1}{l^2} \cdot \cos^4(\varepsilon) - \sum_n \frac{M(T_0(x, y))}{\pi} dQ_0 \cdot \frac{dQ_1}{l^2} \cdot \cos^4(\varepsilon), \quad (5)$$

где  $\Phi$  – величина потока;  $M(T_0(x, y))$  – светимость АЧТ в заданном спектральном диапазоне при температуре  $T_0$  с элементарного излучателя с координатами  $x, y$ ;  $M(T_1(x, y))$  – светимость АЧТ в заданном спектральном диапазоне при температуре  $T_0 + \Delta T$  с элементарного излучателя с координатами  $x, y$ ;  $T_0$  – температура АЧТ;  $\Delta T$  – неоднородность распределения температуры по рабочей поверхности АЧТ;  $dQ_0$  – площадь элементарного излучателя на АЧТ;  $dQ_1$  – площадь фоточувствительного элемента;  $l$  – высота «холодной» диафрагмы;  $\varepsilon$  – угол между нормалью и направлением на площадку.

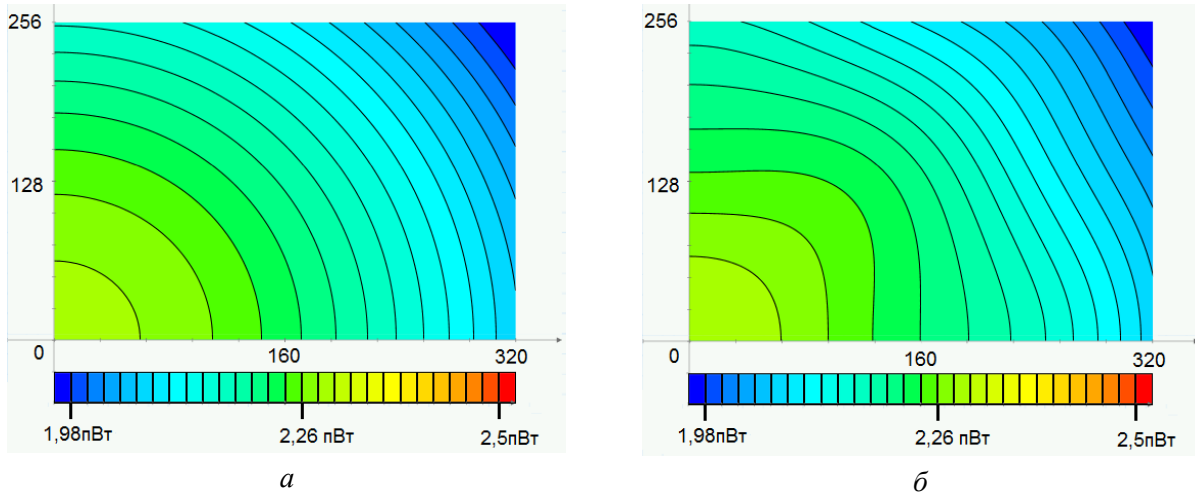
### Результаты расчета «разностного» потока, и оценка погрешности, вызванной неоднородностью АЧТ

При расчетах использовалась сетка на холодной диафрагме размером 91×91 элемент. Такая сетка вносит погрешность в расчеты менее 0,01 %, что является пренебрежительно малой величиной. Также для расчетов были заданы типичные значения величин, наблюдающихся при измерении ФПУ второго поколения:

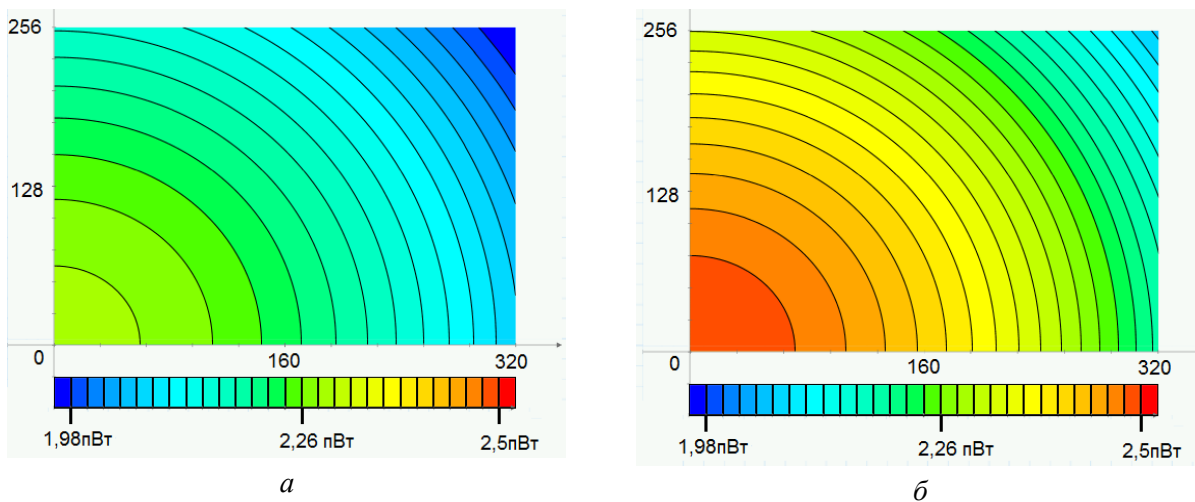
- диаметр отверстия «холодной» диафрагмы  $D = 5,1$  мм и  $D = 10,2$  мм;
- высота «холодной» диафрагмы  $h = 20,5$  мм;
- расстояние от АЧТ до отверстия «холодной» диафрагмы 50 мм;
- шаг температурной неоднородности по поверхности АЧТ по обеим координатам 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 и 45 мм;

- величина температурной неоднородности по поверхности АЧТ  $\Delta T = \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- значение температур при вычислении потока  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $300 \text{ K}$  и  $303 \text{ K}$  соответственно);
- формат матричного ФПУ формата  $640 \times 512$  элементов с шагом  $15 \text{ мкм}$ .

Результаты расчета распределения «разностного» потока излучения на четверти от матрицы формата  $640 \times 512$  с шагом  $15 \text{ мкм}$  для равномерного и не равномерного АЧТ для ФПУ с  $D = 5,1 \text{ мм}$  и  $h = 20,5 \text{ мм}$  приведены на рисунках 3 и 4, а средняя величина «разностного» потока и его дисперсия в табл. 2.



**Рис. 3.** Распределение потока излучения на четверти матрицы формата  $640 \times 512$  при  $D = 5,1 \text{ мм}$  и  $h = 20,5 \text{ мм}$ : а – для АЧТ без температурной неоднородности по поверхности; б – для АЧТ с шагом температурной неоднородности по поверхности  $5 \text{ мм}$ .



**Рис. 4.** Распределение потока излучения на четверти матрицы формата  $640 \times 512$  при  $D = 5,1 \text{ мм}$  и  $h = 20,5 \text{ мм}$ : а – для АЧТ без температурной неоднородности по поверхности, б – для АЧТ с шагом температурной неоднородности по поверхности  $45 \text{ мм}$ .

Таблица 2

**Значения средней величины «разностного» потока и его дисперсия на четверти от матрицы формата  $640 \times 512$  с шагом  $15 \text{ мкм}$  для равномерного и не равномерного АЧТ при  $D = 5,1 \text{ мм}$  и  $h = 20,5 \text{ мм}$**

Шаг, мм	Поток излучения на четверти матрицы формата $640 \times 512$ при равномерном АЧТ, Вт		Поток излучения на четверти матрицы формата $640 \times 512$ при неравномерном АЧТ, Вт		Дополнительная погрешность, %	
	Среднее значение	Дисперсия	Среднее значение	Дисперсия	Среднего значения	Дисперсии
5	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,743 \times 10^{-14}$	-0,01	0,63

Окончание табл. 2

Шаг, мм	Поток излучения на четверти матрицы формата 640×512 при равномерном АЧТ, Вт		Поток излучения на четверти матрицы формата 640×512 при неравномерном АЧТ, Вт		Дополнительная погрешность, %	
	Среднее значение	Дисперсия	Среднее значение	Дисперсия	Среднего значения	Дисперсии
10	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,770 \times 10^{-14}$	0,00	0,99
15	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,181 \times 10^{-12}$	$10,489 \times 10^{-14}$	0,61	36,33
20	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,220 \times 10^{-12}$	$11,898 \times 10^{-14}$	2,41	54,64
25	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,258 \times 10^{-12}$	$11,878 \times 10^{-14}$	4,15	54,39
30	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,287 \times 10^{-12}$	$11,442 \times 10^{-14}$	5,48	48,72
35	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,308 \times 10^{-12}$	$10,966 \times 10^{-14}$	6,46	42,54
40	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,323 \times 10^{-12}$	$10,552 \times 10^{-14}$	7,17	37,15
45	$2,168 \times 10^{-12}$	$7,694 \times 10^{-14}$	$2,335 \times 10^{-12}$	$10,213 \times 10^{-14}$	7,71	32,74

Результаты расчета распределения «разностного» потока излучения на четверти от матрицы формата 640×512 с шагом 15 мкм для равномерного и не равномерного АЧТ

для ФПУ с  $D = 10,2$  мм и  $h = 20,5$  мм приведены на рисунках 5 и 6, а средняя величина «разностного» потока и его дисперсия в таблице 3.

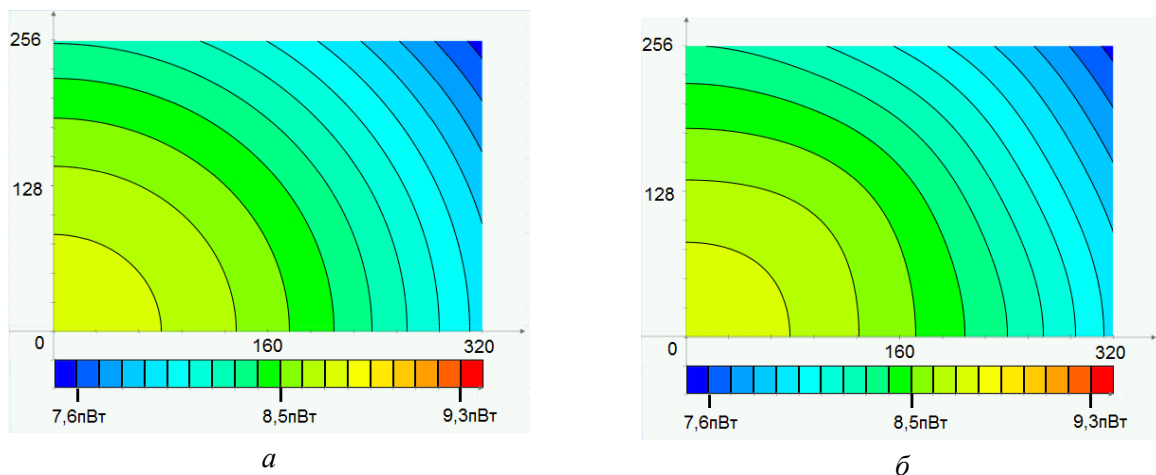


Рис. 5. Распределение потока излучения на четверти матрицы формата 640×512 при  $D = 10,2$  мм и  $h = 20,5$  мм: а – для АЧТ без температурной неоднородности по поверхности; б – для АЧТ с шагом температурной неоднородности по поверхности 5 мм.

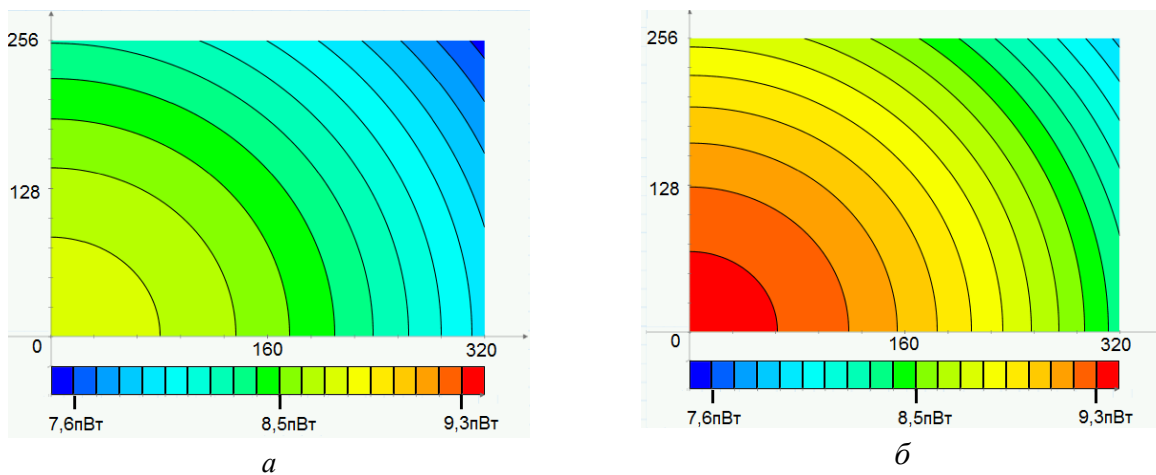


Рис. 6. Распределение потока излучения на четверти матрицы формата 640×512 при  $D = 10,2$  мм и  $h = 20,5$  мм: а – для АЧТ без температурной неоднородности по поверхности; б – для АЧТ с шагом температурной неоднородности по поверхности 45 мм.

Таблица 3

**Значения средней величины «разностного» потока и его дисперсия на четверти  
от матрицы формата 640×512 с шагом 15 мкм для равномерного и не равномерного АЧТ  
при  $D = 10,2$  мм и  $h = 20,5$  мм**

Шаг, мм	Поток излучения на четверти матрицы формата 640×512 при равномерном АЧТ, Вт		Поток излучения на четверти матрицы формата 640×512 при неравномерном АЧТ, Вт		Дополнительная погрешность, %	
	Среднее значение	Дисперсия	Среднее значение	Дисперсия	Среднего значения	Дисперсии
5	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,739 \times 10^{-13}$	0,00	0,70
10	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,328 \times 10^{-12}$	$2,736 \times 10^{-13}$	-0,01	0,53
15	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,315 \times 10^{-12}$	$2,399 \times 10^{-13}$	-0,17	-11,80
20	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,341 \times 10^{-12}$	$2,693 \times 10^{-13}$	0,15	-1,07
25	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,441 \times 10^{-12}$	$3,098 \times 10^{-13}$	1,35	13,81
30	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,558 \times 10^{-12}$	$3,307 \times 10^{-13}$	2,75	21,49
35	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,662 \times 10^{-12}$	$3,379 \times 10^{-13}$	4,00	24,16
40	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,748 \times 10^{-12}$	$3,386 \times 10^{-13}$	5,03	24,38
45	$8,329 \times 10^{-12}$	$2,720 \times 10^{-13}$	$8,816 \times 10^{-12}$	$3,364 \times 10^{-13}$	5,85	23,68

Как видно, неравномерность температуры на поверхности АЧТ в ряде случаев может оказывать существенное влияние на величину «разностного» потока излучения.

Для правильной интерпретации полученных результатов необходимо учитывать, что:

– для матрицы с диаметром отверстия «холодной» диафрагмы  $D = 5,1$  мм величина проекции апертурного угла центрального ФЧЭ составляет  $\sim 17,4$  мм, а величина проекции апертуры ФПУ  $\sim 47,1$  мм;

– для матрицы с диаметром отверстия «холодной» диафрагмы  $D = 10,2$  мм величина проекции апертурного угла центрального ФЧЭ составляет  $\sim 34,8$  мм, а величина проекции апертуры ФПУ  $\sim 67,3$  мм.

Поскольку при падении потока излучения происходит его «усреднение» в апертуре ФПУ, то полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что если шаг неравномерности менее  $1/5$  от проекции апертуры ФПУ на плоскость АЧТ (см. рис. 1), то неравномерность практически не влияет на результаты измерения. Если шаг неравномерности соизмерим с размером проекции апертуры ФПУ на плоскость АЧТ, то она вносит искажения близкие к величине температурного перепада зоны неравномерности.

### Заключение

Результаты исследований показывают необходимость проведения дополнительных проверок АЧТ с большой излучающей поверхностью при их использовании для контроля параметров ФПУ второго поколения с «холодными» диафрагмами.

При выборе АЧТ для измерительного оборудования можно рекомендовать проводить тепловизионное исследование равномерности распределения температуры по поверхности АЧТ. При этом неравномерности небольшого размера (3–4 мм) влияют на результат измерений не существенно. Наиболее нежелательными являются «краевые» эффекты на краю излучающей полости АЧТ, особенно, если размер АЧТ незначительно больше проекции апертуры ФПУ на плоскость АЧТ. Для исключения влияния краевых эффектов следует при проектировании измерительного оборудования выбирать такое расположение АЧТ и размер его излучающей полости, при которых последний хотя бы на 25–30 % больше проекции апертуры ФПУ на излучающую плоскость АЧТ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Полесский А. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 350.

2. Патрашин А. И., Козлов К. В., Ковшов В. С., Никонов А. В., Стрельцов В. А. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 349.

3. Филачев А. М., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Шабаров В. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 3. С. 272.

4. Описание типа средств измерений № 16045-08 от 04.02.2008: «Источники излучения в виде моделей черного тела серии М300».

5. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988.

6. Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1992.

PACS: 06.20.Dk, 02.60.–x, 85.60.Gz,

## The influence of blackbody spatial non-uniformity on the parameters measuring for second-generation photodetectors with a cold-stop

A. V. Polesskiy and N. A. Solomonova

Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: av22236@bk.ru

Received May 22, 2020

*The article were studies the effect of blackbody temperature spatial non-uniformity on measurements second-generation FPA with a cold-stop. Were showed that additional checks of the blackbody with large aperture when they are used for control of the second-generation FPA with cold-stop required.*

*Keywords:* second generation FPA, the measurement error, calculation of radiation flux, cold-stop, blackbody.

### REFERENCES

1. A. V. Polesskiy, Usp. Prikl. Fiz. **5** (4), 350 (2017).
2. A. I. Patrashin, K. V. Kozlov, V. I. Kovshov, A. V. Nikonov, and V. A. Strelshov, Usp. Prikl. Fiz. **6** (4), 349 (2018).
3. A. M. Filashev, A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and V. V. Shabarov, Usp. Prikl. Fiz. **4** (3), 272 (2016).
4. Review of Measurement Instrumentation No. 16045-08 (February 04, 2008) [in Russian].
5. W. Gossorg, *Infrared thermography* (Mir, Moscow, 1988) [in Russian].
6. N. P. Zakaznov, S. I. Kirushin, and V. I. Kuzichev, *Theory of Optical Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].