

В. Н. Кравченко. – К.: Вища шк, 1979. – 188 с. 7. Деклараційний пат. на винахід № 48480 А Україна, МПК F27B7/22. Вузол кріплення бандажа на корпусі обертового теплотехнічного агрегата [Текст] / П. І. Ванкевич, Ю. І. Боднар; заявник та власник пат. Львівський державний аграрний університет. – № 2001096132; заявл. 05.09.2001; опубл 15.08.2002, Бюл. № 8. – 2 с. 8. Ванкевич П. І. Обґрунтування конструктивних параметрів елементів опорного вузла обертового теплотехнічного агрегата [Текст] / П. І. Ванкевич, Л. О. Добрянська, І. О. Ніщенко, Ю. І. Боднар // Вісн. Львів. держ. аграр. ун-ту: “Архітектура і сільськогосподарське будівництво”. – 2005. – № 6. – С. 111–116. 9. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с. 10. Мак-Адамс В. Х. Теплопередача / В. Х. Мак-Адамс. – М.: Металлургиздат, 1961. – 400 с. 11. Коренев Б. Г. Задачи теории теплопроводности и термоупругости / Б. Г. Коренев. – М.: Наука, 1980. – 400 с. 12. Новиков Н. Н. Прикладная термодинамика и теплопередача / Н. Н. Новиков, К. Д. Воскресенский. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 548 с.

УДК 526.521.3

А.Л. Корниенко, Л.Ф. Жуков

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МНОГОЦВЕТОВОЙ ЛИНЕЙНОЙ СИММЕТРИЧНО-ВОЛНОВОЙ ТЕРМОМЕТРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

© Корниенко А.Л., Жуков Л.Ф., 2014

На основі вивчених і найпоширеніших для металів і їх сплавів випромінювальних характеристик вольфраму у видимій і ближній інфрачервоній областях спектра досліджено вплив похибок вихідних вимірювань температур випромінювання на інструментальні похибки багатокольорової лінійної симетрично-хвильової термометрії. Доведено, що на відміну від відомих методів багатокольорової пірометрії, випромінювання похибки симетрично-хвильової термометрії не перевищують похибки вихідних вимірювань. Для забезпечення симетрично-хвильової термометрії необхідно виключати селективне поглинання зареєстрованого на робочих довжинах хвиль теплового випромінювання супутніми і спеціальними проміжними середовищами.

**Ключові слова:** багатокольорова лінійна симетрично-хвильова термометрія, вихідна температура випромінювання, похибка вимірювань, інструментальна та методична похибки, спектральні розподіли випромінювальної здатності металів та їх сплавів.

On the basis of the most studied and representative emission characteristics of tungsten for metals and their alloys in the visible and near-infrared regions of the spectrum, the effect of errors in the initial measurement of the radiation temperature in the instrument errors of multicolor linear symmetrical wave thermometry is investigated. It is proved that unlike the known methods of radiation pyrometry, the errors of multicolor wave symmetrical thermometry do not exceed the initial measurement error. To ensure symmetrical wave thermometry it is necessary to exclude the selective absorption recorded at the operating wavelength of thermal radiation related to intermediate and special environments.

**Key words:** multicolor linear symmetrical wave thermometry, the initial temperature of the radiation measurement error, instrumental and methodological errors, the spectral distribution of the emissivity of metals and their alloys.

Известно, что погрешности измерений температуры классическими энергетическими и спектрального отношения методами пирометрии излучения в основном определяются методическими составляющими. По уровню инструментальных метрологических характеристик совре-

менная классическая оптическая термометрия не уступает, например, термоэлектрическим измерениям температуры, а во многих случаях даже значительно превосходит их и поэтому используется для эталонных измерений и построения температурных шкал. Переход от классической к многоцветовой пирометрии излучения позволяет существенно уменьшить методические погрешности и в этом основной смысл такого перехода [1–5]. Однако, обычно снижение методических погрешностей многоцветовой пирометрии излучения достигается при явном ухудшении ее инструментальных составляющих [4]. Это, как правило, предъявляет высокие требования к метрологическим характеристикам получения первичной пирометрической информации, в том числе к точности измерений исходных одноцветовых температур излучения. В некоторых известных многоцветовых методах погрешности таких измерений должны быть на порядок ниже допусаемых погрешностей термоконтроля [5]. Инструментальная составляющая погрешностей многоцветовой пирометрии излучения определяется количеством рабочих волн. Чем меньше это количество, тем ниже инструментальные погрешности. Каждый метод многоцветовой пирометрии излучения имеют свою связь его метрологических характеристик с количеством рабочих волн и погрешностями измерений одноцветовых температур на них. Чем слабее эта связь, тем совершеннее метод. Именно с учетом этого в многоцветовой симметрично-волновой пирометрии излучения (СВПИ) наиболее рационально использовать три минимально возможные рабочие волны  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Однако вопрос влияния погрешностей измерений исходных трех одноцветовых температур на метрологические характеристики многоцветовой СВПИ остается и для практического ее использования должен быть изучен.

Одноцветовые температуры излучения  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  являются первичной пирометрической информацией для СВПИ. Погрешность измерений этих температур ( $\delta_{\text{ИЗМ}}$ ) определяется выражением

$$\delta_{\text{ИЗМ}} = \delta_{\text{ИНС}} + \delta_{\text{МЕТ}},$$

где  $\delta_{\text{ИНС}}$  – инструментальная составляющая  $\delta_{\text{ИЗМ}}$ ;  $\delta_{\text{МЕТ}}$  – методическая составляющая  $\delta_{\text{ИЗМ}}$ .

В нашем случае  $\delta_{\text{МЕТ}} = 0$  и  $\delta_{\text{ИЗМ}} = \delta_{\text{ИНС}}$ . Следовательно здесь целесообразно говорить только об инструментальных погрешностях измерений этих исходных температур, которые, в свою очередь, определяют инструментальные погрешности СВПИ. Как было отмечено, инструментальные метрологические характеристики современной энергетической одноцветовой пирометрии сопоставимы или даже превышают характеристики термоэлектрической термометрии. Поэтому для исследований инструментальных погрешностей многоцветовой СВПИ были использованы значения относительных погрешностей для температур излучения 0,2; 0,5 и 1,0 %. Указанные погрешности со значительным запасом перекрывают реальные погрешности измерений  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ .

Полученное нами для многоцветовой линейной СВПИ равенство (1) связывает измеряемые  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  с искомой  $T$ :

$$\frac{I_2}{c_2} \ln \left( \frac{e - \frac{c_2(T - S_1)}{T I_1 S_1} + e - \frac{c_2(T - S_3)}{T I_3 S_3}}{2} \right) - \frac{1}{T} + \frac{1}{S_2} = 0, \quad (1)$$

где  $T$  – температура термометрируемого объекта, в нашем случае металлического сплава, К;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – температуры излучения металлического сплава, К;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  – эффективные длины рабочих волн многоцветовой термометрической системы 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;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  – излучательная способность металлического сплава на рабочих длинах волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ .

Для получения выражения, связывающего инструментальную погрешность СВПИ с инструментальными погрешностями для  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ , необходимо соответствующим образом продифференцировать равенство (1) [4]. После такого дифференцирования получается сложное

выражение, которое не решается аналитически относительно погрешности для  $T$ . Численное решение этого громоздкого выражения требует значительного объема вычислений. Поэтому исследования были выполнены на основе численного решения более простого равенства (1) для СЛав-, СВПав- и ВВГазw-распределений излучательной способности,

где СЛав – спадающее линеаризованное аппроксимированное вольфрама;

СВПав – спадающее выпуклое аппроксимированное вольфрама;

ВВГазw – возрастающее вогнутое аппроксимированное зеркально отраженное вольфрама.

Для СВПав-распределения было использовано экспериментально изученное в работе [6] спектральное распределение излучательной способности вольфрама, аппроксимированное полиномом шестой степени [3]. Предложенная аппроксимация исключает значительную часть (до 0,3 %) случайной погрешности из результатов использованных экспериментальных исследований. За ВВГазw-распределение было принято соответствующее зеркально отраженное СВПав-распределение. В этом случае ВВГазw-распределение описывается полиномом шестой степени с другими коэффициентами [3].

СЛав-распределение было получено линеаризацией в спектральном диапазоне от  $\lambda_1$  до  $\lambda_3$  СВПав-распределения, при которой:

$$- \varepsilon_{1\text{СЛав}} = \varepsilon_{1\text{СВПав}};$$

$$- \varepsilon_{2\text{СЛав}} < \varepsilon_{2\text{СВПав}};$$

$$- \varepsilon_{3\text{СЛав}} = \varepsilon_{3\text{СВПав}}.$$

Здесь, прежде всего интересным является “чистое”, без методической составляющей, влияние инструментальных погрешностей измерений  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ . В предыдущих работах нами было доказано, что методические погрешности линейной СВПИ для всех линейных распределений излучательной способности, в том числе и для СЛав-распределения, равны нулю [1–3]. Поэтому на этом распределении можно продемонстрировать “чистые” зависимости для инструментальных погрешностей СВПИ ( $\delta_{\text{инс}}$ ).

На рис. 1, а, б представлены установленные закономерности этого влияния для указанных выше значений погрешностей измерений  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  ( $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ ) и восьми различных возможных их распределений по  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Возможные распределения погрешностей  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Возможные распределения погрешностей

Температуры излучения	Распределения погрешностей $\delta_{S_1, S_2, S_3}$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
S1	+	-	+	-	-	+	-	+
S2	+	-	+	-	+	-	+	-
S3	+	-	-	+	+	-	-	+

Знак “+” соответствует превышению измеренных значений  $S$  над их реальными значениями, а “-” - их обратному соотношению. Число возможных распределений  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  определяется количеством сочетаний из 2 по 3 и равно восьми.

Анализ установленных закономерностей показывает, что погрешности для первого и второго распределений  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  минимальны и практически одинаковы, например, для  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  равных 0,2; 0,5 и 1,0 %  $\delta_{\text{инс}}$  соответственно равны 0,20; 0,50 и 0,99 % (рис. 1, б). Объясняется это тем, что одинаковые знаки и количественные оценки погрешностей  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ , особенно в области их малых значений, эквивалентны одностороннему неселективному изменению  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , при котором сохраняется практически нулевое значение коэффициента нелинейности (Кн) спектрального распределения излучательной способности по  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Вполне естественно и объяснимо, что с увеличением  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  возрастают  $\delta_{\text{инс}}$  за счет повышения Кн. Примечательным и положительным здесь является то, что, в отличие от известных методов многоцветовой пирометрии излучения,  $\delta_{\text{инс}}$

СВПИ количественно определяются  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ , т.е. практически, особенно для малых  $\delta_{S_1, S_2, S_3} < 1\%$ ,  $\delta_{\text{инс}} \approx \delta_{S_1, S_2, S_3}$ . При дальнейшем увеличении  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ ,  $\delta_{\text{инс}} < \delta_{S_1, S_2, S_3}$ , например, для  $\delta_{S_1, S_2, S_3} = 1\%$ ,  $\delta_{\text{инс}} = 0,99\%$ . Максимальные значения  $\delta_{\text{инс}}$  принимают для седьмого и восьмого распределений  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ , т.е. “- + -” и “+ - +”. Это объясняется тем, что указанные распределения  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  эквивалентны максимально возможным значениям Кн. В соответствии с величинами Кн,  $\delta_{\text{инс}}$  для остальных распределений  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  (3, 4, 5 и 6) занимают промежуточные значения между рассмотренными максимальными и минимальными погрешностями (рис. 1, а). Следует отметить, что реальные условия СВПИ металлических сплавов характеризуются первым и вторым распределениями  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ . Для более удобного анализа и количественной оценки установленные зависимости  $\delta_{\text{инс}} = f(\delta_{S_1, S_2, S_3})$  представлены в соответствующем масштабе на рис. 1, б.

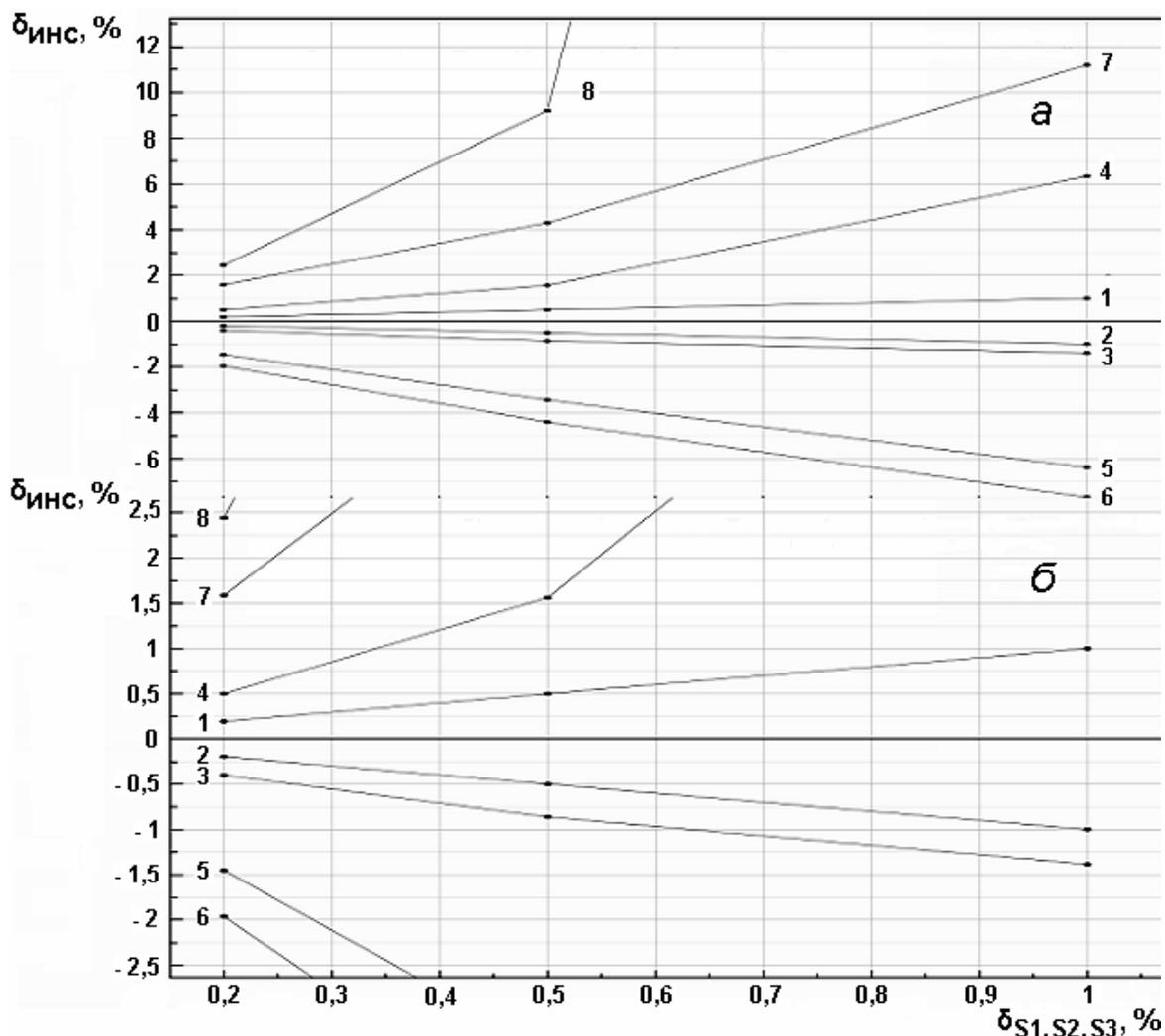


Рис. 1. Зависимости инструментальных погрешностей многоцветовой линейной СВПИ от погрешностей измерений  $S_1, S_2$  и  $S_3$  для СЛав-распределения (а; б)

Под воздействием методической составляющей СВПИ влияние  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  на  $\delta_{\text{инс}}$  для реальных, как правило, нелинейных распределений излучательной способности металлических сплавов будет отличаться от приведенных на рис. 1, а, б зависимостей. Методическая составляющая обусловлена отклонением реальных распределений  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  металлических сплавов от рассмотренного выше СЛав-распределения. На рис. 2, а, б показаны установленные закономерности влияния  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  на  $\delta_{\text{изм}}$  для СВПав-распределения, при котором  $\varepsilon_{1\text{СЛав}} = \varepsilon_{1\text{СВПав}}$ ,  $\varepsilon_{2\text{СЛав}} < \varepsilon_{2\text{СВПав}}$  и  $\varepsilon_{3\text{СЛав}} = \varepsilon_{3\text{СВПав}}$ . Представленные зависимости кроме  $\delta_{\text{инс}}$  включают также методическую составляющую ( $\delta_{\text{мет}}$ ), обусловленную нелинейностью СВПав-распределения излучательной способности вольфрама.

Методические погрешности СВПИ вольфрама с СВПав-распределением излучательной способности изучены, количественно оценены нами в [1–3] и использованы здесь для расчета  $\delta_{\text{инс}} = \delta_{\text{изм}} - \delta_{\text{мет}}$ . Полученные таким путем зависимости  $\delta_{\text{инс}} = f(\delta_{S1,S2,S3})$  обозначены пунктиром и приведены на рис. 2, б.

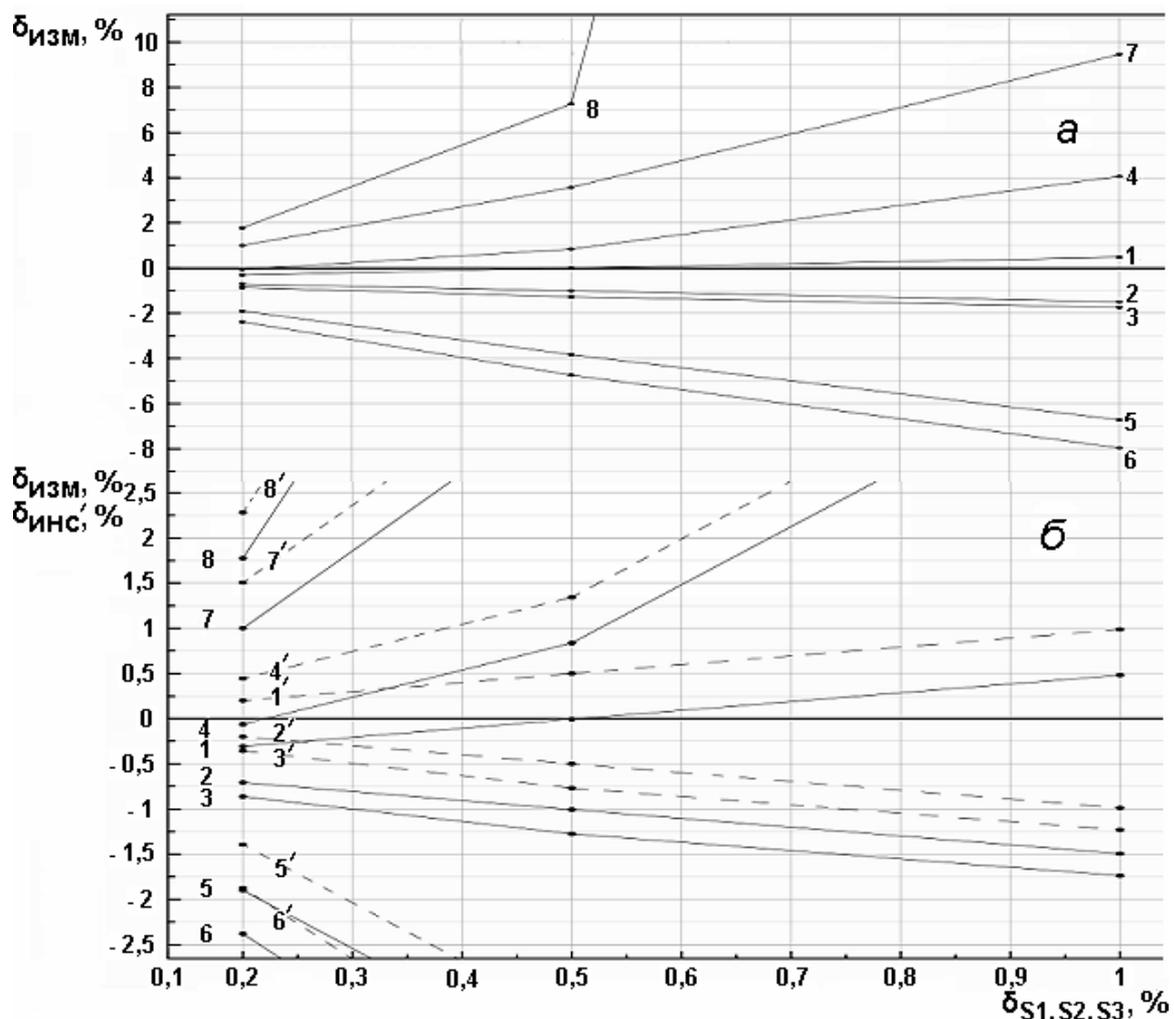


Рис. 2. Зависимости погрешностей линейной СВПИ от погрешностей  $S1, S2$  и  $S3$  для СВПав-распределения (а; б)

Изучение полученных закономерностей показывает, что распределения  $\delta_{\text{изм}}$  в системе координат “ $\delta_{S1,S2,S3} - \delta_{\text{изм}}$ ” качественно совпадают с зависимостями  $\delta_{\text{инс}} = f(\delta_{S1,S2,S3})$  на рис. 1, а, б, но количественно, за счет влияния  $\delta_{\text{мет}}$ , отличаются. Минимальные погрешности, также, как и в первом случае, имеют место для распределений 1 и 2 погрешностей  $\delta_{S1,S2,S3}$ , максимальные – 7, 8 и промежуточные – 3, 4, 5 и 6. Погрешности  $\delta_{\text{изм}}$  для первого и второго распределений  $\delta_{S1,S2,S3}$  (табл. 1), равных 0,2; 0,5 и 1,0 %, составляют соответственно -0,30; -0,01; 0,48 и -0,70; -1,01; 1,49 %. Сравнение этих результатов с погрешностями для СЛав-распределения показывает, что, под воздействием  $\delta_{\text{мет}}$ ,  $\delta_{\text{изм}}$  может быть как больше, так и меньше  $\delta_{\text{инс}}$ . Это происходит за счет суммирования и взаимной компенсации погрешностей. После исключения методической составляющей обозначенные пунктиром на рис. 2, б зависимости  $\delta'_{\text{инс}} = f(\delta_{S1,S2,S3})$  качественно совпадают с установленными закономерностями для СЛав-распределения. Однако, за счет нелинейности СВПав-распределения наблюдаются незначительные до 0,02 % количественные отклонения.

Установленные закономерности влияния  $\delta_{S1,S2,S3}$  на  $\delta_{\text{изм}}$  гипотетического для металлических сплавов ВВГазw-распределения представлены на рис. 3.

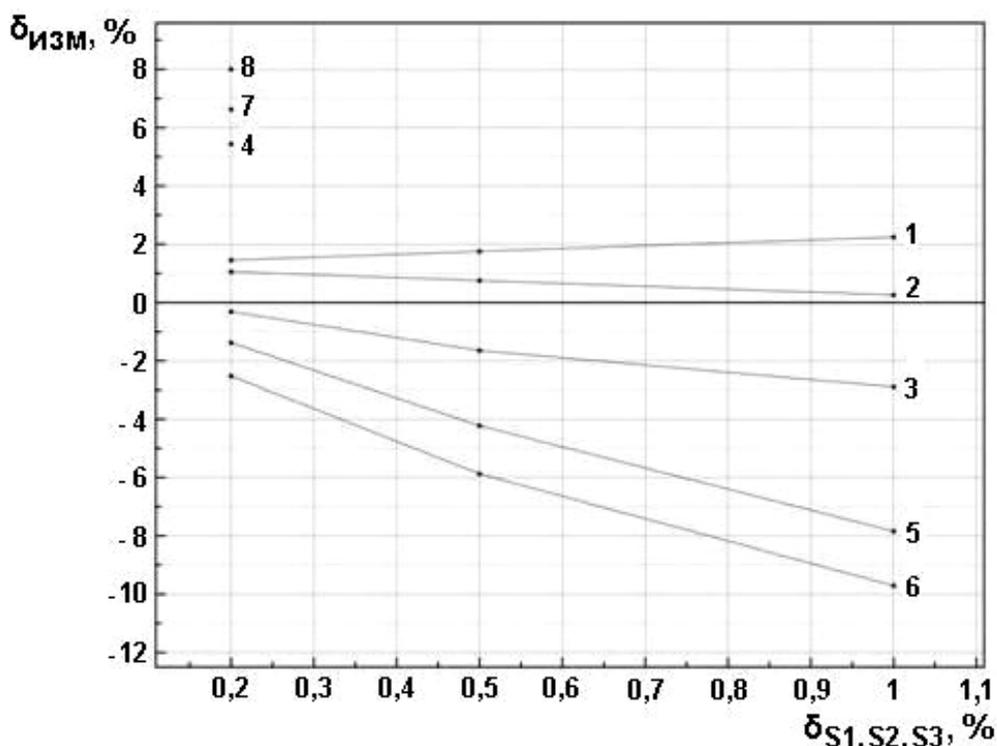


Рис. 3. Зависимости погрешностей измерений линейной СВПИ от погрешностей измерений S1, S2 и S3 для ВВГазв-распределения.

Установленные закономерности показывают значительно более высокий уровень погрешностей измерений по сравнению с характерными для металлических сплавов СЛав- и СВПав-распределениями (рис. 1, а, б и рис. 2, а, б). Самыми интересными для объектов с ВВГ-распределениями излучательной способности являются зависимости для 1, 2 и 3 распределений  $\delta_{S1,S2,S3}$ . Здесь  $\delta_{ИЗМ}$  во многих случаях удовлетворяют требованиям, предъявляемые к техническим измерениям температуры, —  $\delta_{ИЗМ} < 2\%$ , а для распределения 2 —  $\delta_{ИЗМ} < 1\%$ . Такие количественные оценки зависимостей  $\delta_{ИЗМ} = f(\delta_{S1,S2,S3})$  получаются за счет рассмотренной выше взаимной компенсации инструментальных и методических погрешностей. Компенсация для распределения 2 (---) приводит даже к аномальному уменьшению  $\delta_{ИЗМ}$  при повышении  $\delta_{S1,S2,S3}$ . Объяснить такое аномальное влияние можно эквивалентным уменьшением Кн при повышении  $\delta_{S1,S2,S3}$  для ВВГазв-распределения излучательной способности. Для остальных распределений погрешностей  $\delta_{S1,S2,S3}$  (табл. 1)  $\delta_{ИЗМ}$ , за счет  $\delta_{ИНС}$ , принимает высокие значения, недопустимые для технических измерений температуры. Например, для 5 и 6 распределений  $\delta_{ИЗМ}$  равны 4,2; 5,9 и 7,8; 9,1 % для  $\delta_{S1,S2,S3}$  соответственно равных 0,5 и 1,0%. Для 4, 7 и 8 распределений  $\delta_{ИЗМ}$  соответственно равны 5,4; 6,6 и 8,0 % даже при  $\delta_{S1,S2,S3} = 0,2\%$ .

Наиболее приемлемые для технической реализации СВПИ кремниевые фотонные детекторы излучения обладают достаточной температурной и временной стабильностью и для термометрии металлических сплавов в промышленных условиях обеспечивают пирометрию их излучения в рабочем спектральном диапазоне от 0,5 до 1,1 мкм. При  $\lambda_2 = 0,8$  мкм и  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  или  $\Delta\lambda = \lambda_3 - \lambda_2$  параметр  $\Delta\lambda$  должен быть  $\leq 0,3$  мкм. С увеличением  $\Delta\lambda$  усиливается неравенство  $\delta_{S1} \neq \delta_{S2} \neq \delta_{S3}$ , в том числе за счет возможного различного пропускания сопутствующих и специальных промежуточных сред на длинах волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Поэтому для практического использования СВПИ определенный интерес представляют закономерности влияния  $\delta_{S1,S2,S3}$  на  $\delta_{ИЗМ}$  при  $\delta_{S1} \neq \delta_{S2} \neq \delta_{S3}$ . В табл. 2 приведены  $\delta_{ИЗМ}$  СВПИ в указанных там же условиях для первого распределения  $\delta_{S1,S2,S3}$  (табл. 1) при  $\delta_{S1} \neq \delta_{S2} \neq \delta_{S3}$ .

## Погрешности СВПИ

№ п/п	Погрешности СВПИ для СВПаw-распределения при $T = 1600\text{K}$ ; $\Delta\lambda=0,3$ мкм; $\lambda_2 = 0,8$ , мкм и различных $\delta_{S1}$ , $\delta_{S2}$ и $\delta_{S3}$					
	$\delta_{S1}$	$\delta_{S2}$	$\delta_{S3}$	Соотношения погрешностей $\delta_{S1}$ , $\delta_{S2}$ и $\delta_{S3}$	$T_{\text{ИЗМ}}$	$\delta_{\text{ИЗМ}}=((T_{\text{ИЗМ}}-T)/T)\times 100$ , %
1	0,2	0,2	0,2	$\delta_{S1}=\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1595,1	-0,31
2	0,2	0,2	0,5	$\delta_{S1}=\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1602,5	0,16
3	0,2	0,2	1,0	$\delta_{S1}=\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1617,4	1,09
4	0,2	0,5	0,2	$\delta_{S1}<\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1574,5	-1,59
5	0,2	1,0	0,2	$\delta_{S1}<\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1545,4	-3,41
6	0,2	0,5	0,5	$\delta_{S1}<\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1580,5	-1,22
7	0,2	1,0	1,0	$\delta_{S1}<\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1558,1	-2,62
8	0,2	0,5	1,0	$\delta_{S1}<\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1592,1	-0,49
9	0,2	1,0	0,5	$\delta_{S1}<\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1549,9	-3,13
10	0,5	0,5	0,5	$\delta_{S1}=\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1599,9	-0,01
11	0,5	1,0	1,0	$\delta_{S1}<\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1576	-1,50
12	0,5	0,2	0,2	$\delta_{S1}>\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1615,3	0,96
13	0,5	0,2	1,0	$\delta_{S1}>\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1641,5	2,59
14	0,5	0,5	0,2	$\delta_{S1}=\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1593,1	-0,43
15	0,5	0,5	1,0	$\delta_{S1}=\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1613	0,81
16	0,5	0,2	0,5	$\delta_{S1}>\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1624	1,50
17	0,5	1,0	0,5	$\delta_{S1}<\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1566,9	-2,07
18	0,5	1,0	0,2	$\delta_{S1}<\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1562	-2,38
19	1,0	1,0	1,0	$\delta_{S1}=\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1607,7	0,48
20	1,0	0,5	0,5	$\delta_{S1}>\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1634,3	2,14
21	1,0	1,0	0,2	$\delta_{S1}=\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1591,1	-0,56
22	1,0	1,0	0,5	$\delta_{S1}=\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1596,8	-0,20
23	1,0	0,2	1,0	$\delta_{S1}>\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1687,7	5,48
24	1,0	0,5	1,0	$\delta_{S1}>\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1651,1	3,19
25	1,0	0,2	0,2	$\delta_{S1}>\delta_{S2}=\delta_{S3}$	1652,1	3,26
26	1,0	0,2	0,5	$\delta_{S1}>\delta_{S2}<\delta_{S3}$	1663,5	3,97
27	1,0	0,5	0,2	$\delta_{S1}>\delta_{S2}>\delta_{S3}$	1626	1,63

Полученные и приведенные в табл. 2 результаты исследований показывают, что с повышением абсолютной разности между  $\delta_{S1}$ ,  $\delta_{S2}$  и  $\delta_{S3}$  (№пп 14, 21, 4, 20) на определенных длинах волн  $\delta_{\text{ИЗМ}}$  СВПИ, за счет суммирования  $\delta_{\text{ИНС}}$  и  $\delta_{\text{МЕТ}}$ , возрастают и соответственно составляют 1,50; 3,19; 3,41; 5,48 %. Объяснить это можно соответствующим в этом случае возрастанием  $K_n$ . Минимальные  $\delta_{\text{ИЗМ}}$  СВПИ имеют место для №пп 10, 2, 22, 19, 8, 21 и 15. Здесь уменьшение  $\delta_{\text{ИЗМ}}$  СВПИ происходит за счет взаимной компенсации  $\delta_{\text{ИНС}}$  и  $\delta_{\text{МЕТ}}$ . Для СВПИ примечательно то, что такая компенсация не является редкостью и наблюдается в 7 случаях из 27 возможных. Равенство  $\delta_{S1,S2,S3}$  эквивалентно неселективному изменению  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_3$ , обеспечивающему практически неизменный  $K_n$  и минимально возможный, представленный на рис. 2, уровень погрешностей СВПИ. При  $\Delta\lambda \leq 0,3$  мкм в реальных условиях металлургии  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_3$  изменяются неселективно из-за близких по значению  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Поэтому для промышленного использования линейной СВПИ необходимо прежде всего исключать неселективное поглощение теплового излучения. Это достигается при настройке

многоцветовой пирометрической системы соответствующим выбором ее рабочих длин волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  и использованием продуваемых фурм для удаления селективных поглотителей из сопутствующей промежуточной среды. Интересным также является то, что  $\delta_{изм}$  принимают знак “-” (№пп 4, 5, 9, 17, 18) и “+” (№пп 13, 16, 23, 24, 26) соответственно для экстремальных выпуклых и вогнутых распределений количественных оценок  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ . Это объясняется следующим соотношением погрешностей соответственно для первого и второго случая:

$$- \delta_{S_1} = \delta_{S_3} < \delta_{S_2};$$

$$- \delta_{S_1} = \delta_{S_3} > \delta_{S_2}.$$

Интересным для теории и практики многоцветовой линейной симметрично волновой пирометрии излучения является влияние количественных оценок  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  в широком диапазоне, а также их распределений на  $\delta_{изм}$  и  $\delta_{инс}$  СВПИ для возможных распределений излучательной способности. В табл. 3 указаны условия и результаты этих исследований для СВПаw-, ВВПазw-, СВГазw- и ВВГазw-распределений излучательной способности, где ВВПазw – возрастающее выпуклое аппроксимированное зеркально отраженное вольфрама; СВГазw – спадающее вогнутое аппроксимированное зеркально отраженное вольфрама.

Таблица 3

### Результаты исследований

$\delta_{изм}$ и $\delta_{инс}$ многоцветовой линейной СВПИ при $T = 1600K$ ; $\Delta\lambda = 0,3$ мкм; $\lambda_2 = 0,8$ , мкм для аппроксимированных и производных зеркальных распределений излучательной способности вольфрама													
$\delta_{S_1, S_2, S_3}, \%$	распределения количественных оценок $\delta_{S_1, S_2, S_3}$	спектральные распределения излучательной способности											
		СВПаw			ВВГазw			ВВПазw			СВГазw		
		$T_{изм}, K$	$\delta_{изм}^{\text{в}} = ((T_{изм}^{\text{в}} - T)/T) \times 100, \%$	$\delta_{инс}^{\text{в}} = \delta_{изм}^{\text{в}} - \delta_{мет}, \%$	$T_{изм}, K$	$\delta_{изм}^{\text{в}} = ((T_{изм}^{\text{в}} - T)/T) \times 100, \%$	$\delta_{инс}^{\text{в}} = \delta_{изм}^{\text{в}} - \delta_{мет}, \%$	$T_{изм}, K$	$\delta_{изм}^{\text{в}} = ((T_{изм}^{\text{в}} - T)/T) \times 100, \%$	$\delta_{инс}^{\text{в}} = \delta_{изм}^{\text{в}} - \delta_{мет}, \%$	$T_{изм}, K$	$\delta_{изм}^{\text{в}} = ((T_{изм}^{\text{в}} - T)/T) \times 100, \%$	$\delta_{инс}^{\text{в}} = \delta_{изм}^{\text{в}} - \delta_{мет}, \%$
0,2	+++	1595,1	-0,31	0,2	1623,3	1,46	0,2	1587,8	-0,76	0,2	1611,9	0,74	0,2
0,2	---	1588,7	-0,71	-0,2	1616,9	1,06	-0,2	1581,4	-1,16	-0,2	1605,5	0,34	-0,2
0,5	+++	1599,9	-0,01	0,5	1628,1	1,76	0,5	1592,6	-0,46	0,5	1616,7	1,04	0,5
0,5	---	1583,9	-1,01	-0,5	1612,1	0,76	-0,5	1576,6	-1,46	-0,5	1600,7	0,04	-0,5
1	+++	1607,7	0,48	0,99	1635,9	2,24	0,99	1600,3	0,02	0,98	1624,7	1,54	1
1	---	1576,1	-1,49	-0,99	1604,2	0,26	-0,99	1568,8	-1,95	-0,99	1592,7	-0,46	-1
1,5	+++	1615,6	0,98	1,48	1643,9	2,74	1,49	1608,3	0,52	1,48	1632,7	2,04	1,5
1,5	---	1568,2	1,99	-1,48	1596,4	-0,22	-1,48	1560,9	-2,44	-1,48	1584,7	-0,95	-1,49

Приведенные в табл. 3 результаты показывают влияние  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ , в диапазоне их значений от 0,2 до 1,5 %, с распределениями “+ + +” и “- - -”, на  $\delta_{изм}$  и  $\delta_{инс}$ . Здесь  $\delta_{инс}$  СВПИ для любых распределений излучательной способности практически определяются значениями  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$ . С увеличением погрешностей для  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$   $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  начинают заметно превышать  $\delta_{инс}$  и это определяет преимущества СВПИ перед известными методами многоцветовой пирометрии излучения. При этом знаки  $\delta_{инс}$  и  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  совпадают. Определяется это тем, что эти знаки эквивалентно определяют повышение или снижение излучательной способности. Согласованность знаков для  $\delta_{S_1, S_2, S_3}$  и  $\delta_{инс}$  подчеркивает физическую обоснованность многоцветовой СВПИ.  $\delta_{изм}$  могут быть как выше, так и ниже  $\delta_{инс}$ , за счет указанного выше суммирования или компенсации  $\delta_{мет}$  и  $\delta_{инс}$ . Погрешности  $\delta_{изм}$  принимают максимальные значения для выпуклых и вогнутых спектральных распределений излучательной способности соответственно при “- - -” и “+ + +” распределениях количественных

оценок  $\delta_{S1,S2,S3}$ . Эта закономерность объясняется более высокими значениями  $K_n$  в указанных условиях линейной СВПИ.

Таким образом, в результате представленных исследований установлены закономерности качественного и количественного влияния погрешностей измерений исходных одноцветовых температур излучения на инструментальные погрешности симметрично-волновой термометрии металлических сплавов. Установлено, что для наиболее характерных спадающих выпуклых распределений излучательной способности металлов и их сплавов в видимой и ближней инфракрасной областях спектра инструментальные погрешности симметрично-волновой термометрии в реальных условиях не превышают погрешности исходных измерений температур излучения. С увеличением погрешностей измерений исходных одноцветовых температур излучения инструментальные погрешности симметрично-волновой термометрии повышаются. Причем, минимальные инструментальные погрешности имеют место в случае наиболее характерных для условий металлургии, равных погрешностях измерений исходных одноцветовых температур излучения металлических сплавов. Кроме того, за счет компенсации методическими составляющими инструментальных погрешностей симметрично-волновой термометрии ее погрешности измерений существенно снижаются. Это определяет явные преимущества симметрично-волновой пирометрии излучения перед остальными известными методами многоцветовой термометрии. При использовании симметрично-волновой термометрии для бесконтактного и световодного термоконтроля металлов и их сплавов необходимо исключать селективное поглощение регистрируемого на рабочих длинах волн теплового электромагнитного излучения соответственно сопутствующими и специальными промежуточными средами.

1. Жуков Л.Ф., Корниенко А.Л. Симметрично-волновая многоцветовая термометрия металлургических объектов с неизвестной и случайно изменяющейся излучательной способностью. – МЛУ, 2012. – № 11. – С. 36–40. 2. Жуков Л.Ф., Корниенко А.Л. Исследование влияния термометрических характеристик металлических сплавов на погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения. – МЛУ, 2012. – № 11. – С. 21–26. 3. Жуков Л.Ф., Корниенко А.Л. Влияние спектральных характеристик систем пирометрии излучения на методические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой термометрии металлургических объектов. – МЛУ, 2012. – № 11. – С. 27–32. 4. Снопко В.Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности. – Минск: Наука и техника, 1988. – С. 152. 5. Поскачей А.А., Чарихов Л.А. Пирометрия объектов с изменяющимися излучательными характеристиками. – М.: Металлургия, 1978. – 200 с. 6. Латыев Л.Н., Чеховской В.Я., Шестаков Е.Н. Теплофизика высоких температур. – М.: Энергия, 1969.