

Физическая аппаратура и ее элементная база

УДК 53.08

Методики калибровки измерительных установок, использующих абсолютно черное тело

*В. Л. Бакуменко, В. П. Бегучев, Е. В. Дегтярёв, И. А. Кожанов,
Л. Д. Сагинов, А. Н. Свиридов*

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Проведен сравнительный анализ методик определения облученностей в плоскости расположения чувствительных элементов (ЧЭ) приемников излучения в измерительных установках, содержащих абсолютно черное тело (АЧТ).

Для измерения основных параметров приемников ИК-излучения (вольтовой чувствительности, порога чувствительности, обнаружительной способности) на приемник направляют поток ИК-излучения от АЧТ с известной температурой. Погрешность в измерении параметров во многом зависит от погрешности, с которой измеряется облученность от АЧТ в плоскости расположения ЧЭ приемника. Определять облученность расчетным путем не всегда корректно, так как облученность, измеренная в реальных установках, может существенно отличаться от расчетной из-за отражений излучения от элементов конструкции, расположенных вблизи оптической оси АЧТ, например от цилиндрических держателей, в которые устанавливают исследуемые приемники излучения (ПИ).

Применяемая в настоящее время на предприятии методика измерения облученности в плоскости матрицы фоточувствительных элементов фотоприемных устройств основана на измерении модулированного потока излучения от АЧТ. В качестве образцового средства измерения потока излучения (образцового приемника — ОП) используется ИК-приемное устройство на основе пироприемника МГ-30. Абсолютная калибровка этого устройства проводится с помощью образцового АЧТ. Исследования показали, что суммарная погрешность при измерениях по этой методике зависит не столько от погрешностей установки и поддержания температуры АЧТ, а также определения коэффициента излучения АЧТ, сколько от погрешностей поддержания частоты вращения оптического прерывателя излучения АЧТ, точности его изготовления и позиционирования и настройки узкополосного усилителя исследуемой измерительной установки. В некоторых случаях погрешность может достигать допустимую для определения обнаружительной способности величину $\pm 14\%$ (ГОСТ 17772—88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектриче-

ские и фотоприемные устройства). Поэтому проблема повышения точности измерений остается актуальной.

В связи с этим была исследована методика измерения облученностей без модуляции оптического излучения от АЧТ в измерительных установках. Для измерения излучения АЧТ использовался как образцовый приемник излучения "Инфракрасная термopара" (модель M50-1C-06-L Infracouple, изготовитель — Mikron Instrument Company, Inc.). Достоинства этого приемника: неселективность в диапазоне от 6,5 до 14 мкм, высокая чувствительность — 10 мВ/°С, низкая погрешность — 1,5 % от полной шкалы температур. Основная цель исследования двух методик измерения облученностей от АЧТ в применяемых на предприятии измерительных установках (методика 1 — измерение с модуляцией потока излучения от АЧТ и методика 2 — измерение без модуляции потока излучения от АЧТ) — сравнительная оценка эффективности использования этих методик при измерении облученностей и оценка погрешностей измерений. Каждая из методик включает два основных этапа:

измерение вольтовой (токовой) чувствительности ОП, используемого для измерения облученности измеряемого ПИ от АЧТ с температурами: 500, 573, 800 К;

измерение облученности в плоскости расположения исследуемого ПИ с помощью этого ОП.

Методика 1

Схема измерения зависимости напряжения ОП $U_c(E)$ от облученности E , создаваемой АЧТ с температурой T , приведена на рис. 1.

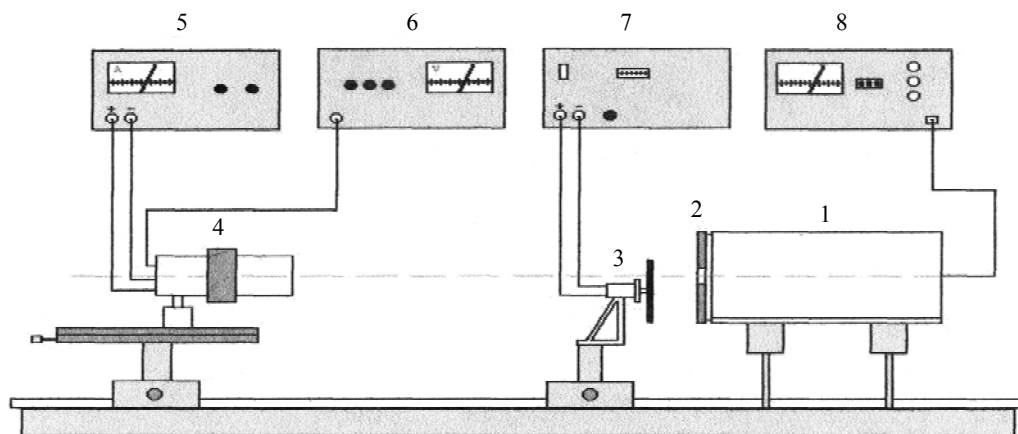


Рис. 1. Схема измерения по методике 1 зависимости напряжения ОП $U_c(E)$ от облученности E , создаваемой АЧТ с температурой T :

1 — модель АЧТ; 2 — диафрагма; 3 — механический модулятор;
 4 — ОП; 5 — блок питания ПИ; 6 — регистрирующий прибор (вольтметр);
 7 — блок питания и управления модулятором; 8 — блок управления АЧТ

Проведение измерений

Измерения проводят следующим образом:

- устанавливают (путем включения переключателей блока регулировки температур — БРТ) заданную температуру АЧТ. (Положения переключателей БРТ, при которых достигается заданная температура АЧТ — T , предварительно определяют для конкретной измерительной установки согласно "Методике измерения температуры АЧТ и ее стабильности"). После выхода измерительной установки на рабочий режим (для АЧТ, входящего в состав измерительной установки, требуется время прогрева не менее 1,5 ч);

- устанавливают заданный диаметр диафрагмы АЧТ — D_d ;
- включают питание приемника МГ-30;
- устанавливают на расстоянии L_1 (равном расстоянию между диафрагмой АЧТ и плоскостью, в которой будут расположены ФЧЭ измеряемого МФПУ, при установке последнего в посадочное место на измерительной установке) приемник МГ-30, закрепленный в юстировочном приспособлении (позволяющем регулировать по углам положение оптической оси прибора). Рекомендуемая величина $L_1 = 100$ мм;

- измеряют $U(f)$ — зависимость действующего значения напряжения сигнала приемника МГ-30 от частоты модуляции оптического сигнала f ;

- устанавливают частоту модулятора ($f = 800$ Гц);
- устанавливают на расстоянии $L_1 = 100$ мм приемник МГ-30;

- устанавливают на расстоянии $L_2 = L_1 + 20$ мм приемник МГ-30, закрепленный в юстировочном приспособлении (позволяющем регулировать по углам положение оптической оси прибора), и регистрируют с помощью вольтметра напряжение сигнала U_2 .

Далее этот процесс повторяют до $L_m = 400$ мм.

Обработка результатов измерений

- Строят зависимости $U_c(L)$ при температурах АЧТ: 800, 573, 500 К. (U_c — амплитудные значения напряжения, пересчитанные по измеренным действующим значениям напряжения $U(f)$ от частоты модуляции, соответствующей максимуму частотной характеристики приемника с учетом коэффициента формы модуляции).

- По экспериментальным зависимостям $U_c(L)$ и расчетным зависимостям $E(L)$ строят зависимости $U_c(E)$. На рис. 2 для примера приведена зависимость облученности от АЧТ с $T = 800$ К в плоскости чувствительного элемента ОП устройства на основе пироприемника МГ-30 и напряжения, получаемого на приемнике.

- Аппроксимируют полученные зависимости $U_c(E)$ так, чтобы максимальная погрешность не превышала 0,1 %.

- Оценивают погрешности измерений.

Методика 2

Схема измерения зависимости напряжения ОП $U_c(E)$ от облученности E , создаваемой АЧТ с температурой T , приведена на рис. 3.

Проведение измерений

Измерения проводят следующим образом:

- устанавливают (путем включения переключателей БРТ) заданную температуру АЧТ. (Положения переключателей БРТ, при которых достигается заданная температура АЧТ — T , предварительно определяют для конкретной измерительной установки согласно "Методике измерения температуры АЧТ и ее стабильности"). После выхода измерительной установки на рабочий режим (для АЧТ, входящего в состав измерительной установки требуется время прогрева не менее 1,5 ч);

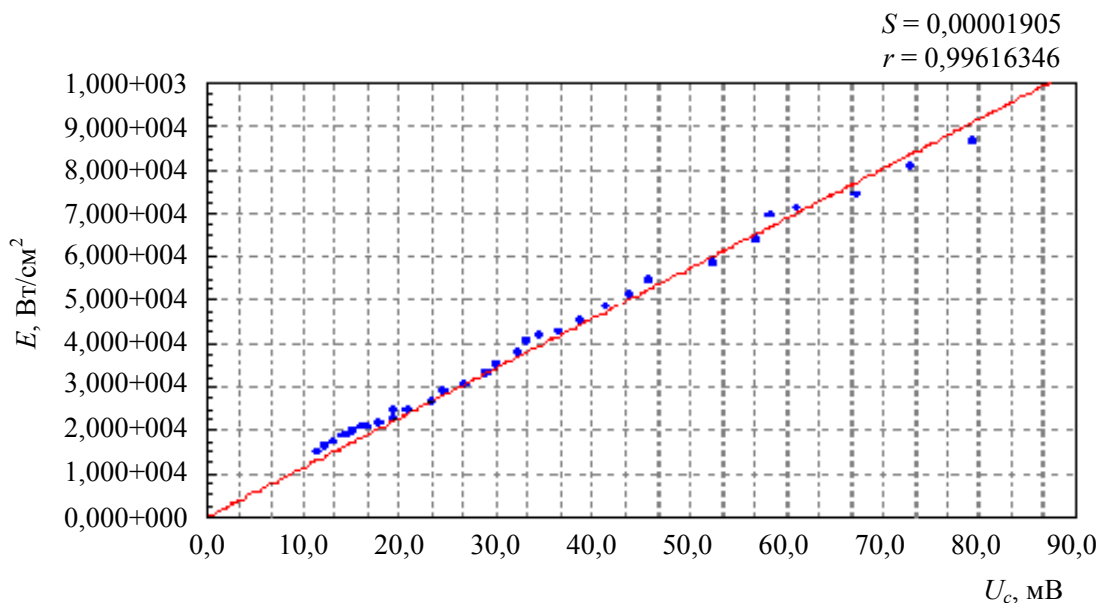


Рис. 2. Пример зависимости облученности от АЧТ с $T = 800$ К в плоскости чувствительного элемента образцового приемного устройства на основе приемника МГ-30 и напряжения сигнала, получаемого на приемнике

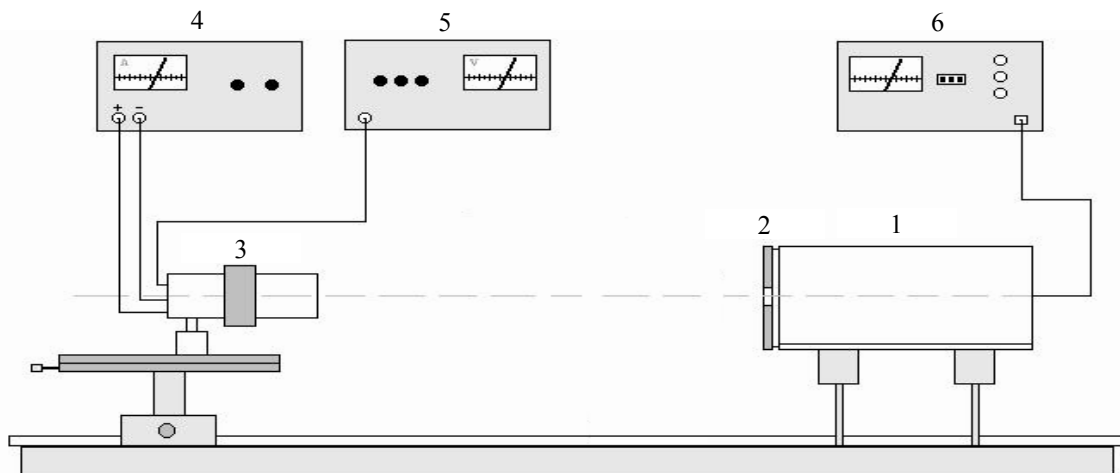


Рис. 3. Схема измерения по методике 2 зависимости напряжения ОП $U_c(E)$ от облученности E , создаваемой АЧТ с температурой T :

1 — модель АЧТ; 2 — диафрагма; 3 — ОП; 4 — блок питания ОП;
5 — регистрирующий прибор (вольтметр); 6 — блок управления АЧТ

- устанавливают заданный диаметр диафрагмы АЧТ — D_d ;
- включают питание приемника М50-1С-06-Л;
- устанавливают на расстоянии L_1 приемник М50-1С-06-Л, закрепленный в юстировочном приспособлении (позволяющем регулировать по углам положение оптической оси прибора). Величина L_1 не должна быть меньше величины L_{\min} , при которой $U_{1c-f} = 3$ В. Рекомендуемая величина $L_1 = 100$ мм;
- регистрируют с помощью вольтметра напряжение сигнала и фона U_{1c-f} ;
- выдвигают заглушку, перекрывающую излучающее отверстие АЧТ, и регистрируют с помощью вольтметра напряжение фона U_{1f} ;
- устанавливают на расстоянии $L_2 = L_1 + 20$ мм приемник М50-1С-06-Л и регистрируют с помощью вольтметра напряжение сигнала и фона U_{2c-f} ;

- выдвигают заглушку, перекрывающую излучающее отверстие АЧТ, и регистрируют с помощью вольтметра напряжение фона U_{2f} ;
 - устанавливают на расстоянии $L_3 = L_2 + 20$ мм приемник М50-1С-06-Л и регистрируют с помощью вольтметра напряжение сигнала и фона U_{3c-f} ;
 - выдвигают заглушку и регистрируют с помощью вольтметра напряжение фона U_{3f} . Далее этот процесс повторяют до $L_m = 600$ мм.
- Для вычисления доверительной границы случайной погрешности результата измерений U_c проводили четыре измерения U_{c-f} и U_f .

Обработка результатов измерений

- Определяют напряжение сигнала U_{is} :
 $U_{ic} = U_{1c-f} - U_{1f}$, где U_{ic} — напряжение на выходе приемника, измеренное на расстоянии между приемником и АЧТ, равном L_n .

- Строят зависимости $U_c(L)$, измеренные при температуре АЧТ 800, 573, 500 К.

- По экспериментальным зависимостям $U_c(L)$ и расчетным зависимостям $E(L)$ строят зависимости $E(U_c)$. На рис. 4 для примера приведена зависимость облученности от АЧТ с $T = 800$ К в плоскости чувствительного элемента образцового приемного устройства на основе приемника М-50 и напряжения, получаемого на приемнике.

Доверительные границы ε (без учета знака) случайной погрешности результата измерения находят по формуле

$$\varepsilon = tS(\tilde{A}),$$

где t — коэффициент Стьюдента, который зависит от доверительной вероятности P и числа наблюдений n . В данном случае $P = 0,95$, $t = 3,182$.

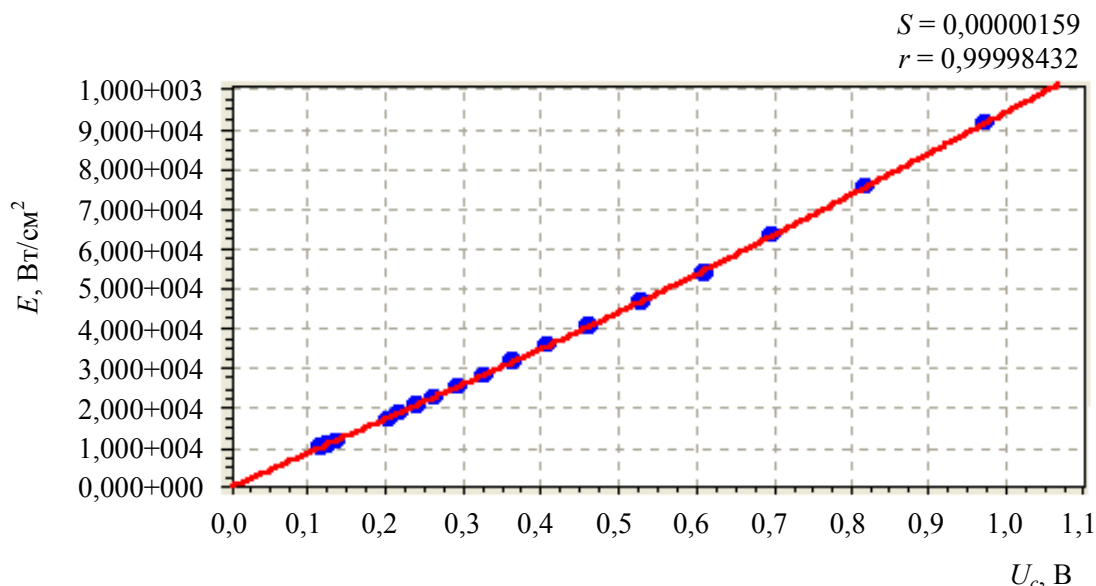


Рис. 4. Пример зависимости облученности от АЧТ с $T = 800$ К в плоскости чувствительного элемента образцового приемного устройства на основе приемника М-50 и напряжения сигнала, получаемого на приемнике

- Аппроксимируют полученные зависимости $E(U_c)$ так, чтобы максимальная погрешность не превышала 0,1 %. (Для вычисления доверительной границы случайной погрешности результата измерений U_c проводят 4 измерения U_{c-f} и U_f).

Оценка погрешностей. Доверительные границы случайной погрешности результата измерения

Среднеквадратическое отклонение результата измерения находится по формуле

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n \cdot (n - 1)}}.$$

где x_i — i -й результат наблюдения;

\tilde{A} — результат измерения (среднеарифметическое исправленных результатов наблюдений);

n — число результатов наблюдений;

$S(\tilde{A})$ — оценка среднеквадратического отклонения результата измерения.

$$S_r(\tilde{A}) = \frac{S(\tilde{A})}{U_{mid}}$$

где $S_r(\tilde{A})$ — относительная оценка среднеквадратического отклонения результата измерения.

Ниже приведены величины $S_r(\tilde{A})$ и ε зависимостей $U_c(L)$, измеренных двумя методиками при температурах АЧТ 800, 573, 500 К.

Методика 1

$T_{ABB} = 800$ К

Среднее по измерениям при всех L значение относительного среднеквадратического отклонения $S_r^{mid}(\tilde{A}) = 0,015$.

Максимальное значение относительного среднеквадратического отклонения $S_r^{max}(\tilde{A}) = 0,0294$.

Доверительные границы ε случайной погрешности результата измерения $\varepsilon \approx 0,09 (\pm 9 \%)$.

$T_{ABB} = 573$ К:

$$S_r^{mid}(\tilde{A}) = 0,011,$$

$$S_r^{max}(\tilde{A}) = 0,031,$$

$$\varepsilon \approx 0,09 (\pm 9 \%).$$

$T_{ABB} = 500$ К:

$$S_r^{mid}(\tilde{A}) = 0,013,$$

$$S_r^{max}(\tilde{A}) = 0,031,$$

$$\varepsilon \approx 0,09 (\pm 9 \%).$$

На рис. 5, а для примера показаны величины $S_r(\tilde{A})$ при различных L , полученные при температуре АЧТ 573 К по методике 1.

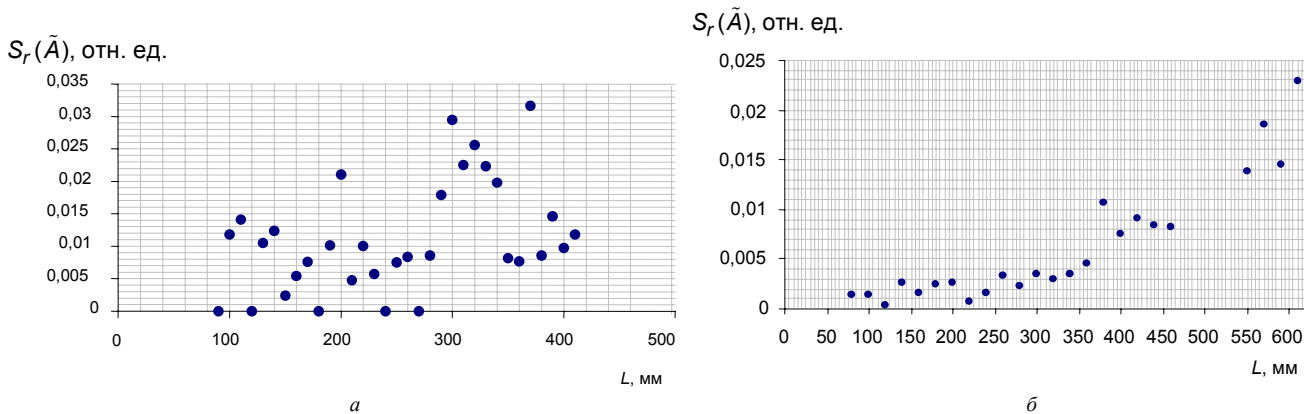


Рис. 5. Величины $S_r(\tilde{A})$ при различных L , полученные при температуре АЧТ 573 К: а — по методике 1; б — по методике 2

Методика 2

$T_{ABB} = 800 \text{ К:}$

$$S_r^{\text{mid}}(\tilde{A}) = 0,004492,$$

$$S_r^{\text{max}}(\tilde{A}) = 0,009241,$$

$$\varepsilon \approx 0,03 (\pm 9 \%).$$

$T_{ABB} = 573 \text{ К:}$

$$S_r^{\text{mid}}(\tilde{A}) = 0,008657,$$

$$S_r^{\text{max}}(\tilde{A}) = 0,018835,$$

$$\varepsilon \approx 0,06 (\pm 9 \%).$$

$T_{ABB} = 500 \text{ К:}$

$$S_r^{\text{mid}}(\tilde{A}) = 0,006192,$$

$$S_r^{\text{max}}(\tilde{A}) = 0,022945,$$

$$\varepsilon \approx 0,07 (\pm 7 \%).$$

На рис. 5, б для примера показаны величины $S(\tilde{A})$ при различных L , полученные при температуре АЧТ 573 К по методике 2.

Оценка погрешностей. Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерения

При равномерном распределении неисключенных систематических погрешностей доверительные границы (без учета знака) можно вычислить по формуле

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2},$$

где Θ_i — граница i -й систематической погрешности;
 k — коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью. Коэффициент k принимают равным 1,1 при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Методика 1

В данном случае неисключенная систематическая погрешность состоит из:
 $\theta_1 = 0,005 \%$ — относительная погрешность измерения вольтметра;

$\theta_2 = 1,5 \%$ — относительная погрешность измерения излучения с помощью приемника МГ-30;
 $\theta_3 = 0,87\%$ — относительная погрешность измерения сигнала за счет нестабильности вращения модулятора;
 $\theta_4 = 0,2\%$ — относительная погрешность установки заданного потока излучения от АЧТ;
 $\theta_5 = 0,5\%$ — относительная погрешность измерения расстояния между диафрагмой АЧТ и приемником с помощью металлической линейки.

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результатов измерений при температурах АЧТ 500, 573, 800 К оцениваются величиной $\Theta \approx 2 \%$.

При температурах АЧТ $T = 500, 573, 800 \text{ К}$ отношение $\frac{\Theta}{S(\tilde{A})} < 0,8$, и неисключенными систематическими погрешностями по сравнению со случайными пренебрегают и принимают, что граница погрешности результата составляет: $\Delta_{500\text{К}} = \varepsilon = \pm 9 \%$, $\Delta_{573\text{К}} = \varepsilon = \pm 9 \%$, $\Delta_{800\text{К}} = \varepsilon = \pm 9 \%$.

При симметрической доверительной погрешности результаты измерений представляют в форме

$$\tilde{A} \pm \Delta, P,$$

где \tilde{A} — результат измерения.

Числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности Δ . Для методики 1 получаем: при температурах АЧТ 500, 573, 800 К — $\tilde{A} \pm 9 \%$, $P = 0,95$.

Методика 2

В данном случае неисключенная систематическая погрешность состоит из:

$\theta_1 = 0,01 \%$ — относительная погрешность измерения вольтметра В7-28;
 $\theta_2 = 1,5 \%$ — относительная погрешность измерения излучения с помощью приемника М50-1С-06-Л;
 $\theta_3 = 0,5 \%$ — относительная погрешность измерения расстояния между диафрагмой АЧТ и приемником с помощью металлической линейки;

$\theta_4 = 0,2\%$ — относительная погрешность установки заданного потока излучения от АЧТ.

Доверительные границы Θ неисключенной систематической погрешности результатов измерений при температурах АЧТ 500, 573, 800 К, оцениваются, соответственно, величинами: 1,8; 1,7; 1,7 %.

При рассматриваемых температурах АЧТ отношение $0,8 < \frac{\Theta}{S(\tilde{A})} < 8$, поэтому границу погрешности результата измерения находят путем построения композиции распределений случайных и неисключенных систематических погрешностей, рассматриваемых как случайные величины. Границы погрешности результата измерения Δ (без учета знака) вычисляются по формуле

$$\Delta = K S_{\Sigma},$$

где K — коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей;

S_{Σ} — оценка суммарного среднеквадратического отклонения результата измерения.

Оценка суммарного среднеквадратического отклонения результата измерения проводится по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3} + S^2(\tilde{A})};$$

при температуре АЧТ $T = 500$ К — $S_L \approx 2,1\%$;

при температуре АЧТ $T = 800$ К — $S_L \approx 1,3\%$.

Коэффициент K вычисляют по эмпирической формуле

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta}{S(\tilde{A}) + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3}}}.$$

При рассматриваемых температурах АЧТ $K = = 2,759$.

Границы погрешности результата измерения при температурах АЧТ $T = 500$ и 573 К — $\Delta_{500, 573 \text{ К}} = \pm 5,8\%$ и при температуре АЧТ $T = 800$ К — $\Delta_{800 \text{ К}} = \pm 3,3\%$.

Таким образом, были получены максимальные погрешности результата измерения по максимальному среднеквадратическому отклонению зависимости $U(L)$ для каждой температуры.

Числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности Δ . Для методики 2 получаем:

при температуре АЧТ $T = 500, 573$ К — $\tilde{A} \pm 5,8\%$, $P = 0,95$;

при температуре АЧТ $T = 800$ К — $\tilde{A} \pm 3,3\%$, $P = 0,95$.

Заключение

Наиболее рациональной и простой является методика измерения облученности от АЧТ с применением немодулированного потока излучения в плоскости расположения фоточувствительных элементов ФПУ в измерительных установках, так как не возникает проблем с выбором механического модулятора на электроприводе, вносящего вклад в случайную и неисключенную систематическую погрешность, а следовательно, и в границы погрешности результата измерения.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Methods of calibration of measuring installations having absolutely black body

V. L. Bakumenko, V. P. Beguchev, E. V. Degtjaryov, I. A. Kozhanov,
L. D. Saginov, A. N. Sviridov

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

A comparative analysis of methods of determination of irradiance values in the plane of location of sensitive elements (SE) of detectors in measuring installations containing an absolutely black body (ABB) was carried out.