

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ТЕМПЕРАТУРЫ

1.1. Исследования спектрокомпаратора СКЯ

1.1.1. Определение спектрального диапазона и погрешности длины волны

1.1.1.1. Спектральный диапазон СКЯ и погрешность измеренного значения длины волны определяют с помощью спектральной лампы, обеспечивающей излучение линий спектра ртути и водорода.

Спектральную лампу устанавливают на место №3 эталонной лампы (ЛГЭ), юстируют по оси СКЯ и включают в соответствии с техническим описанием.

Устанавливают следующие значения ширины щелей монохроматора:

- входная – 0,01 мм;
- средняя – 1,00 мм;
- выходная – 1,10 мм.

Производят сканирование монохроматора по спектру от 0,5 мкм до 1 мкм.

Наличие сигнала фотодиода при прохождении всех длин волн, соответствующих линиям спектра ртути и водорода подтверждает указанный в таблице 1 спектральный диапазон СКЯ.

Для определения погрешности длины волны отмечают максимум сигнала при прохождении спектральной линии и показания отсчетного устройства шкалы длин волн монохроматора.

Измерения проводят при длинах волн спектральных линий ртути 0,48613 и 1,014 мкм, и спектральной линии водорода 0,65627 мкм.

Измерения повторяют не менее $n = 10$ раз на каждой из трех проверяемых спектральных линий.

Отклонение показаний счетчика длин волн монохроматора от номинальных значений длин волн спектральных линий не должно превышать 10^{-1} нм. В противном случае проводят оптическую юстировку монохроматора.

При значении отклонения более 10^{-2} нм в показания счетчика длин волн монохроматора должна вноситься поправка $\Delta\lambda$, определяемая по формуле:

$$\Delta\lambda = \lambda_{cp} - \lambda_0, \quad (1),$$

где: λ_{cp} – среднее значение из n измерений длины волны монохроматора,

λ_0 - номинальное значение длины волны спектральной линии.

Погрешность длины волны СКЯ определяют по формуле:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_{cp}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_{cp})^2}{n-1}} \quad (2),$$

где λ_i - показания отсчетного устройства монохроматора при i -м измерении.

Погрешность измерений температуры ΔT , вызванную неточностью длины волны при температуре T , рассчитывают по формуле:

$$\Delta T = T \cdot \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (3),$$

где T_0 - температура реперной точки

1.1.2. Определение нелинейности фотоэлектрического тракта СКЯ, введение поправки и расчет погрешности, вызываемой нелинейностью, осуществляют следующим образом:

1.1.2.1. На СКЯ устанавливают две вспомогательных температурные лампы. Настройку и регулировку накала ламп осуществляют так, чтобы при пропускании пучка света через полупрозрачное зеркало от каждой лампы спектрокомпаратор фиксировал равенство яркостей сличаемых ламп.

Коммутацию излучения от ламп, проецируемого на вход спектрокомпаратора, осуществляют с помощью электромеханических заслонок.

Выполняют процедуру удвоения яркости в следующей последовательности:

На первом шаге силу тока в каждой лампе устанавливают так, чтобы соответствующие выходные напряжения (сигналы) фотодиода приблизительно (с разницей не более 0,5 %) соответствовали сигналу при яркости реперной точки.

1.1.2.2. Измеряют сигнал v_2 , соответствующий удвоенной яркости, то есть сигнал при двух открытых заслонках.

Определяют отношение: $q_1 = (v_1 + v_1) / v_2 = 2v_1/v_2$

1.1.2.3. Силу тока в каждой лампе устанавливают так, чтобы соответствующие сигналы фотодиода опять приблизительно (с разницей не более 0,5 %) соответствовали сигналу v_2 , и измеряют сигнал v_3 .

Определяют отношение: $q_2 = 2 \cdot v_2 / v_3$

1.1.2.4. Операции 1.1.2.3 повторяют (т. е. производят удвоение яркости) до тех пор, пока сигнал v_k не превысит 8 В.

1.1.2.5. Каждому значению v_k сопоставляют соответствующие значения произведения η_k :

$$v_k \rightarrow \eta_k = \prod_{i=1}^k q_i \quad (4),$$

1.1.2.6. Значения температуры T_k [в К], возрастающей ступенями, которые соответствуют полученным сигналам $v_1 \dots v_k$, рассчитывают по формуле:

$$T_k = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - k \cdot \ln 2 \cdot \frac{\lambda}{c_2}} \quad (5),$$

где: T_0 – температура реперной точки [в К];
 k – число удвоений;
 c_2 – вторая радиационная постоянная Планка, равная 14388 мкм·К.

1.1.2.7. По полученным значениям ν_k и η_k определяется зависимость:

$$\eta(\nu) = 1 - a(1 - 2^{b\nu}), \quad (6),$$

где: a и b – постоянные, определяемые из экспериментальных данных методом наименьших квадратов для рядов ν_k , η_k .

Функцию $\eta(\nu)$ используют для корректировки сигнала фотодиода при измерении различающихся яркостей источников излучения: $\nu_{кор} = \nu \cdot \eta(\nu)$

1.1.2.8. Относительную погрешность Δ_{ν} , вызываемую нелинейностью фотодиода, рассчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = 0,1 \cdot a \cdot b \cdot 2^{b\nu} \quad (7),$$

Значение относительной погрешности не должно превышать 0,001 % при изменении сигнала в 10 раз по отношению к сигналу в реперной точке.

1.1.2.9. После достижения значения сигнала 8 В перед входной щелью монохроматора устанавливают светофильтр с пирометрическим ослаблением A , позволяющий уменьшить сигнал от фотодиода, оставляя его не превышающим 8 В при максимальной температуре $T_{макс}$.

1.1.2.10. Ориентировочное значение A рассчитывают из соотношения:

$$A = \frac{\nu_{макс}}{\nu_m} = e^{\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_{макс}} \right)} \quad (8),$$

где: m – число удвоений, при котором сигнал достигает 8 В;
 T_m – температура, при которой сигнал достигает 8 В;
 ν_m – сигнал фотодиода при температуре T_m ;
 $\nu_{макс}$ – сигнал фотодиода при температуре $T_{макс}$.

1.1.2.11. Точное значение A определяют по измеренному отношению сигналов при температуре T_m :

$$A = \frac{\nu_{без\ фильтра}}{\nu_{с\ фильтром}} \quad (9),$$

Измерения проводят не менее 10 раз и вычисляют среднее значение $A_{ср}$

1.1.2.12. Относительная погрешность *пирометрического ослабления* $\Delta_{\nu A}$, вызванная случайными факторами, выражается в виде СКО и определяется по формуле:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{A_{cp}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - A_{cp})^2}{n(n-1)}} \quad (10),$$

1.1.2.13. Скорректированный сигнал V_c , с исключением систематической погрешности от нелинейности и учётом пиromетрического ослабления светофильтра, рассчитывают по формуле:

$$V_c = A_{cp} \cdot \eta(\nu) \cdot \nu \quad (12)$$

1.1.2.14. Погрешность (НСП) θ_c , обусловленную неточной коррекцией нелинейности сигнала и ослаблением светофильтра, при температуре T определяют по формуле:

$$\theta_c = \frac{\lambda}{c_2} \cdot T^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2} \quad (13)$$

1.1.3. Определение дрейфа сигнала фотодиода

Дрейф определяют, как изменение сигнала за 10 минут работы в установившемся режиме от эталонной лампы (не менее 1 часа после момента включения) при температуре реперной точки меди.

Дрейф сигнала не должен превышать 0,003 %. В противном случае следует определить причину дрейфа и устранить ее.

1.1.4. Определение погрешности, вносимой различием размеров сравниваемых источников излучения – эффект размера источника (ЭРИ)

Погрешность из-за ЭРИ определяют, как разность относительного изменения сигнала при раскрытии ирисовой диафрагмы в плоскости промежуточного изображения, проецируемого на входную щель монохроматора, от излучателя реперной точки и от эталонной лампы, установленной в режим, соответствующий той же температуре.

Погрешность из-за ЭРИ определяют по формуле:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\nu_1 - \nu_2 - \nu_3 - \nu_4}{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \nu_i} \quad (14),$$

где:

ν_1 и ν_2 - сигналы при, соответственно, полностью открытой и полностью закрытой ирисовой диафрагме в плоскости промежуточного изображения, проецируемого на входную щель монохроматора, от излучателя реперной точки

ν_1 и ν_2 - сигналы при, соответственно, полностью открытой и полностью закрытой ирисовой диафрагме в плоскости промежуточного изображения, проецируемого на входную щель монохроматора, от эталонной лампы, установленной в режим, соответствующий той же температуре

1.1.5. Измерение влияния рассеянного света и внеполосового пропускания монохроматора при компарировании яркости тепловых источников излучения.

1.1.5.1. Влияние рассеянного света определяют по изменению сигнала от вспомогательной температурной лампы, которая включена на режим, соответствующий температуре 1300 – 1400 °С, при введении на пути луча спектрокомпаратора промежуточной вспомогательной диафрагмы, размер которой обеспечивает ограничение боковых лучей от периферийных участков ленты лампы. Изменение сигнала не должно превышать 10^{-6} от значения сигнала без вспомогательной диафрагмы.

1.1.5.2. Для оценки влияния внеполосового пропускания монохроматора входную щель монохроматора освещают He-Ne лазером компаратора, применяемым для юстировки и контроля положения элементов оптической системы.

Для установки уровня сигнала применяют вспомогательный поглощающий светофильтр с плотностью, при которой максимальный сигнал (при длине волны $\lambda=0,6328$ мкм) v_{\max} составляет 7 – 8 В.

1.1.5.3. Проверку влияния внеполосового пропускания осуществляют путем сканирования барабана длин волн в диапазоне чувствительности фотодиода 0,4 – 1,0 мкм и регистрации сигнала фотодиода v_{λ_i} через каждые 0,0005 мкм.

1.1.5.4. Относительную погрешность $\Delta_{o\lambda}v$ от влияния внеполосового пропускания рассчитывают по формуле:

$$\Delta_{o\lambda}v = \frac{\sum_{\lambda=0.4}^{1.0} v_{\lambda_i} - \sum_{\lambda=0.630}^{0.635} v_{\lambda_i}}{v_{\max}} \quad (15)$$

Рассчитанное значение погрешности не должно превышать 10^{-6} . В противном случае следует провести внеочередную юстировку монохроматора.

1.2. Исследования излучателя "черное тело" с АРТ

1.2.1. Излучатель "черное тело" с АРТ серебра, золота и меди исследуют с применением аппаратуры из состава ГЭ для воспроизведения температур точек затвердевания и фотоэлектрической аппаратуры, включающей спектрокомпаратор и средства измерений электрического сопротивления и напряжения.

1.2.2. Погрешность (НСП) воспроизведения температуры реперной точки (ТРТ) определяют по бюджету погрешности, приведенному в таблице 2.

Погрешность воспроизведения ТРТ рассчитывают как СКО суммы НСП составляющих, относящихся к реперной точке: $i = 1-5, 12-14$ по формуле:

$$\theta_{PT} = \sqrt{\sum_{i=1-5,12-14} \Theta_i^2} \quad (16)$$

Допускаемые значения θ_{PT} приведены в таблице 1.

1.3. Исследования температурных ламп ГЭ

1.3.1. Эталонные температурные лампы (ЛГЭ) исследуют с применением аппаратуры из состава ГЭ, включающей СКЯ, стабилизированные источники питания и средства измерений электрического сопротивления и напряжения.

При работе с ЛГЭ следует руководствоваться ГОСТ 8.155 и правилами, изложенными в п. 3.6.3 Правил хранения и применения ГЭ.

1.3.2. Нестабильность температурной лампы γ определяют, как изменение яркости (в температурном эквиваленте) $T_2 - T_1$ рабочего участка ленты при заданной температуре, отнесенное ко времени горения лампы t , и рассчитывают по формуле:

$$\gamma = \frac{T_2 - T_1}{t} \quad (17)$$

Лампа считается годной, если полученные значения γ во всех проверяемых точках не превышают указанных в таблице 1. В противном случае лампа подлежит отжигу при температуре 1100 °С в течение 8 часов и повторной проверке.

Таблица 2. Бюджет погрешности (неопределенности) при воспроизведении температуры реперной точки и ее передаче на температурную лампу

<i>i</i>	Факторы, обуславливающие наличие составляющей НСП,	Границы Θ , мК	Примечание
1	Примеси в металле и графите АРТ	20	Оценка по данным производителя материалов и по литературе [6-8]
2	Излучательная способность МЧТ	10	Оценка по литературе [6-8]
3	Охлаждение через отверстие МЧТ	10	
4	Неточность определения уровня ТЗМ	30	
5	Интерполяция и интегрирование	20	
6	Температура окружающей среды	20	
7	Погрешность измерения силы тока в цепи лампы	30	
8	Температура цоколя лампы	50	
9	Неточность определения длины волны	10	Оценка по п. 1.2.1
10	Нелинейность фотоэлектрического тракта СКЯ	10	Оценка по п. 1.2.2
11	Дрейф сигнала между измерениями лампы и АЧТ	20	Оценка по п. 1.2.3
12	ЭРИ	20	Оценка по п. 1.2.4
13	Рассеяние и поляризация излучения	10	Оценка по п. 1.2.5
14	Внеполосовое пропускание монохроматора	10	
15	Дрейф, нестабильность лампы	30	Оценка по п. 1.3

1.3.3. Воспроизводимость температурной лампы определяют по нестабильности γ в трех значениях температуры аналогично п.1.3.3, измеренной в разные дни не менее $k = 3$ раз, и рассчитывают по формуле (16).

1.4. Исследования излучателя ВЧТ для диапазона 961,78 - 3000 °С

1.4.1. Излучатель ВЧТ исследуют с применением фотоэлектрической аппаратуры из состава ГЭ, включающей СКЯ и средства измерений электрического сопротивления и напряжения.

1.4.2. Диапазон температуры определяют по нестабильности сигнала СКЯ (см. п.1.4.1.3). Излучатель считают годным по диапазону, если значения нестабильности сигнала при ТРТ и максимальной температуре ВЧТ не превышают указанных в таблице 1.

1.4.3. Нестабильность излучателя ВЧТ определяют по нестабильности $S_{ВЧТ}'$ сигнала СКЯ V_i , выраженной в виде СКО для $n \geq 100$ за время измерений не менее 10 минут по формуле:

$$S_{ВЧТ}' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1}} \quad (18)$$

Нестабильность проверяют не менее чем в пяти точках диапазона, включая крайние его точки. Излучатель считают годным, если значения $S_{ВЧТ}'$ во всех проверяемых точках диапазона ВЧТ не превышают указанных в таблице 1. В противном случае определяется и устраняется причина повышенной нестабильности.

Значения нестабильности в промежуточных температурах определяют линейной интерполяцией.

1.4.4. Воспроизводимость излучателя ВЧТ определяют по нестабильности, определенной в п.4.2.7.3 и измеренной в разные дни не менее $k = 3$ раз, по формуле:

$$S_{ВЧТ}'' = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^n (V_{mj} - \bar{V}_j)^2}{k(n-1)}} \quad (19)$$

Излучатель считают годным, если полученные значения $S_{ВЧТ}'$ не превышают значений, указанных в таблице 1. В противном случае определяется и устраняется причина повышенной невоспроизводимости.

2. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1. Оценку погрешности (неопределенности) воспроизведения размера единицы температуры делают следующим образом:

2.1.1. Случайная погрешность (неопределенность по типу А) воспроизведения единицы температуры определяется средним квадратическим отклонением (СКО) результатов измерений, проведенных в соответствии с п. 3.6.6 "Правил хранения и применения ГЭ".

Измерения случайной погрешности (неопределенности) производят при температурах, соответствующих краям диапазона температур 962,78 и 3000 °С.

Случайную погрешность S (неопределенность по типу А u_A) определяют по формуле:

$$S = u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}} \quad (20),$$

где \bar{T} – среднее значение температур T_i при $n \geq 5$ измерениях.

2.1.2. СКО суммы НСП S_Θ (неопределенность по типу В u_B) рассчитывают по формуле:

$$S_\Theta = u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{15} \Theta_i^2} \quad (21)$$

Оценки границ составляющих Θ_i берут в таблицах 2 и 3 для нижнего (961,78 °С) и верхнего предела диапазона температур (3000 °С) соответственно.

2.1.3. Границу НСП температуры рассчитывают по формуле:

$$\Theta_p = K \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{15} \Theta_i^2} \quad (22)$$

2.1.4. Суммарное СКО суммы НСП и случайных погрешностей S_Σ (суммарную стандартную неопределенность u_c) рассчитывают по формуле:

$$S_\Sigma = u_c = \sqrt{S^2 + S_\Theta^2} \quad (23)$$

Таблица 3 Бюджет погрешности (неопределенности) при воспроизведении и передаче размера единицы температуры при T=3000 °C

Коэффициент влияния составляющей погрешности (неопределенности)		№ i	Источник составляющей погрешности δ_i (неопределенности u_i)	Границы при T=3000 °C, мК (26)
Компонента реперной точки	$\left(\frac{T}{T_{PT}}\right)^2$	1	Примеси металла и графита	40
		2	Излучательная способность	80
		3	Утечка тепла через МЧТ	40
		4	Неточность оценки ТЗМ	120
Спектральная компонента	$\left(\frac{T}{\lambda}\right)\left(\frac{T}{T_{PT}}-1\right)$	5	Неточность длины волны	80
		6	Рассеянный свет	30
		7	Внеполосовое пропускание СКЯ	10
		8	Нелинейность сигнала	50
Компонента сигнала СКЯ	$\left(\frac{\lambda T^2}{c_2}\right)$	9	Дрейф сигнала между калибровками	20
		10	ЭРИ	230
		11	Интерполяция и интегрирование	40
		12	Неточность измерения тока в цепи	10
Компонента, обусловленная лампой или ВЧТ	Определяется при фактическом значении T_{max}	13	Дрейф, нестабильность	50
		14	Окружающая температура	20
		15	Нагрев цоколя лампы	10

2.1.5. Значение СКО суммы НСП S_θ (неопределенность u_B), рассчитанное по формуле (20), при условии, что компоненты, взятые из таблиц 2 и 3, не превышают указанные там границы, находится в пределах (0,05 – 0.18) К.

Граница НСП с вероятностью 0,99 ($K=1,4$) $\Theta_{0,99}$ при этом находится в пределах (0,12 – 0,42) К.

2.1.6. Расширенную суммарную неопределенность $U_{0,95}$ с коэффициентом охвата $K=2$, соответствующим доверительной вероятности 0,95, рассчитывают по формуле:

$$U_{0,95} = K \cdot \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (24)$$

ССЫЛКИ

1. Международная температурная шкала 1990 г. (МТШ-90) - документ МКМВ 1989 г. (Перевод на русский язык 1992 г.),
2. Supplementary to the ITS-90 - документ МБМВ 1990 г.
3. ГОСТ 8.381 "ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей",
4. Руководство по выражению неопределенности измерения, Санкт-Петербург, 1999 г., (перевод и публикация ГП "ВНИИМ им.Д.И. Менделеева, научн. ред. проф. В.А. Слаев).
5. РМГ 43-2001. Применение "Руководства по выражению неопределенности измерений".
6. Document CCT WG5 on radiation thermometry. Uncertainty budgets for realisation of scales by radiation thermometry. Final Version, November 20, 2002.

7. Fischer J., et al., “Uncertainty budgets for realization of ITS-90 by radiation thermometry”, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, vol. 7, edited by Ripple D. C. *et al.*, Melville, NY, AIP, 2003, pp. 631-638
8. H.J. Jung, *Metrologia* 15, 173 (1979)