



## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПИРОМЕТРИИ

Фрунзе А.В., к.т.н., ННТП ТЕРМОКОНТ

Метрология пирометрических измерений температуры реальных объектов, например в металлургии, по-прежнему не свободна от ряда ошибок. Они, в конечном счете, становятся причиной крупных техногенных аварий. В статье дан анализ метрологических проблем метода энергетической пирометрии.

### Множественность значений коэффициента излучения для энергетических пирометров вследствие зависимости спектральной излучательной способности от температуры объекта

Из работ [4, 5] известно, что спектральная излучательная способность объекта часто является функцией температуры. На рис.4 приведены графики зависимостей  $\epsilon(\lambda)$  для динамной стали при нагреве в азотно-водородной атмосфере для температур 427, 527, 627, 727, 827 и 927°C [2]. Очевидно, что найденный для пирометра, к примеру, со спектральной характеристикой  $s_a(\lambda)$  коэффициент излучения для 927°C отличается от коэффициента излучения для 427°C почти в два раза.

Практически то же самое можно сказать и об изменении коэффициента излучения для пирометров спектрального диапазона 1-1,5 мкм (со спектральной характеристикой  $s_g(\lambda)$ ) и для пирометров, работающих в длинноволновой части спектра (8-14 мкм).

Описанная температурная зависимость излучательной способности также приводит к появлению дополнительной систематической методической погрешности измерений за счет ошибочного ввода коэффициента излучения. Для оценки этой погрешности предположим, что мы нашли точное значение коэффициента излучения для яркостного пирометра при температуре объекта (см. рис.4), равной 627°C, и ввели его в пирометр. Какова будет погрешность измерения объекта при температурах 427 и 927°C?

Вначале рассчитаем погрешность измерения для коротковолнового яркостного пирометра ( $\lambda=0,6$  мкм). Подставив в (1) значения  $T_d = 1200$ К,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,5$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = +0,15$ ,  $\lambda = 10^{-6}$  м, получим, что

$\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx 0,021$ . Подставляя  $T_d = 700$ К,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,5$ ,

## METROLOGICAL CHALLENGES OF ENERGY PYROMETRY

A.Frunze, Candidate of Engineering,  
TERMOKONT Non-Commercial Scientific-Technical  
Partnership

Metrology of pyrometric measurements of the temperature of tangible objects, for example, in metallurgy is still not error-free. Ultimately, these errors become the reasons for great industrial disasters. Analysis of metrological challenges of the energy pyrometry method is given in the article.

### Multiplicity of the values of radiation coefficient for energy pyrometers due to the dependence of spectral radiation capacity on object temperature

As it is known from the papers [4, 5], often the spectral radiation capacity of object is the function of temperature. The dependence diagrams  $\epsilon(\lambda)$  are given in Fig. 4 for dynamo steel upon the heating in nitrogen-hydrogen atmosphere for the temperatures of 427, 527, 627, 727, 827 and 927 °C [2]. It is obvious that the radiation coefficient estimated for the pyrometer, for example, with the spectral characteristic  $s_a(\lambda)$  for 927 °C differs from the radiation coefficient for 427 °C almost by two times.

Practically the same can be said in relation to the variation of radiation coefficient for the pyrometers with the spectral range of 1-1.5  $\mu\text{m}$  (with the spectral characteristic  $s_g(\lambda)$ ) and for the pyrometers operating in the long-wavelength part of spectrum (8-14  $\mu\text{m}$ ).

Also, described temperature dependence of the radiation capacity results in the occurrence of additional systematic method error of measurements at the expense of inaccurate entry of radiation coefficient. In order to evaluate this error let us assume that we found the accurate value of radiation coefficient for brightness pyrometer at the temperature of object for Fig. 4 equal to 627 °C and entered it to the pyrometer. So what value will the object measurement error have at the temperatures of 427 °C and 927 °C?

At first, let us calculate the measurement error for the short-wavelength brightness pyrometer ( $\lambda=0,6$   $\mu\text{m}$ ). Let us substitute the values  $T_d=1200$  K,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,5$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = +0,15$ ,  $\lambda = 10^{-6}$  m in the formula

(1) we will obtain that  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx 0,021$ . Substituting  $T_d =$



$\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = -0,15$ ,  $\lambda = 10^{-6}$  м, получим, что  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx -0,017$ .

То есть в обоих случаях дополнительная систематическая методическая погрешность имеет величину примерно 2%.

Далее рассчитаем погрешность измерения для яркостного пирометра, работающего на длине волны  $\lambda = 1,5$  мкм. Подставив в (1) значения  $T_d = 1200$ К,

$\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,48$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = +0,19$ ,  $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м, получим,

что  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx 0,040$ . Подставляя  $T_d = 700$ К,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,48$ ,

$\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = -0,14$ ,  $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м, получим, что

$\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx -0,026$ . То есть дополнительная систематическая методическая погрешность в данном случае имеет величину примерно от 2,5 до 4%.

И далее рассчитаем погрешность измерения для яркостного пирометра, работающего на длине волны  $\lambda = 12$  мкм. Подставив в (1) значения  $T_d = 1200$ К,

$\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,20$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = +0,08$ ,  $\lambda = 12 \cdot 10^{-6}$  м, получим,

что  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx 0,252$ . Подставляя  $T_d = 700$ К,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,20$ ,

$\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = -0,5$ ,  $\lambda = 12 \cdot 10^{-6}$  м, получим, что  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx -0,202$ .

То есть дополнительная систематическая

погрешность  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,5$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = -0,15$ ,  $\lambda = 10^{-6}$  м we will

obtain that  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx -0,017$ . In other words, the

additional systematic method error has the value of 2% approximately in both cases.

Further, let us calculate the measurement error for the brightness pyrometer operating on the wavelength of  $\lambda = 1.5$   $\mu\text{m}$ . Substituting the values  $T_d = 1200$ К,

$\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,48$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = +0,19$ ,  $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-6}$  m in the

formula (1) we will obtain that  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx 0,040$ .

Substituting  $T_d = 700$ К,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,48$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = -0,14$ ,

$\lambda = 1,5 \cdot 10^{-6}$  m we will obtain that  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx -0,026$ .

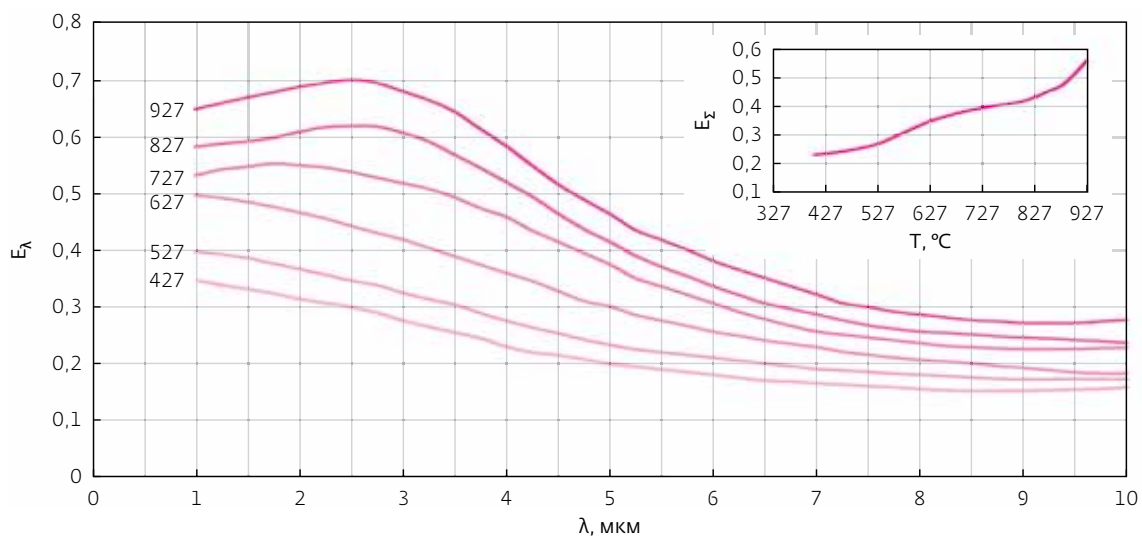
In other words, the additional systematic method error has the value of 2.5 to 4% approximately in this case.

And further, let us calculate the measurement error for the brightness pyrometer operating on the wavelength of  $\lambda = 12$   $\mu\text{m}$ . Substituting the values

$T_d = 1200$ К,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,20$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = +0,08$ ,  $\lambda = 12 \cdot 10^{-6}$  m

in the formula (1) we will obtain that  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx 0,252$ .

Substituting  $T_d = 700$ К,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T) = 0,20$ ,  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T) = -0,5$ ,  $\lambda$



**Рис.4.** Семейство зависимостей  $\epsilon_\lambda(\lambda)$  для динамной стали при нагреве в азотно-водородной атмосфере для температур 427, 527, 627, 727, 827 и 927 °C

**Fig. 4.** Series of the dependencies  $\epsilon_\lambda(\lambda)$  for dynamo steel under the heating in nitrogen-hydrogen atmosphere for the temperatures of 427, 527, 627, 727, 827 and 927 °C



методическая погрешность в данном случае имеет величину примерно от 20 до 25%.

Необходимо отметить, что для пирометров частичного излучения с широкополосными приемниками соотношение (1) неприменимо. Один из вариантов возможного расчета получаемой дополнительной методической погрешности описан в [7] и состоит в следующем. Вначале рассчитывают градуировочную характеристику пирометра:

$$U(T) = \alpha \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda,$$

где  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  – соответственно нижняя и верхняя границы спектральной чувствительности соответствующего приемника,  $P(\lambda, T)$  – планковская функция,  $s(\lambda)$  – спектральная характеристика чувствительности приемника,  $\alpha$  – размерный коэффициент пропорциональности. После этого находят функцию, обратную градуировочной  $T = f^{-1}(U)$ . Погрешность ввода коэффициента излучения приводит к изменению сигнала на выходе приемника с  $U$  на  $U'$ . Эти величины с помощью функции, обратной градуировочной, пересчитываются в значения температуры  $T_d$  и  $T'_d$ . Проведенный для пирометра с характеристикой  $s_c(\lambda)$  расчет показал, что если пользователь методом "подкручивания" или любым другим методом подберет значение коэффициента излучения на температуре 727°C такое, что пирометр на этой температуре будет измерять наш объект с минимальной погрешностью, то при измерении 427-градусного объекта с этим подобранным значением коэффициента излучения результат окажется заниженным на 19,7%, а при измерении 927-градусного объекта – завышенным на 18%!

Таким образом, за счет температурной зависимости излучательной способности измеряемого объекта даже при правильно введенном в пирометр коэффициенте излучения для определенной температуры дополнительная методическая погрешность при измерении других температур может достигать 20%-ной величины. Но то, как ведет себя спектральная излучательная способность динамной стали (объект с рис.4) с изменением температуры, мы, благодаря [2], знаем и можем это как-то учесть. А если речь идет о материале, о котором подобная информация отсутствует, мы ничего не можем сказать о величине этой дополнительной погрешности. И реальная погрешность измерения может оказаться не то что в разы, а на порядок-полтора превосходящей инструментальную погрешность пирометра (сегодня эти погрешности – от 0,2–0,3% до 1–2%).

=  $12 \cdot 10^{-6}$  m we will obtain that  $\frac{T_d - T'_d}{T_d} \approx -0,202$ . In other

words, the additional systematic method error has the value of 20 to 25% approximately in this case.

It should be noted that for the partial radiation pyrometers with broadband detectors the correlation (1) is not applicable. One of the variants of possible calculation of obtained additional method error is described in the paper [7] as follows. At first, the pyrometer calibration characteristic is calculated:

$$U(T) = \alpha \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda,$$

where  $\lambda_{\min}$  and  $\lambda_{\max}$  are the lower and upper limits of the spectral sensitivity of the relevant detector respectively,  $P(\lambda, T)$  refers to the Planckian function,  $s(\lambda)$  is the spectral characteristic of detector sensitivity,  $\alpha$  is the dimension proportionality factor. Afterwards, the function which is inverse to the calibration function is estimated  $T = f^{-1}(U)$ . The error of radiation coefficient entry causes the change of the signal on the detector output from  $U$  to  $U'$  which with the help of the function inverse to the calibration function are recalculated to the temperature values of  $T_d$  and  $T'_d$ . Calculations performed for the pyrometer with the characteristic  $s_c(\lambda)$  showed that if user chooses the value of radiation coefficient for the temperature 727 °C using the "adjustment method" or any other method and the pyrometer measures our object at such temperature with the minimum error, than upon the measurement of 427-degrees object with this chosen value of the radiation coefficient result will be understated by 19.7% and upon the measurement of 927-degrees object – overstated by 18%!

Thus, at the expense of the temperature dependence of radiation capacity of measured object even upon the correct radiation coefficient entered to the pyrometer for certain temperature, additional method error can reach 20% when taking other temperatures. But the way how the spectral radiation capacity of dynamo steel (object from Fig. 4) behaves with the change of temperature and we know and can take it into account somehow thank to the paper [2]. And if it refers to the material on which there is no similar information, we cannot say anything about the value of this additional error. And actual measurement error can be not by times but by order-order and half higher than the instrument error of pyrometer (today these errors are 0.2-0.3% to 1-2%).

Returning to the inadmissibility of the above-mentioned method of "adjustment" of radiation



Возвращаясь к недопустимости упомянутого выше метода "подкручивания" коэффициента излучения под правильный результат, отметим, что температурная зависимость излучательной способности – главная причина метрологической несостоятельности такого метода определения коэффициента излучения. Если мы используем "подкрученный" при определенной температуре под правильный результат коэффициент излучения, то полученный с этим коэффициентом результат измерения при иной температуре объекта может иметь дополнительную методическую погрешность неопределенной величины, от единиц до десятков процентов.

То есть при измерении температуры объекта энергетическим пирометром практически всегда существует вероятность появления неучтенной дополнительной погрешности неопределенной величины, обусловленной ошибками в выборе коэффициента излучения.

### **Проблема неопределенности погрешности при определении значений коэффициента излучения для энергетических пирометров**

Предположим, однако, что с первой проблемой пользователь справился и ввел в пирометр значение коэффициента излучения, соответствующее измеряемому материалу и используемому пирометру. Значение коэффициента излучения по-прежнему взято из справочных источников или из руководства по эксплуатации пирометра. Но анализ этих данных показывает, что погрешности приводимых там значений коэффициентов излучения в подавляющем большинстве случаев не определены, их там просто нет. А если так, то и сами измерения пирометрами, опирающиеся на эти значения  $\epsilon$ , в полном соответствии с правилами метрологии тоже должны быть признаны имеющими неопределенную погрешность.

И вот в этом суть второй серьезнейшей метрологической проблемы, связанной с использованием значений коэффициентов излучения, взятых из литературных и справочных материалов. Она также, сознательно или бессознательно, игнорируется метрологами и специалистами по пирометрии.

То есть, даже если коэффициент излучения выбран правильно, с учетом и спектральной излучательной способности материала, и спектральных характеристик пирометра, в подавляющем большинстве случаев значение погрешности определения этого коэффициента отсутствует. В итоге обе упомянутые причины делают погрешность измерения температуры энергетическим пирометром

коэффициентом на правильный результат следует отметить, что температурная зависимость излучательной способности является основной причиной метрологической несостоятельности такого метода оценки коэффициента излучения. Если использовать метод "подкрутки" на правильный результат коэффициента излучения при определенной температуре, то результат измерения, полученный с этим коэффициентом при другой температуре объекта, может иметь дополнительную методическую погрешность неопределенной величины, от единиц до десятков процентов.

Иными словами, при измерении температуры объекта энергетическим пирометром практически всегда существует вероятность появления неучтенной дополнительной погрешности неопределенной величины, обусловленной ошибками в выборе коэффициента излучения.

### **Проблема, связанная с неопределенностью ошибки расчета коэффициента излучения для энергетических пирометров**

Однако, предположим, что пользователь решил первую проблему и ввел в пирометр значение коэффициента излучения, соответствующее измеряемому материалу и используемому пирометру. Значение коэффициента излучения по-прежнему взято из справочных источников или из руководства по эксплуатации пирометра. Но анализ этих данных показывает, что погрешности приводимых там значений коэффициентов излучения в подавляющем большинстве случаев не определены, их там просто нет. А если так, то и сами измерения пирометрами, опирающиеся на эти значения  $\epsilon$ , в полном соответствии с правилами метрологии тоже должны быть признаны имеющими неопределенную погрешность.

И вот в этом суть второй серьезнейшей метрологической проблемы, связанной с использованием значений коэффициентов излучения, взятых из литературных и справочных материалов. Она также, сознательно или бессознательно, игнорируется метрологами и специалистами по пирометрии.

То есть, даже если коэффициент излучения выбран правильно, с учетом и спектральной излучательной способности материала, и спектральных характеристик пирометра, в подавляющем большинстве случаев значение погрешности определения этого коэффициента отсутствует. В итоге обе упомянутые причины делают погрешность измерения температуры энергетическим пирометром

коэффициентом на правильный результат следует отметить, что температурная зависимость излучательной способности является основной причиной метрологической несостоятельности такого метода оценки коэффициента излучения. Если использовать метод "подкрутки" на правильный результат коэффициента излучения при определенной температуре, то результат измерения, полученный с этим коэффициентом при другой температуре объекта, может иметь дополнительную методическую погрешность неопределенной величины, от единиц до десятков процентов.



неопределенной, причем в ряде случаев эта погрешность может оказаться очень большой, до десятков процентов.

Метрологи же в качестве погрешности результата измерения выставляют в данном случае либо основную погрешность СИ (средства измерения), либо общую погрешность (с учетом случайной и неисключенной систематической составляющих), при этом в качестве неисключенной систематической составляющей используется лишь основная погрешность СИ. Вследствие этого происходит потеря значимых составляющих систематической погрешности, которая и ведет к описанному выше кажущемуся нарушению базового принципа единства измерений.

Таким образом, перед пирометрией для приведения в соответствие с требованиями современной метрологии стоит задача научиться определять метрологически значимое значение коэффициента излучения  $\epsilon$  для любого объекта, измерение температуры которого может быть востребовано, и для любого из представленных на рынке пирометров.

Поэтому необходима разработка новых способов получения значений коэффициентов излучения  $\epsilon$  измеряемых объектов, которые могут обеспечить метрологическую значимость полученного результата измерения температуры.

### Математическое соотношение для нахождения коэффициента излучения $\epsilon$

Возвратимся к рисункам 1 и 2. Нетрудно показать, что значение коэффициента излучения, которое надо ввести в пирометр для того, чтобы он правильно измерил температуру такого "несерого объекта", определяется соотношением:

$$\epsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda}, \quad (2)$$

где  $\epsilon(\lambda)$  – спектральная излучательная способность измеряемого объекта (в данном случае из рис.1),  $s(\lambda)$  – спектральная характеристика чувствительности конкретного приемника (в рассматриваемом случае –  $s_a(\lambda)$ ,  $s_b(\lambda)$  или  $s_c(\lambda)$  из рис.2),  $P(\lambda, T)$  – функция Планка.

Расчет, проведенный в соответствии с (2) для температуры 1000°C, а также для  $\epsilon(\lambda)$ , приведенной на рис.1, и  $s_a(\lambda)$ ,  $s_b(\lambda)$  и  $s_c(\lambda)$  (рис. 2) дает следующие результаты:

$$\epsilon_a = 0,695; \epsilon_b = 0,634; \epsilon_c = 0,251,$$

components) as the error of measurement result in this case and only basic error of the International System of Units is used as the residual systematic component. As a result, important components of the systematic error are lost and it causes the violation of the basic principle of measurements traceability described above.

Thus, in order to meet the requirements of modern metrology, pyrometry faces the task to learn how to estimate the value of the radiation coefficient  $\epsilon$  which is metrologically significant for any object the temperature measurement of which can be needed and for any pyrometer offered at the market.

Therefore, in order to obtain the values of the radiation coefficients  $\epsilon$  of measured objects which can ensure the metrological dependence of the obtained result of measured temperature the development of new methods is required.

### Mathematical correlation for the estimation of the radiation coefficient $\epsilon$

Let us return to Figures 1 and 2. It is not difficult to show that the value of radiation coefficient which must be entered to pyrometer for the correct measurement of the temperature of such "non-gray object" can be estimated on the basis of the following correlation:

$$\epsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda}, \quad (2)$$

where  $\epsilon(\lambda)$  is the spectral radiation capacity of measured object (in this case from Fig. 1),  $s(\lambda)$  is the spectral characteristic of sensitivity of the specific detector (in the case under consideration –  $s_a(\lambda)$ ,  $s_b(\lambda)$  or  $s_c(\lambda)$  from Fig. 2),  $P(\lambda, T)$  refers to the Planck function.

Calculations performed in accordance with the formula (2) for the temperature of 1000 °C as well as for  $\epsilon(\lambda)$  specified in Fig. 1, and  $s_a(\lambda)$ ,  $s_b(\lambda)$  and  $s_c(\lambda)$  (Fig. 2) yield the following results:

$$\epsilon_a = 0.695; \epsilon_b = 0.634; \epsilon_c = 0.251,$$

where  $\epsilon_a$  was estimated using  $s_a(\lambda)$ ,  $\epsilon_b$  – using  $s_b(\lambda)$ ,  $\epsilon_c$  – using  $s_c(\lambda)$ . It should be noted that the values  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_b$  and  $\epsilon_c$  correspond to the mean values  $\epsilon(\lambda)$  within the ranges of spectral sensitivity of the relevant detectors, it is evident when we compare the results from Fig. 3 where the spectral sensitivities of detectors are superimposed on  $\epsilon(\lambda)$ .



где  $\epsilon_a$  определялся с использованием  $s_a(\lambda)$ ,  $\epsilon_b$  – с использованием  $s_b(\lambda)$ ,  $\epsilon_c$  – с использованием  $s_c(\lambda)$ . Отметим, что значения  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_b$  и  $\epsilon_c$  соответствуют средним значениям  $\epsilon(\lambda)$  в диапазонах спектральной чувствительности соответствующих приемников – это хорошо подтверждается сравнением результатов расчета с рис.3, где спектральные чувствительности приемников наложены на  $\epsilon(\lambda)$ .

### **Проблема нарушения цепи прослеживаемости энергетических пирометров к Первичному эталону единицы температуры при измерении реальных объектов**

О том, что в энергетических пирометрах при измерении температуры реальных объектов, когда вводимый в пирометр коэффициент излучения отличен от единицы, нарушается цепь прослеживаемости к Первичному эталону единицы температуры, говорилось в [6, 7]. Этот факт метрологами и пирометристами в полной мере еще не осознан.

Чтобы понять причину этого, нужно принять во внимание следующее. Калибровка и поверка пирометров осуществляется на МЧТ (модель "черного тела"), излучательная способность которых отличается от единицы обычно на доли процента.

### **Problem connected with the breakdown of traceability chain of energy pyrometers to the primary standard of temperature unit upon the measurement of actual objects**

The fact that the traceability chain to the primary standard of temperature unit is broken in energy pyrometers during the temperature measurement of tangible objects, when the radiation coefficient entered to the pyrometer is different from 1, was described in the papers [6, 7]. This fact has not been realized by metrologists and pyrometry specialists to the full extent.

In order to understand the reason for it, it is necessary to take into account the following statement. Calibration and standardization of the pyrometers is accomplished at "black body" models (BBM) radiation capacity of which is usually different from 1 by fractions of one percent. Therefore, during the calibration and standardization the correction coefficient which is equal to 1 (or 0.99-0.999 which is the same in this case) is entered to energy pyrometer. In other words, the metrological characteristics of pyrometers and their basic error, primarily, are determined and confirmed by the unit correction coefficient entered to pyrometer.



Поэтому при калибровке и поверке в энергетический пирометр вводят коэффициент коррекции, равный единице (или 0,99–0,999, что в данном случае то же самое). То есть, метрологические параметры пирометров, и в первую очередь их основная погрешность, определены и подтверждены при введенном в пирометр единичном коэффициенте коррекции.

Когда мы этим же пирометром измеряем температуру реального объекта, мы вводим в него отличный от 1 коэффициент коррекции, так как излучательная способность подавляющего большинства реальных объектов лежит в пределах от 0,02 до 0,95. В свете этого возникает законный вопрос – как связаны между собой основная погрешность пирометра при введенном в него единичном коэффициенте коррекции, и при коэффициенте коррекции, отличном от 1?

Ответ такой – расчетным путем найти эту связь невозможно. Погрешность при отличном от единицы коэффициенте коррекции может быть и меньше погрешности при единичном коэффициенте коррекции, и больше ее, причем насколько больше или меньше – сказать заранее невозможно, и это неприемлемо с точки зрения правил метрологии.

Почему это происходит? Дело в том, что когда пирометр осуществляет коррекцию, и в ней существует ряд операций, в которых производители могут допустить те или иные ошибки, и которые приведут к появлению неконтролируемых дополнительных погрешностей. Вот некоторые из возможных ошибок.

1. Известны алгоритмы коррекции для яркостных пирометров и для радиационных пирометров. Производитель может корректировать яркостной пирометр соотношением для радиационного, и наоборот. Это очень распространенная ошибка. К чему это приводит, показано в [7].
2. Далее, ни то, ни другое соотношение не подходит для пирометров частичного излучения. Их надо корректировать, корректируя величину потока, как это неявно следует из [8]. Мы не знаем, пирометр частичного излучения корректируется по потоку или гораздо более простым соотношением для пирометра полного излучения.
3. В упомянутых выше соотношениях для коррекции значения температуры должны быть в кельвинах. Но программист может ошибочно использовать для коррекции результатов значения температуры в градусах Цельсия, без

And when we measure the temperature of tangible object using this pyrometer we enter the correction coefficient which is different from 1 because the radiation capacity of the vast majority of actual objects lies within the limits of 0.02 to 0.95. In this light, the legitimate question occurs: how are the basic errors of pyrometers with the entered unit correction coefficient and correction coefficient which is different from 1 interconnected?

The answer is as follows: it is impossible to find this interconnection using the calculation method. The error upon the correction coefficient which is different from 1 can be lower or greater than the error upon the unit correction coefficient, and it is impossible to say beforehand to what extent it is greater or lower; it is inadmissible from the point of view of metrology rules.

Why does it happen? The matter is that when pyrometer performs correction and there is number of operations in which manufacturers can make various mistakes and which will cause the occurrence of uncontrolled additional errors. Here are some possible mistakes.

1. Correction algorithms for brightness pyrometers and radiation pyrometers are known [7 correlations (1) and (2)]. Manufacturer can correct the brightness pyrometer using the correlation for radiation pyrometer and vice versa. It is common error. Its results are shown in the paper [7].
2. Further, both correlations are not applicable for the partial radiation pyrometers. They should be corrected using the value of flux which indirectly appears from the paper [8]. We do not know if the partial radiation pyrometer is corrected by the flux or on the basis of much simpler correlation for the total radiation pyrometer.
3. In the above-mentioned correlations temperature values must be in Kelvin for the correction. But the programmer might use the temperature values in Celsius degrees for the correction by mistake not converting them into Kelvin. In other words, the algorithm can be correct but it can be used with mistakes.
4. Finally, when implementing the algorithm, microprocessor might contain common programmer mistakes, for example, register overflow or underflow. Such mistakes are dangerous due to the fact that they do not affect one type of data files but they can cause noticeable errors in other data files. In this light, they are not always detected during the process of program testing and become apparent only at the stage of product use.



- перевода в кельвины. То есть алгоритм может быть правильным, но использован с ошибкой.
4. Наконец, при реализации алгоритма в микропроцессоре могут быть просто обычные программистские ошибки типа переполнения или антипереполнения какого-либо регистра. Такие ошибки опасны тем, что на одних комплектах данных они могут не сказываться, а на других – приводить к заметным погрешностям. В свете этого они не всегда обнаруживаются в процессе тестирования программ, и проявятся лишь в дальнейшем, на этапе эксплуатации изделия.
  5. Различные нелинейные эффекты в аналоговой схемотехнике. Наглядный пример того, что такое возможно, и оценка вызываемой этим погрешности приведены в [9].

Таким образом, есть ряд причин, которые могут привести к неконтролируемому росту погрешности при коэффициенте коррекции, отличном от 1. Определить же, произошел этот рост погрешности или нет, можно только экспериментально. Но обслуживания, поверочных схем и методик для этого сегодня нет, что и позволяет говорить о разрыве цепи прослеживаемости для энергетических пирометров при измерении ими температуры реальных объектов.

Для восстановления прослеживаемости, как отмечалось в [6,7], необходим эталон излучательной способности, который будет воспроизводить, хранить и передавать монохроматическую, полосовую и интегральную излучательную способность. Нужны рабочие эталонные средства излучательной способности, воспроизводящие наряду с температурой различные значения излучательной способности. И погрешности пирометров должны определяться и нормироваться не только при различных значениях температуры, но и при различных значениях излучательной способности при каждой из упомянутых температур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итог. До настоящего времени метрология в пирометрии рассматривала только вопросы, связанные с созданием эталонов температуры, уточнением температур фазовых переходов, выбранных в качестве реперных, передачей размера единицы от первичного эталона к рабочим эталонам более низких разрядов, конструированием и аттестацией эталонных излучателей и эталонных пирометров, поверочными схемами, с методиками проверок и калибровок. То есть метрология обслуживала только эталонно-поверочную область пирометрии. В то же время метрология пирометрических

5. Different nonlinear effects in analog circuit engineering. Illustrative example of its possibility and evaluation of caused error is given in the paper [9].

Thus, there are several reasons which can result in uncontrolled growth of error upon the correction coefficient which is different from 1. It is possible to determine if the error has grown or not experimentally. But currently there are no equipment, measurement chains and methods for it; this fact indicates the breakdown of traceability chain for energy pyrometers when measuring the temperature of tangible objects.

In order to restore the traceability as it was mentioned in the papers [6, 7] the standard of radiation capacity is required which will reproduce, store and transfer the monochromatic, band and integral radiation capacity. Standard operating devices of radiation capacity, which will reproduce the various values of radiation capacity together with the temperature, are required. And pyrometer errors should be estimated and standardized not only upon the different values of temperature but upon the different values of radiation capacity at every mentioned temperature as well.

## CONCLUSIONS

Let us summarize the article. Up until now the metrology have been considering only questions in pyrometry connected with the formation of temperature standards, clarification of the temperatures of phase transitions selected as the reference temperatures, transfer of the size of unit from the primary standard to the working standards of lower grades, design and certification of the standard radiators and standard pyrometers, measurement chains, methods of verifications and calibrations. In other words, metrology has been serving only to the reference and standard area of pyrometry. At the same time, the metrology of pyrometric measurements of the temperature of tangible objects, which have the radiation capacity different from one, including "non-gray" objects is in embryonic state and in reality has not been developed. In this context, great amount of unsolved problems have accumulated in the practical pyrometry for the last 50 years. Measurement devices offered to the consumers have been characterized by the basic errors equal to fractions of one percent for more than ten years already but they measure the temperature with the error by order-order and half (!) higher than the assigned basic error. This fact is known to everybody and does not surprise anybody but nobody pays attention to the abnormality of this fact.

Metrological challenges of the rest of pyrometry methods as well as their possible solutions will be considered.



измерений температуры реальных объектов, у которых излучательная способность отлична от единицы, в том числе и "несерых объектов", находится в зачаточном состоянии и, по сути, не разрабатывалась. В связи с этим в практической пирометрии за последние 50 лет накопилось огромное количество нерешенных проблем. Предлагаемые потребителям средства измерений уже более десяти лет характеризуются основными погрешностями в доли процента, но при этом измеряют температуру реальных объектов с погрешностью, на порядок-полтора (!) большей, чем приписанная им основная погрешность. Этот факт всем известен и никого не удивляет, но внимание на ненормальность этого никто не обращает.

В дальнейшем мы рассмотрим метрологические проблемы остальных методов пирометрии, а также их возможные решения.

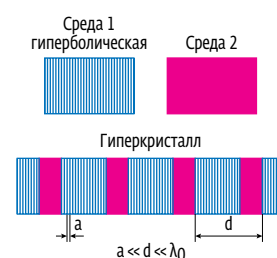
#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рибо Г. Оптическая пирометрия / Пер. с французского. – М.: ГТИ, 1934. – 343 с.
2. Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г. и др. Измерение температуры: теория, практика, эксперимент: Справочное издание. Т.2. – М.: Теплотехник, 2007.
3. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. Т.1. – М.: Наука, 1965.
4. Излучательные свойства твердых материалов/ Под ред. А.Е.Шейндлина – М.: Энергия, 1974.
5. Лисиенко В.Г., Шлеймович Е.М., Ладыгичев М.Г. и др. Температура: теория, практика, эксперимент: Справочное издание. Т.1, кн. 2. Методы контроля температуры. – М.: Теплотехник, 2009.
6. Крутиков В.Н., Фрунзе А.В. О прослеживаемости современных пирометров к первичному эталону единицы температуры и о классификации методов пирометрии. – Измерительная техника, 2012, №2, с.32–37.
7. Фрунзе А.В. О необходимости создания первичного эталона излучательной способности. – Метрология, 2012, №6, с.22–27.
8. Гаррисон Т.Р. Радиационная пирометрия. – М.: Мир, 1964.
9. Фрунзе А.В. Пирометры семейства "ДИЭЛТЕСТ-ТА" для измерения температуры алюминия и других цветных металлов, а также сплавов на их основе. – Труды IV МНТК Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении. – МИСиС, 2008, с. 380–384.

## Фотонные гиперкристаллы

Так называется статья Евгения Нариманова в *Physical Review X* [E.E.Narimanov. – *Phys. Rev.*, 2014, X 4, 041014], в которой анализируется возможность создания и предполагаемые свойства новой разновидности фотонных кристаллов, в которых периодическая модуляция показателя преломления вносится в среду с необычной гиперболической дисперсией. Если в среде диэлектрические проницаемости в двух ортогональных направлениях  $x$  и  $y$  имеют противоположный знак, то закон дисперсии принимает вид уравнения гиперболы в координатах волновых векторов  $k_x, k_y$ , а значит, в отличие от случая сред с обычным "круговым" законом дисперсии, волновые числа в такой среде могут принимать сколь угодно большие значения, пока длина волны не станет сравнимой с постоянной решетки и не перестанет работать приближение однородной среды.

Период фотонного гиперкристалла  $d$  должен, с одной стороны, быть много меньше длины волны  $\lambda$  в свободном пространстве, а с другой – намного превышать характерную толщину слоев  $a$ , составляющих метаматериал. Как создать такую гиперболическую среду? Когда заходит речь об экзотических веществах с отрицательными диэлектрическими



и магнитными проницаемостями, то вспоминают о метаматериалах – средах, в которых, так же, как и в фотонных кристаллах, оптические свойства определяются не химическим составом, а структурой. Но в отличие от фотонного кристалла, где период модуляции показателя преломления сравним с длиной волны света, характерный размер структурных элементов метаматериала намного меньше длины волны используемого излучения, что позволяет рассматривать метаматериал в приближении однородной среды. В статье предлагается совместить эти две, казалось бы взаимоисключающие, концепции фотонных кристаллов и метаматериалов. Действительно, если метаматериал является гиперболической средой, поддерживающей широкий спектр волн, в том числе и с высокими пространственными частотами, то в нем будет возможно брэгговское отражение даже при периоде модуляции показателя преломления, намного меньшем длины волны излучения в свободном пространстве. При этом среда с гиперболической дисперсией должна оставаться квазиоднородной, т.е. размер ее структурных элементов должен быть, в свою очередь, намного меньше периода фотонного кристалла (см. рисунок). Если учесть, что такие гиперболические среды существуют не только в виде метаматериалов (сверхрешетки из легированных полупроводников, металлов и диэлектриков), но и в "естественной" форме (кристаллы сапфира, висмута, графита и др.), для которой характерным размером является постоянная кристаллической решетки, то задача создания фотонного кристалла представляется вполне реализуемой.

Для чего можно использовать такую гибридную структуру? Например, для генерации "гиперплазмонов", которые одновременно имели бы основные свойства плазмонов и мод в фотонном кристалле: пространственную локализацию излучения, возможность субволновой фокусировки, высокую эффективность взаимодействия излучения с материалом, но при этом были бы лишены основного недостатка плазмонов – малой длины пробега вследствие сильного затухания.

А. Пятаков,

публикуется с разрешения издания "Перст",

perst.issp.ras.ru