

## Исследование влияния термометрических характеристик металлических сплавов на погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения

*Исследовано влияние оптических характеристик металлических сплавов на методические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения. Установлено, что доминирующей и определяющей метрологические характеристики симметрично-волновой пирометрии излучения является нелинейность спектральных распределений излучательной способности сплавов при незначительном косвенном влиянии их крутизны. Доказана перспективность симметрично-волновой пирометрии для термоконтроля металлических сплавов и неметаллических материалов, имеющих спадающие выпуклые распределения излучательной способности, погрешности для которых не превышают 0,5 % и могут быть дополнительно снижены оптимизацией оптических характеристик термометрических систем.*

**Ключевые слова:** многоцветовая термометрия, симметрично-волновая термометрия, температура излучения, температура объекта, излучательная способность, спектральные распределения излучательной способности

Симметрично-волновая пирометрия излучения (СВПИ) – одно из наиболее перспективных известных направлений многоцветовой термометрии, разрабатываемых Физико-технологическим институтом металлов и сплавов НАН Украины (ФТИМС НАНУ). Его перспективность определяется в том числе значительно более низкими погрешностями измерений по сравнению с остальными многоцветовыми, и тем более классическими методами. В работах [1-3] установлено, что для нецветных металлов и их сплавов доминирующие в оптической термометрии методические погрешности СВПИ в 6-8 раз ниже погрешностей известных методов полихроматической пирометрии излучения [4]. Такие высокие метрологические характеристики СВПИ значительно расширяют область ее использования в наиболее сложных термометрических условиях металлургии, которые в основном определяются случайно изменяющимися коэффициентами излучательной способности ( $\epsilon$ ) и пропускания промежуточных сопутствующих и специальных сред. Влияние промежуточных сред, как правило, менее проблематично и исключается с помощью продуваемых фурм или использованием рабочих спектральных диапазонов со стабильным пропусканием. Одним из наиболее простых методов СВПИ является линейная симметрично-волновая пирометрия излучения, методические погрешности которой равны нулю в случае линейных термодинамически равновесных, серых, возрастающих и спадающих спектральных распределений излучательной способности (ТР, СР, СЛ, ВЛ). Реальные распределения излучательной способности металлов и их сплавов в наиболее приемлемых для оптической термометрии спектральных диапазонах отклоняются от указанных линейных. Поэтому для оптимизации оптических характеристик симметрично-волновой пирометрии излучения принципиально исследовать влияние этих отклонений на погрешности линейной СВПИ и определение допустимых пределов отклоне-

ний, при которых обеспечивается требуемая точность измерений температуры. Для количественной оценки отклонений в работе [2] нами предложен коэффициент нелинейности

$$K_n = \epsilon_2 - \epsilon_{2n},$$

где  $\epsilon_2$  – излучательная способность объекта на длине волны  $\lambda_2$ ;  $\epsilon_{2n}$  – излучательная способность объекта на длине волны  $\lambda_2$  для линейно аппроксимированного распределения  $\epsilon_n = f(\lambda)$ .

Термометрические характеристики объектов СВПИ, в том числе металлических сплавов, количественно определяются также коэффициентом крутизны спектральных распределений излучательной способности  $K_k$  и диапазоном излучательной способности  $\Delta\epsilon$ .

$$K_k = (\epsilon_3 - \epsilon_1)/(\lambda_3 - \lambda_1),$$

где  $K_k$  – коэффициент крутизны,  $m^{-1}$ ,  $\epsilon_3$  и  $\epsilon_1$  – значения излучательной способности объекта соответственно на длинах волн  $\lambda_3$  и  $\lambda_1$ .

$\Delta\epsilon$  определяется значениями излучательной способности на граничных длинах волн, то есть на  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$ .

В настоящей статье авторы приводят результаты исследований влияния на погрешности линейной СВПИ основной количественной характеристики  $K_n$ , а также  $K_k$  при различных значениях остальных оптических характеристик систем пирометрии излучения и термометрируемых объектов, в том числе: спектрального диапазона  $\lambda_3$ - $\lambda_1$ , задающего  $\Delta\lambda = (\lambda_3 - \lambda_1)/2$ , мкм; длины средней волны  $\lambda_2$ , мкм; диапазона излучательной способности  $\Delta\epsilon$ .

Исследования выполнены для указанных линейных и возможных на различных участках спектра нелинейных распределениях излучательной способности, а именно: спадающих выпуклых (СВП); возрастающих выпуклых (ВВП); спадающих вогнутых (СВГ); возрастающих вогнутых (ВВГ).

На рис. 1 приведены установленные закономерности влияния  $K_n$  на методические погрешности

линейной СВПИ при  $\Delta\lambda = 0,3$  мкм;  $\lambda_2 = 0,8$  мкм;  $K_k$  от  $-178833$  до  $178833$  м $^{-1}$ ;  $\Delta\varepsilon = 0,3588-0,4661$ .

Для исследований в качестве базового СВП<sub>w</sub>-распределения выбрано наиболее изученное в термометрии, оптике металлов и светотехнике, а также детально представленное в литературе экспериментальное распределение излучательной способности вольфрама [5-7]. Для СВГ-, ВВП- и ВВГ-распределений использовали соответствующие зеркальные отображения СВП<sub>w</sub>-распределения, то есть СВГ<sub>зв</sub>-, ВВП<sub>зв</sub>- и ВВГ<sub>зв</sub>-распределения. Систематическая погрешность приведенных в указанных работах результатов исследований излучательной способности вольфрама оценивается для спектрального диапазона 0,4-1,0 мкм в 0,1-0,3 %, а случайная среднеквадратическая – 0,5 %.

Большее значение систематической погрешности относится к длинам волн 0,4 и 1,0 мкм. Нами установлено, что значительные колебания экспериментальных спектральных распределений излучательной способности вольфрама физически не обоснованы и не подтверждаются изменениями его электромагнитных характеристик по спектру и температуре. Объяснить эти колебания можно прежде всего погрешностями труднореализуемых высокотемпературных экспериментальных исследований оптических свойств этого металла. Поэтому известные экспериментальные данные для СВП<sub>ав</sub>-, СВГ<sub>азв</sub>-, ВВП<sub>азв</sub>- и ВВГ<sub>азв</sub>-распределений в спектральном диапазоне от 0,3 до 1,5 мкм были аппроксимированы соответственно следующими полиномами шестой степени:

$$\varepsilon_a = -0,0906\lambda_n^6 + 0,6024\lambda_n^5 - 1,6045\lambda_n^4 + 2,2555\lambda_n^3 - 1,8327\lambda_n^2 + 0,6475\lambda_n + 0,4015 \text{ (для СВП}_{ав}\text{)};$$

$$\varepsilon_a = -0,091\lambda_n^6 + 0,2693\lambda_n^5 - 0,2682\lambda_n^4 + 0,0177\lambda_n^3 + 0,1144\lambda_n^2 + 0,1443\lambda_n + 0,2656 \text{ (для СВГ}_{азв}\text{)};$$

$$\varepsilon_a = -(-0,09058751\lambda_n^6 - 0,6024\lambda_n^5 + 1,6045\lambda_n^4 - 2,2555\lambda_n^3 + 1,8327\lambda_n^2 - 0,6475\lambda_n + 0,4234344) \text{ (для ВВП}_{азв}\text{)};$$

$$\varepsilon_a = -(-0,0909875\lambda_n^6 + 0,2693\lambda_n^5 - 0,2682\lambda_n^4 + 0,0177\lambda_n^3 + 0,1144\lambda_n^2 + 0,1443\lambda_n - 0,5593343) \text{ (для ВВГ}_{азв}\text{-распределений)}.$$

Анализ полученных закономерностей показывает, что зависимости  $\delta_{свпи} = f(K_n)$  имеют монотонный экспоненциальный, спадающий с уменьшением  $K_n$ , характер для СВП-, СВГ-, ВВП- и ВВГ-распределений излучательной способности по спектру. При этом зависимости для экспериментальных и аппроксимированных распределений практически совпадают для всех распределений, за исключением ВВГ-распределений со значительно более высоким уровнем погрешностей, который и обуславливает это заметное расхождение. Вполне естественно, что с увеличением  $K_n$  абсолютно возрастают погрешности

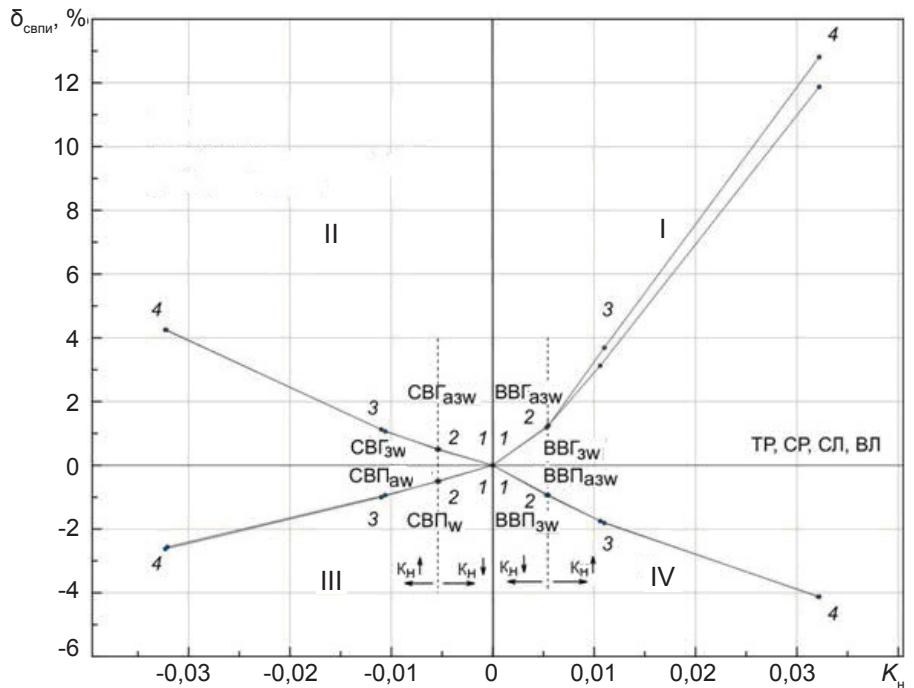


Рис. 1. Зависимости погрешностей линейной СВПИ от  $K_n$ ;  $\lambda_2 = 0,8$  мкм;  $\Delta\lambda = 0,3$  мкм;  $K_k$  от  $-178833$  до  $178833$  м $^{-1}$ ;  $\varepsilon = 0,3588 - 0,4661$

и разность между ними для экспериментальных и аппроксимированных распределений излучательной способности. Кроме того, расхождения также определяются приведенными в табл. 1 разностями излучательной способности  $\Delta = \varepsilon_3 - \varepsilon_a$  на  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  для экспериментальных и аппроксимированных распределений при различных  $K_n$ , то есть в точках 1-4.

Таблица 1

### Разности излучательных способностей для различных распределений СВПИ

Спектральные распределения $\varepsilon$	$\Delta = \varepsilon_3 - \varepsilon_a$		
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
СВП	-0,0004	0,0002	0,0002
СВГ	0,1072	-0,0108	-0,1071
ВВП	-0,1071	0,0108	0,1072
ВВГ	0,0002	-0,0002	-0,0004

При предложенном количественном определении  $K_n$  зависимости  $\delta_{свпи} = f(K_n)$  для СВП-, СВГ-, ВВП- и ВВГ-распределений находятся соответственно в III, II, IV и I квадрантах. В зависимости от распределений погрешности имеют систематический характер. Для СВП- и ВВП-распределений погрешности отрицательны; для СВГ- и ВВГ-распределений они положительны. Для TR-, CP-, SL- и VL-распределений  $K_n = 0$ , поэтому погрешности СВПИ в этих случаях не зависят от  $K_n$  и также равны нулю.

Наиболее существенная зависимость погрешностей линейной СВПИ от основной количественной характеристики распределений  $K_n$  вполне естественна и закономерна. На погрешности значительно влияет также спектральное распределение излучательной способности. Для ВВГ-распределений получены максимальные погрешности, которые уменьшаются для СВГ-, ВВП- и СВП-распределений. Причем погрешности для СВГ- и ВВП-распределений занимают промежуточное значение между погрешностями СВП- и

ВВГ-распределений и в зависимости от  $K_n$  могут быть равны или находиться выше или ниже относительно друг друга. Например, при  $K_n = 0$  (т. 1)  $\delta_{\text{СВГ}} = \delta_{\text{ВВП}}$ ; при  $|K_n| = 0,0053$  (т. 2)  $\delta_{\text{СВГ}} < \delta_{\text{ВВП}}$ ; если  $|K_n| = 0,0106$  (т. 3), то  $\delta_{\text{СВГ}} < \delta_{\text{ВВП}}$ , а при  $|K_n| = 0,0322$  (т. 4)  $\delta_{\text{СВГ}} > \delta_{\text{ВВП}}$ . Такая закономерность определяется изменением количества рабочих длин волн СВПИ в области высоких и низких значений излучательной способности с изменением характера ее распределений по спектру и  $K_n$ . Погрешности измерений используемых в СВПИ одноцветных температур излучения  $S_1, S_2$  и  $S_3$  снижаются при повышении излучательной способности, и наоборот. Поэтому чем больше длин волн находится в области низких значений излучательной способности, тем выше погрешности СВПИ. В случае СВП- и ВВП-распределений в области низких значений излучательной способности находится только  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$ , а СВГ- и ВВГ-распределений – соответственно  $\lambda_2, \lambda_3$  и  $\lambda_1, \lambda_2$ .

Погрешности измерений  $S_n$ , кроме излучательной способности, определяются также длинами волн  $\lambda_n$  в соответствии с полученным из закона Вина пирометрическим уравнением

$$1/T - 1/S_n = (\lambda_n / c_2) \ln \varepsilon_n,$$

где  $T$  – температура металлического сплава, К;  $S_n$  – температура излучения металлического сплава на длине волны  $\lambda_n$ ;  $\lambda_n$  – эффективная длина рабочей волны СВПИ, м;  $c_2 = hc/k = 0,014388$  К·м – вторая постоянная Планка, в которой  $h = 6,62619 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $c = 299792458$  м/с – скорость света в вакууме;  $k = 1,380662(44) \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $\varepsilon_n$  – излучательная способность металлического сплава на рабочей длине волны  $\lambda_n$ .

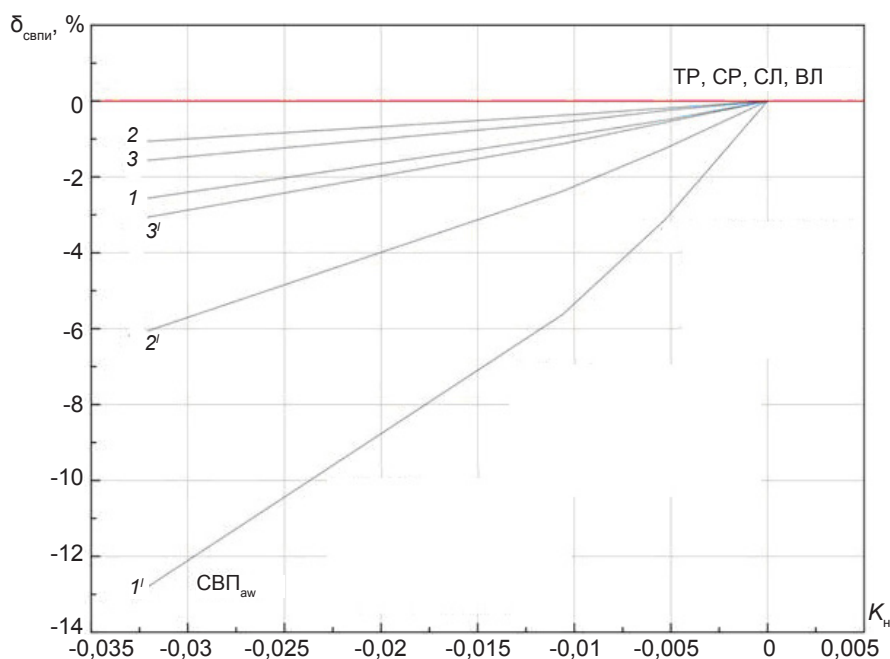
$\lambda_3 > \lambda_1$  поэтому  $\delta_{\text{ВВП}} > \delta_{\text{СВГ}}$ . Тем не менее, доминирующей в СВПИ для представленных наиболее типичных распределений  $\varepsilon$  является излучательная способность, но только при определенном влиянии длины волны, поэтому  $\delta_{\text{ВВП}} > \delta_{\text{СВП}}$ .

Для нецветных металлов и их сплавов, а также в большинстве случаев для оксидов, карбидов, боридов, нитридов, силицидов и других материалов наиболее характерным является СВП-распределение излучательной способности в ближней и видимой инфракрасной областях спектра [8]. Излучательная способность цветных металлов и их сплавов в видимой области спектра также описывается СВП-распределением, обеспечивающим минимальные погрешности линейной СВПИ. Например, погрешности СВПИ вольфрама при  $K_n = -0,0053$  (т. 2) не превышают 0,5 %. С увеличением коэффициента нелинейности в два раза (до  $-0,0106$ ; т. 3) погрешность возрастает практически в два раза (до 1 %). Для  $K_n = -0,0323$  (т. 4) погрешность возрастает до 2,7 %. Примечатель-

но, что при этих же значениях  $K_n$  погрешности СВПИ для СВГ, ВВП- и ВВГ-распределений соответственно составляют 0,5, 1,1, 4,3; 0,9, 1,7, 4,1 и 1,3, 3,0, 12,8 %. Полученные количественные оценки погрешностей наглядно иллюстрируют преимущества в оптической термометрии линейной СВПИ металлов, их сплавов и других материалов.  $K_n$  является основной количественной характеристикой линейной СВПИ. Поэтому при  $K_n = 0$  (т. 1), то есть для ТР-, СР-, СЛ- и ВЛ-распределений  $\delta_{\text{СВПИ}} = 0$ .

Для оптимизации линейной симметрично-волновой пирометрии излучения и практического ее применения необходимо изучить влияние  $K_n$  в возможных диапазонах изменений остальных оптических характеристик СВПИ, то есть  $\Delta\lambda, \lambda_2, K_k$  и  $\Delta\varepsilon$ . На рис. 2 представлены закономерности влияния  $K_n$  на погрешности СВПИ при исследованных граничных значениях  $\Delta\lambda, \lambda_2$  и  $\Delta\varepsilon$  для наиболее распространенного СВП<sub>ав</sub>-распределения излучательной способности.

Анализ полученных закономерностей показывает доминирующее, качественно совпадающее для всех распределений, влияние  $K_n$  при любых значениях остальных оптических характеристик. С уменьшением  $K_n$  погрешности снижаются и равны нулю для линейных распределений ТР, СР, ВЛ и СЛ. Оптимизация оптических характеристик многоцветовой пирометрической системы  $\Delta\lambda$  и  $\lambda_2$  в исследованных интервалах их значений снижает погрешности СВПИ практически в шесть раз (кривые 1', 1 и 2', 2). С увеличением  $\Delta\lambda$  от 0,1 до 0,3 мкм и уменьшением  $\lambda_2$  от 1,1 до 0,6 мкм погрешности соответственно снижаются за счет повышения относительной линейности распределения излучательной способности и перехода в более линейный спектральный диапазон СВП<sub>ав</sub>-распределения. Относительная линейность определяется отношением длины хорды, стягивающей распределение излучательной способности в диапазоне  $\lambda_1$ - $\lambda_3$ , к  $K_n$ . По



**Рис. 2.** Зависимости погрешностей линейной СВПИ от  $K_n$  в исследованных диапазонах  $\Delta\lambda, I_2$  и  $\Delta\varepsilon$ . 1:  $\Delta\lambda = 0,3$  мкм,  $K_k = -178833$  м<sup>-1</sup>,  $\Delta I' = 0,1$  мкм,  $K_k' = -536500$  м<sup>-1</sup>,  $I_2 = 0,8$  мкм,  $\varepsilon = 0,3588-0,4661$ ; 2:  $I_2 = 0,6$  мкм,  $I_2' = 1,1$  мкм,  $\Delta\lambda = 0,3$  мкм,  $K_k = -178833$  м<sup>-1</sup>,  $\varepsilon = 0,3588-0,4661$ ; 3:  $\varepsilon = 0,7588-0,8661$ ; e' = 0,3588-0,4661;  $\Delta\lambda = 0,3$  мкм,  $I_2 = 0,8$  мкм,  $K_k = -178833$  м<sup>-1</sup>

**Погрешности линейной СВПИ для различных  $K_k$  (в пределах от 0 до  $-278833 \text{ м}^{-1}$ ) при  $\Delta\lambda = 0,3 \text{ мкм}$ ;  $l_2 = 0,8 \text{ мкм}$ ;  $K_n = 0,005343$ ;  $\Delta\epsilon = 0,3288 - 0,4961$ ;  $T = 1600 \text{ К}$**

$K_k, \text{ м}^{-1}$	Распределения $\epsilon$	Погрешности	
		$\Delta_{\text{СВПИ}} = T_{\text{СВПИ}} - T, \text{ К}$	$\delta_{\text{СВПИ}} = (T_{\text{СВПИ}} - T) / T \cdot 100, \%$
0	$\epsilon_1 = \epsilon_3 < \epsilon_2$	-10,1	-0,63
-17833	$\epsilon_1 = \epsilon_2 > \epsilon_3$	-9,4	-0,59
-78833	$\epsilon_1 = \epsilon_{1\text{СВПЛав} - 0,03} > \epsilon_2 > \epsilon_3$	-8,8	-0,55
-78946	$\epsilon_1 = \epsilon_{1\text{СВПЛав}} > \epsilon_2 > \epsilon_3$	-8,3	-0,52
-78833	$\epsilon_1 = \epsilon_{1\text{СВПЛав} + 0,03} > \epsilon_2 > \epsilon_3$	-7,8	-0,49

представленному выше определению  $\Delta\lambda$ , с ее увеличением возрастает относительная линейность спектральных распределений излучательной способности, в том числе СВП<sub>ав</sub>-распределения. С повышением излучательной способности в указанных на рис. 2 пределах (кривые 3', 3) погрешности СВПИ уменьшаются в 2 раза.

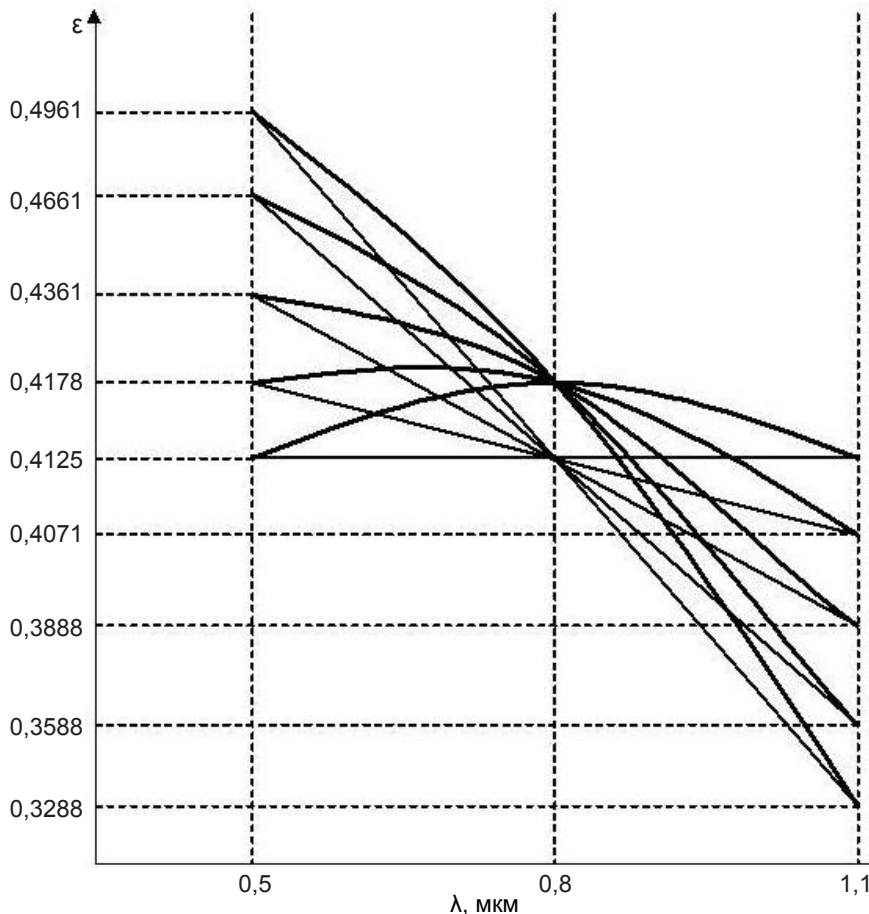
По определению  $K_k$ , его влияние на погрешности линейной СВПИ незначительно (представлено в табл. 2).

Полученные результаты показывают, что с увеличением  $K_k$  погрешности СВПИ снижаются от 10,1 до 7,8 К (от 0,63 до 0,49 %). Такое незначительное изменение погрешностей (2,3 К или 0,14 %) при столь существенном изменении  $K_k$  определяется прежде всего косвенным встречным влиянием излучательной способности и относительной линейности.

Из рис. 3 видно, что с увеличением  $K_k$  (кривые 1-5)  $\epsilon$  на граничных длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  повышается и понижается на одну и ту же величину. Влияние равных абсолютных изменений  $\epsilon$  в области высоких (на  $\lambda_1$ ) и низких (на  $\lambda_3$ ) значений доминирует на  $\lambda_3$ . Поэтому с увеличением  $K_k$  погрешности СВПИ возрастают за счет влияния  $\epsilon$ . Однако результирующим здесь является влияние относительной линейности, которая повышается с увеличением  $K_k$ . По определению  $K_k$ , его прямое влияние на погрешности СВПИ исключается. Приведенные в табл. 2 незначительные изменения  $\Delta_{\text{СВПИ}}$  и  $\delta_{\text{СВПИ}}$  обусловлены исключительно указанным косвенным влиянием относительной линейности и излучательной способности.

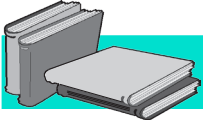
### Выводы

Таким образом, в результате представленных исследований установлено доминирующее воздействие спектральных распределений излучательной способности и их нелинейности на погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения металлических сплавов. Погрешности характерны для нецветных и цветных металлов и их сплавов спадающих выпуклых распределений излучательной способности соответственно в видимой и ближней инфракрасной, а также видимой областях спектра минимальны и не превышают 0,5 %. В исследованных условиях погрешности известных многоцветовых и классических методов превышают это значение в несколько раз. Для возрастающих вогнутых рас-



**Рис. 3.** Зависимости излучательной способности от длины волны для различных  $K_k$

пределений погрешности максимальны и при тех же нелинейностях достигают 1,3 %. В случаях линейных или близких к ним распределений погрешности равны или приближаются к нулю. Прямое воздействие коэффициента крутизны спектральных распределений излучательной способности отсутствует. Однако при этом установлено косвенное влияние этой характеристики через относительную линейность и излучательную способность, встречное воздействие которых вызывает незначительные, до 0,14 %, погрешности. Доказана перспективность линейной симметрично-волновой пирометрии излучения для термоконтроля металлов и их сплавов, а также в большинстве случаев для оксидов, карбидов, боридов, нитридов, силицидов и других материалов, имеющих спадающие выпуклые распределения излучательной способности.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Инновационные технологии многоцветовой термометрии // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львов. – 2012. – № 73. – С. 45-51.
2. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Новые технологии многоцветового бесконтактного и световодного термоконтроля металлических сплавов // Металл и литье Украины. – 2012. – № 9. – С. 29-35.
3. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Симметрично-волновая многоцветовая термометрия металлургических объектов с неизвестной и случайно изменяющейся излучательной способностью // Там же. – 2012. – № 11. – С. 36-40.
4. Снопко В. Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности. – Минск: Наука и техника, 1988. – С. 152.
5. Thomas L. K. J. Sci. Instr. – Ser. 2. – 1986. – V. 1. – P. 311.
6. Латыев Л. Н., Чеховской В. Я., Шестаков Е. Н. Теплофизика высоких температур. – 1969 – Т. 7. – С. 666.
7. Latyev L. N., Chekhovskoi V. Ya., Shestakov E. N. High Temp. – High Pressures. – 1970. – V. 2. – P. 175.
8. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под общ. ред. А. Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – С. 247.

### Анотація

Жуков Л. Ф., Корнієнко А. Л.

Дослідження впливу термометричних характеристик металевих сплавів на похибки багатокольорової лінійної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання

Досліджено вплив оптичних характеристик металевих сплавів на методичні похибки багатокольорової лінійної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання. Встановлено, що домінує та визначає метрологічні характеристики симетрично-хвильової пірометрії випромінювання нелінійність спектральних розподілів випромінювальної здатності сплавів при незначному впливі їхньої крутизни. Доведено перспективність симетрично-хвильової пірометрії для термоконтролю металевих сплавів і неметалевих матеріалів, що мають спадаючі опуклі розподіли випромінювальної здатності, похибки для яких не перевищують 0,5 % і можуть бути додатково знижені оптимізацією оптичних характеристик термометричних систем.

### Ключові слова

багатокольорова термометрія, симетрично-хвильова термометрія, температура випромінювання, температура об'єкту, випромінювальна здатність, спектральний розподіл випромінювальної здатності

### Summary

Zhukov L. F., Kornienko A. L.

Investigation of the influence of thermometric characteristics of metal alloys on the errors of multicolor linear symmetric-wave radiation pyrometry

The influence of the optical characteristics of metal alloys on methodological errors of multicolor linear symmetric-wave radiation pyrometry was investigated. It was found out that the dominant and determining the metrological characteristics of symmetric-wave radiation pyrometry is a nonlinear spectral distributions of emissivity alloys with little indirect influence of their steepness. The perspective of symmetrical wave pyrometer temperature control for metal alloys and non-metallic materials with the convex decaying distribution emissivity is proved. The errors that do not exceed 0,5 % may be further reduced by optimizing the optical characteristics of the heat-flow systems.

### Keywords

multicolor thermometry, symmetrical-wave thermometry, temperature of radiation, temperature of object, emissivity, spectral distribution of emissivity

Поступила 29.01.13