

Скрытые неопределённости измерений температуры при калибровке пирометра

В. П. Ходунков

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: walkerearth@mail.ru

Рассмотрены не учитываемые ранее неопределённости измерений температуры, которые могут возникать при калибровке радиационных термометров (пирометров) для измерений температуры в диапазоне 1234,93–3273,15 К. Показано, что одна из таких неопределённостей связана с различием спектральных передаточных функций интерференционного фильтра поверяемого пирометра и монохроматора рабочего эталона температуры. Другая неопределённость обусловлена асимметрией спектральной передаточной функции пирометра относительно его центральной длины волны полосы пропускания.

Ключевые слова: радиационный термометр, монохроматор, спектральная передаточная функция, рабочие эталоны температуры.

С целью повышения точности калибровки радиационных термометров (пирометров), входящих в Государственную поверочную схему средств измерений температуры в диапазоне 1234,93–3273,15 К [1] проанализированы неопределённости измерений температуры, которые возникают при калибровке монохроматических радиационных пирометров и в настоящее время не учитываются. В работе использованы результаты исследований, выполненных в Отделе эталонов и научных исследований в области термодинамики ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

Согласно стандарту [1] монохроматические радиационные пирометры в диапазоне температуры 1234,93–3273,15 К поверяют (калибруют) по рабочим эталонам. Рабочими эталонами служат излучатели – модели абсолютно черного тела (АЧТ) на основе фазовых переходов чистых металлов или эвтектических смесей, а также температурные лампы. Параметр калибровки – яркостная температура на рабочей эффективной длине волны пирометра. При этом эталоны-копии (температурные лампы) калибруют по эталонному АЧТ с применением фотоэлектрического компаратора яркостей (спектрокомпаратора), входящего в состав Государственного первичного эталона температуры в диапазоне от 0 до 3000 °С ГЭТ 34–2007.

Были проанализированы процессы воспроизведения и передачи единицы температуры, выполняемые в соответствии со стандартом [1]. Установлено, что при практической реализации этих процессов возникают дополнительные неучтённые (скрытые) неопределённости, связанные с различием спектральных передаточных функций интерференционного фильтра аттестуемого пирометра и монохроматора, входящего в состав фотоэлектрического компаратора яркостей, а также с асимметрией спектральной передаточной функции пирометра относительно центральной длины волны его полосы пропускания. Указанные факторы вносят дополнительный весомый вклад в бюджет неопределённости измерения температуры реальных объектов с использованием радиационных пирометров [2].

Перед тем как проанализировать данные неопределённости, целесообразно отметить неточность используемого метрологами термина «спектральная чувствительность пирометра».

С точки зрения теории автоматического управления более правильно было бы оперировать термином «спектральная передаточная функция пирометра». Спектральной чувствительностью обладает фотоприёмник (обычно – фотодиод) пирометра, а входящий в пирометр интерференционный фильтр характеризуется спектральной передаточной функцией, поэтому пирометр, как устройство, состоящее из этих двух элементов, также характеризуется спектральной передаточной функцией.

Первая (наиболее значимая) неопределённость обусловлена различием спектральных передаточных функций интерференционного фильтра пирометра и монохроматора, входящего в состав фотоэлектрического компаратора яркостей. Причины и процесс возникновения данной неопределённости покажем на примере передачи реперных значений температуры от АЧТ к температурной лампе и затем от лампы к пирометру.

Предположим, что требуется откалибровать радиационный пирометр. Согласно стандарту [1] можно использовать модель АЧТ либо температурную лампу. При этом необходимо определить, будут ли идентичными калибровочные зависимости для данного пирометра, полученные различными способами. Также надо выяснить, какую температуру нити накаливания температурной лампы в одноимённой реперной точке регистрирует пирометр, откалиброванный по модели АЧТ, какую реперную температуру излучающей полости модели АЧТ регистрирует пирометр, откалиброванный по температурной лампе, и совпадут ли измеренные значения. Для поиска ответов на поставленные вопросы детально рассмотрим процесс калибровки пирометра, состоящий из двух этапов: калибровки температурной лампы и пирометра.

Калибровка температурной лампы. Вначале осуществляется передача заданных (реперных) значений температуры от модели АЧТ температурной лампе. При этом с использованием модели АЧТ обеспечивается процесс фазового перехода чистого металла или эвтектической смеси – так называемая площадка плавления (затвердевания). В течение фазового перехода температура излучающей полости (ампулы реперной точки) стабилизируется при заданном значении, и выполняется калибровка температурной лампы. Рассмотрим процесс передачи значений температуры. Полихроматическое излучение излучающей поло-

сти модели АЧТ через оптическую систему эталона фокусируется на входную щель монохроматора, где преобразуется в монохроматическое излучение (обычно с длиной волны 650 или 656 нм). Затем монохроматическое излучение попадает в фотоприёмник (фотодиод), при этом регистрируется генерируемый приёмником фототок. Далее на входную щель монохроматора через оптическую систему эталона фокусируется полихроматическое излучение ленты накаливания температурной лампы и аналогичным образом измеряется фототок, обусловленный излучением лампы. Оператором подбирается такой питающий ток лампы, при котором совпадают измеренные фототоки АЧТ и лампы, т. е. равны друг другу яркости излучающей полости АЧТ и нити накаливания лампы. Измеренному значению фототока (заданной температуре) ставится в соответствие экспериментально подобранное значение тока питания лампы.

Таким образом, в результате калибровки температурной лампы определяются питающие токи лампы, согласованные с заданными значениями температуры, наблюдаемыми в месте визирования нити накаливания лампы. Другими словами, как принято считать, строится градуировочная характеристика лампы по её яркостной температуре. Фототок $i_{\text{АЧТ}j}$ фотоприёмника (фотодиода) для j -й реперной температуры T_{pj} модели АЧТ можно рассчитать как

$$i_{\text{АЧТ}j} = F_M \int_{\lambda_{1M}}^{\lambda_{2M}} L(\lambda, T_{pj}) H_M(\lambda) QED_{\text{АЧТ}} S_{\text{АЧТ}}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где F_M – площадь сечения выходного пучка излучения монохроматора; $\lambda_{1M}, \lambda_{2M}$ – границы полосы пропускания монохроматора (обычно от 2 до 5 нм); $L(\lambda, T_{pj})$ – спектральная плотность мощности излучения АЧТ, рассчитываемая по формуле Планка; $H_M(\lambda)$ – спектральная передаточная функция монохроматора; $QED_{\text{АЧТ}}$ – квантовая эффективность фотодетектора (для одиночных кремниевых фотодиодов обычно $QED_{\text{АЧТ}} \approx 0,8$); $S_{\text{АЧТ}}(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотодиода АЧТ.

Условие равенства фототоков, сгенерированных излучением АЧТ и лампы с вольфрамовой нитью накала запишем в виде

$$i_{\text{АЧТ}j} = i_{Wj} \text{ при } T_{pj} = T_{Wj}, \quad (2)$$

где T_{Wj} – полученная при калибровке лампы яркостная температура вольфрама (нити накаливания лампы).

Яркостная температура нити накаливания лампы T_{Wj} связана с её истинной температурой T_{Wj}^* известным соотношением:

$$\frac{1}{T_{Wj}} - \frac{1}{T_{Wj}^*} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_W(\lambda, T)}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_W \approx 0,447$ (при $\lambda = 650$ нм, $T = 1358$ К) – спектральный коэффициент излучения вольфрамовой нити накаливания лампы [3]; $C_2 = (1,438 \pm 0,001) \cdot 10^{-2}$ – второй коэффициент в формуле Планка.

Для дальнейшего обоснования неопределённости отметим важную деталь: по своей сути, аппаратное сочетание монохроматора с фотодиодом – есть не что иное, как монохроматический пирометр, отличающийся от традиционного пирометра лишь тем, что его составные элементы (интерференционный фильтр

(монохроматор) и приёмник) в большей степени разнесены в пространстве и не представляют единую конструкцию.

Калибровка пирометра. Калибровать пирометр можно двумя способами.

Калибровка пирометра по модели АЧТ. Пирометр фокусируется на выбранное сечение излучающей полости ампулы реперной точки АЧТ, реализующей процесс фазового перехода чистого металла или эвтектического сплава. Сформированному токовому сигналу пирометра ставится в соответствие реперная температура конкретного фазового перехода. В результате калибровки получается набор значений тока пирометра, соответствующих заданным реперным температурам фазовых переходов. Фототок i_{pj} пирометра для j -й реперной температуры T_{pj} рассчитывается по формуле, аналогичной (1):

$$i_{pj} = F_n \int_{\lambda_{1n}}^{\lambda_{2n}} L(\lambda, T_{pj}) H_n(\lambda) QED_n S_n(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где F_n – площадь сечения пятна визирования пирометра; $\lambda_{1n}, \lambda_{2n}$ – границы полосы пропускания пирометра (обычно полная полоса пропускания около 20 нм, на уровне половины пика $\Delta\lambda_{50} \approx 15$ нм); $H_n(\lambda)$ – спектральная передаточная функция интерференционного фильтра пирометра; QED_n – квантовая эффективность фотодетектора пирометра; $S_n(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотодетектора пирометра.

Калибровка пирометра по температурной лампе. В процессе калибровки пирометра через температурную лампу пропускается ток, соответствующий заданной температуре. Затем пирометр фокусируется на нить накаливания лампы, и регистрируется его фототок. Данная операция выполняется для нескольких реперных температур. В результате определяется градуировочная характеристика $i_{pj}^* = f_n^*(T_{pj})$ пирометра – зависимость фототока от температуры. При этом фототок пирометра i_{pj}^* для j -й реперной температуры можно рассчитать по соотношению

$$i_{pj}^* = F_n \int_{\lambda_{1n}}^{\lambda_{2n}} L(\lambda, T_{Wj}^*) H_n(\lambda) QED_n S_n(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

где T_{Wj}^* – измеренная пирометром яркостная температура нити накаливания лампы.

Условия равенства измеренных пирометром значений температуры АЧТ и лампы для пирометров, откалиброванных по АЧТ и лампе, имеют вид соответственно

$$T_{pj} = T_{Wj} \text{ при } L(\lambda, T_{pj}) = L(\lambda, T_{Wj}); \quad (6)$$

$$T_{pj} = T_{Wj}^* \text{ при } L(\lambda, T_{pj}) = L(\lambda, T_{Wj}^*). \quad (7)$$

Равенства (6), (7) измеряемых температур возможны только в случае идентичности либо подобия спектральных передаточных функций монохроматора и пирометра, т. е. когда функции плотности вероятности монохроматора и пирометра имеют одинаковые дисперсии. Как следует из соотношений (1)–(5), измеряемая температура прямо пропорциональна фототоку и,

соответственно, произведению соответствующей передаточной функции на спектральную плотность мощности излучения:

$$T_{Wj} \sim i_{AЧТj}(\lambda) \sim L(\lambda, T_{Wj}) H_M(\lambda) S_M(\lambda);$$

$$T_{Wj}^* \sim i_{пj}^*(\lambda) \sim L(\lambda, T_{Wj}^*) H_n(\lambda) S_n(\lambda).$$

Для обеспечения равенства измеряемых температур необходимо выполнение одного из двух условий:

$$\frac{T_{Wj}}{T_{Wj}^*} = 1 \Leftrightarrow \frac{\int_{\lambda_{1M}}^{\lambda_{2M}} L(\lambda, T_{Wj}) H_M(\lambda) S_M(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{1M}}^{\lambda_{2M}} L(\lambda, T_{Wj}^*) H_n(\lambda) S_n(\lambda) d\lambda} = 1; \quad (8)$$

$$\frac{T_{Wj}}{T_{Wj}^*} = 1 \Leftrightarrow \frac{\int_{\lambda_{1n}}^{\lambda_{2n}} L(\lambda, T_{Wj}) H_M(\lambda) S_M(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{1n}}^{\lambda_{2n}} L(\lambda, T_{Wj}^*) H_n(\lambda) S_n(\lambda) d\lambda} = 1. \quad (9)$$

Спектральная передаточная функция пирометра приводит к полосе пропускания монохроматора («функция сжимается», см. (8)) или пирометра («функция растягивается», см. (9)). Проанализируем, например, условие (9). Предположим, что спектральные чувствительности фотодиодов спектрокомпаратора и пирометра одинаковые: $QED_{AЧТ} S_M(\lambda) = QED_n S_n(\lambda)$. Это вполне допустимо, поскольку обычно используют однотипные кремниевые фотодиоды S1337 (Hamamatsu, Япония). Выразим произведение передаточной функции на спектральную плотность мощности излучения через функцию плотности вероятности Гаусса:

$$\frac{L(\lambda, T) H(\lambda) S(\lambda)}{L(\lambda_0, T) H(\lambda_0) S(\lambda_0)} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lambda_i - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где λ_i – текущая длина волны в полосе пропускания монохроматора и пирометра; λ_0 – центральная длина волны полосы пропускания монохроматора и пирометра (обычно $\lambda_0 = 650$ нм); $\sigma = (\Delta\lambda_{100} - \Delta\lambda_{50})/2$ – абсолютная дисперсия; $\Delta\lambda_{100}$ – полная полоса пропускания (монохроматора, пирометра); $\Delta\lambda_{50}$ – ширина полосы пропускания на амплитуде 50 % пика.

В этом случае условие (9) может быть преобразовано к виду

$$\frac{T_{Wj}}{T_{Wj}^*} = 1 \Leftrightarrow \frac{\int_{\lambda_{1n}}^{\lambda_{2n}} \exp\left(-(\lambda_i - \lambda_0)^2 / (\sigma_M^* \sqrt{2})^2\right) d\lambda}{\int_{\lambda_{1n}}^{\lambda_{2n}} \exp\left(-(\lambda_i - \lambda_0)^2 / (\sigma_n \sqrt{2})^2\right) d\lambda} =$$

$$= \frac{(1 + \operatorname{erf}[(\lambda_i - \lambda_0) / (\sigma_M^* \sqrt{2})])|_{\lambda_{1n}}^{\lambda_{2n}}}{(1 + \operatorname{erf}[(\lambda_i - \lambda_0) / (\sigma_n \sqrt{2})])|_{\lambda_{1n}}^{\lambda_{2n}}} = \frac{A}{B} = 1, \quad (10)$$

где σ_n , σ_M^* – абсолютные дисперсии пирометра и монохроматора соответственно.

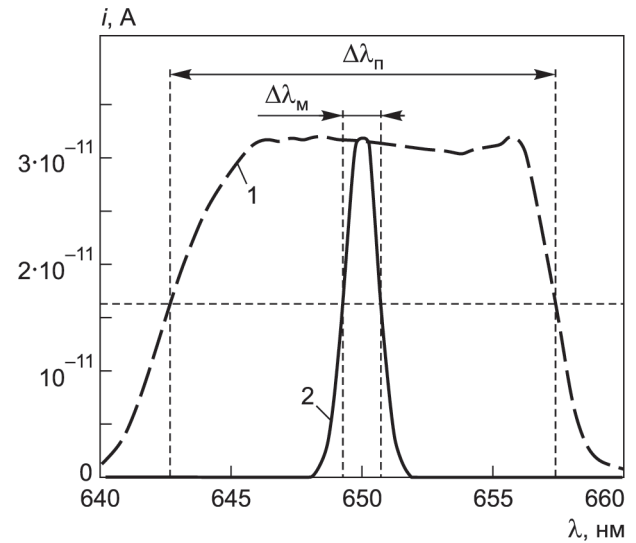


Рис. 1. Расчётные зависимости спектральных фототоков пирометра LP-4 (1) и монохроматора с относительной дисперсией $\sigma_M = 0,8$ (2)

Из соотношения (10) следует, что различие приведённых к единому спектральному интервалу $\lambda_{1n} - \lambda_{2n}$ фототоков от АЧТ и нити накаливания лампы зависит от соотношения дисперсий монохроматора и пирометра. При равенстве указанных дисперсий достигается равенство фототоков и, соответственно, значений измеряемой температуры. При различии этих дисперсий возникает дополнительная неопределённость. Случай равенства дисперсий маловероятен, на практике измеряемые значения температуры всегда различны.

Оценим разницу измеренных значений температур расчётным путем. Для этого определим спектральные фототоки линейного пирометра модели LP-4 и монохроматора, затем с использованием условия (10) найдём разницу значений интегральных (по полосе пропускания пирометра) фототоков $\Delta i_{AЧТ} / i_{AЧТ} = (i_{AЧТ} - i_{пAЧТ}^*) / i_{AЧТ}$ и разницу значений температуры.

Спектральную плотность мощности излучения АЧТ $L(\lambda)$ вычислим по формуле Планка для реперной точки температуры затвердевания меди ($T_{Cu} = 1357,78$ К) и реперной температуры плавления эвтектики рений–углерод ($T_{ReC} = 2747$ К).

Расчётные значения разницы температур нити накаливания температурной лампы для различных дисперсий монохроматора

σ_M , отн. ед.	$\Delta\lambda_{M50}$, нм	B	$100\Delta i_{FD}/i_{FD}$, %	ΔT , К	
				T_{Cu}	T_{ReC}
0,1	4,18	16,973	-6,25	-5,4	-22,0
0,2	3,83	16,576	-3,76	-3,2	-13,0
0,3	3,54	16,196	-1,38	-1,8	-4,5
0,4	3,28	15,833	0,90	0,7	3,0
0,5	3,06	15,500	2,97	2,4	10,0
0,6	2,88	15,187	4,93	4,0	16,4
0,7	2,71	14,903	6,71	5,4	22,0
0,8	2,56	14,656	8,26	6,7	28,0

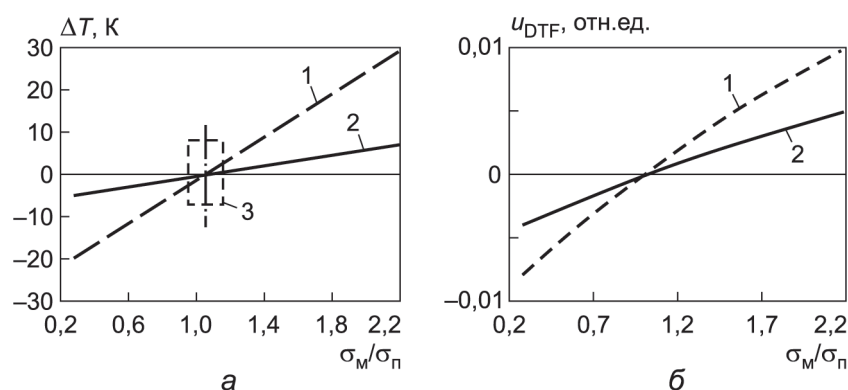


Рис. 2. Зависимости разницы температуры ΔT (а) и относительной неопределённости измерений температуры $u_{DTF} = \Delta T/T$ (б) от соотношения дисперсий монохроматора и пирометра при измеряемых реперных температурах 2747 К (1) и 1357,77 К (2) с учётом области допустимых отклонений (3)

Значение спектральной чувствительности (передаточная функция) пирометра $L_P(\lambda)$ указана в [4]. Относительная дисперсия пирометра принята постоянной: $\sigma_P = \Delta\lambda_{P100}/\Delta\lambda_{P50} - 1 = 20:14,7 - 1 = 0,36$. Относительная дисперсия монохроматора варьировалась в пределах $\sigma_M = \Delta\lambda_{M100}/\Delta\lambda_{M50} - 1 = 0,1 \dots 0,8$. Полученные при $\sigma_M = 0,8$ отн. ед. спектральные зависимости фототоков показаны на рис. 1. В таблице представлены результаты расчёта разницы ΔT значений температуры при различных значениях дисперсии монохроматора, разницы фототоков $\Delta i_{AЧТ}/i_{AЧТ} = (A-B)/A$, и параметра B . Значения интегралов (параметров A, B) из (10) численно найдены по формулам Ньютона–Котеса [5], параметр $A = 15,975$.

На рис. 2, а, б представлены зависимости расчётных значений разницы ΔT температуры и относительной неопределённости измерений температуры $u_{DTF} = \Delta T/T$ (DTF – difference in transfer function) от соотношения дисперсий монохроматора и пирометра для двух реперных температур T_{Cu} , T_{ReC} .

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Во-первых, по рис. 2, а можно определить значение температуры, зарегистрированное пирометром (см. вопросы, сформулированные в начале статьи). При $\sigma_M > \sigma_P$ наблюдается $\Delta T > 0$, т. е. пирометр, откалиброванный по АЧТ, регистрирует более высокую температуру нити накаливания лампы относительно температуры АЧТ, т. е. температура нити будет выше температуры АЧТ. Это означает, что при калибровке температурной лампы по модели АЧТ для достижения равенства их яркостей требуется больший питающий ток лампы, чем в случае $\sigma_M \leq \sigma_P$. Если $\Delta T < 0$ (при $\sigma_M < \sigma_P$), то пирометр регистрирует более низкую температуру нити накаливания лампы по сравнению с температурой АЧТ. Таким образом, разность температур может быть и отрицательной, и положительной, что целиком и полностью зависит от соотношения дисперсий пирометра и монохроматора.

Во-вторых, оценка допускаемой на практике неопределённости измерений температуры может быть качественной, но не количественной, поскольку неизвестны точные значения спектральной дисперсии современных монохроматоров. Предположим, что монохроматор и интерференционный фильтр пи-

рометра обладают близкими дисперсиями, например, отличаются на малую величину $\pm 10\%$. В этом случае неопределённость u_{DTF} измерений температур T_{Cu} , T_{ReC} , может составить $\pm 5 \cdot 10^{-4}$; $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ соответственно (см. рис. 2, б). Важно заметить, что данная неопределённость имеет систематический характер.

В-третьих, ситуация, аналогичная рассмотренной выше, наблюдается при калибровке радиационного термометра (пирометра) согласно новой методике воспроизведения и передачи единицы температуры прямым методом [4, 6]. Действительно, при такой калибровке устанавливается спектральная чувствительность пирометра по излучению монохроматора, имеющего одну передаточную функцию, а затем измеряется термодинамическая температура модели АЧТ в полосе пропускания пирометра, обладающего другой

передаточной функцией. Фактически получается, что один пирометр калибруется по другому пирометру, поэтому возникает рассмотренная выше неопределённость. Таким образом, калибровку пирометра для эталонной радиационной термометрии необходимо выполнять в полосе длин волн, равной или близкой полосе пропускания интерференционного фильтра данного пирометра. В этом случае исключается (или, по крайней мере, минимизируется) влияние различия передаточных функций на результат измерения.

Неопределённость u_{ASSTF} (ASSTF – asymmetry of transfer function) измерений температуры связана с асимметрией спектральной передаточной функции пирометра относительно центральной длины волны его полосы пропускания, т. е. с возможным несовпадением центральной λ_0 и эффективной $\lambda_{эфф}$ длин волн пирометра.

Как описано выше, при калибровке температурной лампы по модели АЧТ уравниваются яркости лампы и АЧТ на выбранной эффективной длине волны, при этом критерием равенства яркостей является равенство фототоков, генерируемых фотодиодом спектрокомпаратора от излучения лампы и от АЧТ. Эффективная длина волны (обычно $\lambda_{эфф} = 650$ нм) фактически считается центральной длиной волны для полос пропускания пирометра (640–660 нм) и монохроматора, что вполне логично. Однако, по мнению автора настоящей статьи, это можно применить лишь в случае идеального пирометра, у которого спектральная передаточная функция симметрична относительно центральной длины волны. Так как реальные пирометры всегда обладают ассиметричной спектральной передаточной функцией (см. рис. 1), то равенство яркостей лампы и АЧТ на центральной длине волны для аппаратного сочетания монохроматор–фотодиод не означает равенства соответствующих фототоков для пирометра.

Соблюдение равенства яркостей лампы L_W и АЧТ $L_{AЧТ}$ означает равенство соответствующих спектральных плотностей мощности на центральной длине волны λ_0 (рис. 3). Примем, что $L_W(\lambda_0 = 650 \text{ нм}) = L_{AЧТ}(\lambda_0 = 650 \text{ нм})$, а затем вычислим значения интегралов от спектрального фототока излучения лампы с использованием идеального пирометра (с симметричной

передаточной функцией, $\sigma_p=0,36$) и реального пирометра LP-4 (его спектральная чувствительность приведена в [4]). При измерении реперной температуры $T_{Cu}=1357,78$ К получим выражения для идеального и реального пирометров соответственно:

$$i_{AЧТ,W} = \int_{640\text{ нм}}^{660\text{ нм}} \varepsilon(\lambda, T_{Cu}) L_W(\lambda, T_{Cu}) S_{AЧТ}(\lambda) d\lambda;$$

$$i_{LP-4,W} = \int_{640\text{ нм}}^{660\text{ нм}} \varepsilon(\lambda, T_{Cu}) L_W(\lambda, T_{Cu}) S_p(\lambda) d\lambda.$$

Согласно выполненным расчетам при равенстве яркостей лампы и АЧТ на центральной длине волны $\lambda_0=650$ нм значения фото-токов идеального и реального пирометров различаются на 0,144 % (значение фототока пирометра LP-4 больше фототока идеального пирометра). Данная разница фототоков эквивалентна превышению измеренного пирометром значения температуры лампы относительно значения, измеренного с применением АЧТ, приблизительно на 0,1 К для $T_{Cu}=1357,78$ К. Это соответствует относительной неопределённости измерений температуры $u_{ASSTF}=7,4 \cdot 10^{-5}$. Равенство указанных измеренных температур достигается, если калибровать лампу на эффективной длине волны $\lambda_{эфф}=649,7$ нм. Таким образом, наблюдается несовпадение эффективной и центральной длин волн, и это несовпадение разное для различных пирометров.

Заключение. В результате выполненного исследования установлено, что при калибровке пирометра с использованием монохроматического излучения возникают две не учитываемые ранее неопределённости. Первая u_{DTF} обусловлена различием спектральных передаточных функций интерференционного фильтра калибруемого пирометра и монохроматора, входящего в состав фотоэлектрического компаратора яркостей. Вторая u_{ASSTF} связана с асимметрией спектральной передаточной функции пирометра относительно центральной длины волны его полосы пропускания. Неопределённости могут быть положительными или отрицательными, взаимно суммироваться и (или) взаимно компенсироваться. Например, для реперной точки плавления меди T_{Cu} при $\sigma_m=1,1\sigma_p$ получены $u_{DTF}=3,9 \cdot 10^{-4}$ отн. ед.; $u_{ASSTF}=7,4 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. (для пирометра LP-4), суммарная неопределённость составляет около $4,6 \cdot 10^{-4}$ отн. ед., что соответствует разности температуры $\Delta T=0,62$ К.

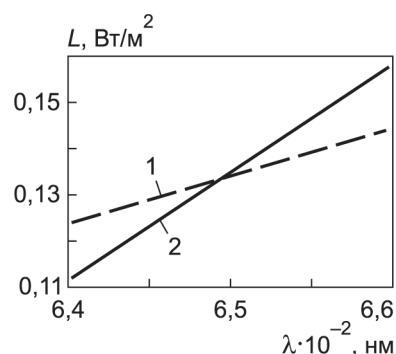


Рис. 3. Спектральная зависимость плотности мощности излучения, рассчитанная по формуле Планка, для вольфрамовой нити накаливания лампы (1) и модели АЧТ (2)

Выявленные неопределённости необходимо учитывать при выполнении международных сличений, реализации прямого метода передачи единицы температуры, а также аттестации и калибровке пирометров.

Литература

1. **ГОСТ 8.558–2009.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.
2. **Фрунзе А. А., Фрунзе А. В.** О погрешностях измерения температуры реальных объектов энергетическими пирометрами // Датчики и системы. 2014. № 3. С. 41–43.
3. **Larrabee R. D.** The spectral emissivity and optical properties of tungsten. Technical report 328. Cambridge, USA: Research laboratory of electronics, Massachusetts Institute of Technology, 1957. 81 p.
4. **Martín M. J., Mantilla J. M., del Campo D., Hernanz M. L., Pons A., Campos J.** Performance of different light sources for the absolute calibration of radiation thermometers // Intern. J. Thermophys. 2017. V. 38. No. 9. P. 137–140.
5. **Abramovitz M., Stegun I.** Handbook of mathematical functions with formulas, Graph and mathematical tables. Dover, New York: NIST, 1973. 1044 p.
6. **Yoon H., Saunders P., Machin G., Todd A. D.** Guide to the Realization of the ITS-90. Radiation Thermometry // BIPM: Consultative Committee for Thermometry under the auspices of the International Committee for Weights and Measures, 2017. 16 p.

Дата принятия: 17.07.2018.

Implicit uncertainties of temperature measurements during pyrometer calibration

V. P. Khodunkov

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia, e-mail: walkerearth@mail.ru

The previously unrecognized temperature measurement uncertainties that may occur during calibration of radiation thermometers (pyrometers) used for temperature measurements in the range of 1234,93–3273,15 K are considered. One of these uncertainties is shown to be related to the difference in spectral transfer functions of the interference filter of a calibrated pyrometer and a monochromator working temperature standard. Another uncertainty is due to the asymmetry of the spectral transfer function of the pyrometer relative to its central wavelength of the passband.

Key words: radiation thermometer, monochromator, spectral transfer function, temperature reference.