

6. Рубцов Н. А., Тимофеев А. М., Савинова Н. А. Комбинированный теплообмен в полупрозрачных средах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003.

7. Petrov V. A., Titov V. E., Vorobyev A. Yu. Numerical Simulation of Concentrated Laser Radiation Heating of Refractory Oxides // High Temp-High Press. 1999. V. 31. P. 267—274.

8. Битюков В. К., Петров В. А., Смирнов И. В. Влияние плотности потока на формирование поля температуры в оксиде алюминия при его нагреве концентрированным лазерным излучением // ТВТ. 2009. Т. 47. № 4. С. 589—596.

9. Лингарт Ю. К., Петров В. А., Тихонова Н. А. Оптические свойства лейкосапфира при высоких температурах. I. Область полупрозрачности // ТВТ. 1982. Т. 20. № 5. С. 872—880.

10. Лингарт Ю. К., Петров В. А., Тихонова Н. А. Оптические свойства лейкосапфира при высоких температурах. II. Свойства монокристалла в области непрозрачности и свойства расплава // ТВТ. 1982. Т. 20. № 6. С. 1085—1092.

11. Petrov V. A. Abrupt Increase of the Absorption Coefficient of Alumina at Melting by Laser Radiation and Its Decrease at Solidification // Int. J. Thermophys. 2009. V. 30. P. 1938—1959.

12. Bityukov V. K., Petrov V. A. Absorption Coefficient of Molten Aluminum Oxide in Semitransparent Spectral Range // Appl. Phys. Research. 2013. V. 5. N. 1. P. 51—71.

Дата принятия 18.04.2014 г.

551.508:681.586

Погрешность градуировки термисторного измерителя температуры аэрологического радиозонда

А. С. БОРОВКОВ, В. Г. ЧУЙКО

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия,
e-mail: chuiko.vladislav@mail.ru

Представлен анализ погрешностей градуировки термисторных измерителей температуры аэрологических радиозондов. Установлено, что погрешность индивидуальной градуировочной характеристики — главный источник погрешности измерителя температуры. Показано, что при аппроксимации функции преобразования термистора аналитической функцией, применяемой для всех радиозондов, выпускаемых в России, погрешность измерителя температуры в десятки раз больше, чем случайная при градуировке.

Ключевые слова: аэрологический радиозонд, измеритель температуры, градуировка.

The analysis of calibration errors of the thermistor temperature meters used in the aerological radiosondes is presented. It was found that the calibration error is the main source of temperature meter error. It is shown that the meter error at the approximation of the thermistor conversion function the meter error is dozen of times higher than the random error of temperature measurement during calibration.

Key words: aerological radiosonde, temperature meter, calibration.

В настоящее время в России для аэрологического радиозондирования атмосферы используют информационные измерительные системы с тремя типами радиолокационных станций, характеристики которых в течение 1970—2005 гг. постепенно улучшались [1]. В то же время в термисторных измерителях температуры (ИТ) атмосферы аэрологических радиозондов (РЗ) до сих пор используют технические решения и конструкции, предложенные и исследованные еще в 1965—1980 гг. В зарубежных аэрологических РЗ погрешность ИТ в течение последних 30 лет снизилась в 3—4 раза. Международные сличения отечественных РЗ уже в 1996 г. показали, что в зондах типа МРЗ-3 погрешность термисторных ИТ, как средств прямых измерений температуры термометрического тела, в 3—4 раза больше, чем у лучших зарубежных РЗ [2]. Сравнение разброса показаний в ансамбле РЗ типа МРЗ-3 в указанных сличениях с разбросом результатов измерений у пяти лучших типов РЗ привело к предположению, что основной источник разброса погрешностей ИТ указанного типа — суммарная инструментальная

погрешность ΔT_T определения температуры термистора T_T . При анализе погрешностей ИТ ранее не учитывали доминирующую составляющую — суммарную погрешность градуировочной характеристики (ГХ), т. е. погрешность градуировки

ΔT_T^I , определяемую как погрешность действительного значения T_T , приписанную отметке шкалы средства измерений в результате градуировки. Вместо анализа погрешности ГХ рассматривали погрешность функции преобразования (ФП) ИТ, хотя результат измерения T_T рассчитывали именно по индивидуальной ГХ, являющейся функцией, обратной ФП, и представляющей зависимость T_T на входе термисторного ИТ от показаний $T_{ин}$ на его выходе. Анализ ΔT_T^I на основе модели, адекватно описывающей измерение T_T и метод градуировки, ранее не проводили. Однако он необходим и актуален, так как разработка нового поколения современных термисторных ИТ для российских аэрологических РЗ важна и неизбежна.

Задачи анализа, приведенного далее:

исследование зависимости ΔT_T^r от погрешностей средств измерений, метода, процедуры, условий градуировки измерительной схемы и термистора для всех типов РЗ, использующих измерительную схему с ФП в виде $Y = R_{01} (R_{02} + R_T)^{-1}$, и функцию, аппроксимирующую ФП термистора в виде $R_T = A \exp[B(T + C)^{-1}]$, где R_T — сопротивление термистора, Y — информационный параметр измерительной схемы, R_{01} , R_{02} — константы измерительной схемы, A , B , C — константы ФП термистора;

установление адекватности нормируемых требований к погрешностям измерений температуры ΔT^r и сопротивления δR^r , констант в ФП термистора и измерительной схемы [3, Прил. Л];

определение пределов допускаемой погрешности рабочих эталонов температуры и сопротивления, необходимых для достижения погрешностей констант в ФП термистора, заданных в [4, С. 48].

С конца 1970-х гг. до настоящего времени различные организации разработали более десяти типов аэрологических РЗ с аналоговыми ИТ, в которых применены одни и те же измерительная схема, аппроксимирующая ФП и методика градуировки. Основные исходные положения данного анализа идентичны для ИТ всех серийно выпускаемых в России РЗ, разработанных после 1982 г. Модель, объединяющая метод, методику, алгоритм измерения T_T в РЗ, включает операции, представленные на рис. 1:

кодирование T_T сопротивления термистора $R_T (T_T)$; кодирование R_T отношением частот последовательности видеоимпульсов, которое является информационным параметром сигнала Y_T ;

формирование радиосигнала модуляцией несущей частоты передатчика РЗ видеоимпульсной последовательностью и передача радиосигнала, содержащего сообщение — значение Y_T ;

прием и демодуляция радиосигнала в радиолокационной станции и измерение Y_T с результатом Y_{Ti} ;

декодирование и определение $R_T(Y_{Ti})$, $T_{Ti}(R_T)$ по ГХ в виде функций

$$R_T = Y_T^{-1} R_{01} - R_{02}; \quad (1)$$

$$T_T = B (\ln R_T / A)^{-1} - C, \quad (2)$$

для которых значения констант определяются изготовителем при градуировке ИТ совместными измерениями пар значений R_T , Y_T и T_T , R_T по двум отдельным методикам.

Для получения показаний ИТ, т. е. для нахождения T_{Ti} , достаточно принять в радиолокационной станции сформи-

рованное в полете и переданное от РЗ значение Y_T , определить показания Y_{Ti} , рассчитать показания T_{Ti} по ГХ:

$$T_{Ti} = B [\ln(R_{01} - Y_{Ti} R_{02}) - \ln A - \ln Y_{Ti}]^{-1} - C. \quad (3)$$

Погрешностью ИТ является $\Delta T_{Ti} = T_{Ti} - T_T$. Анализ ΔT_{Ti} выполнен на основе данных, содержащихся в нормативно-технической документации, для двух наиболее совершенных типов аэрологических РЗ, внесенных в Государственный реестр [5]. За расчетный предел суммарной погрешности ΔT_{Ti} принята композиция составляющих, обусловленных погрешностью δY_T ; погрешностями определения констант R_{01} , R_{02} , A , B , C в ГХ (1), (2) при градуировке ИТ изготовителем. Составляющими ΔT_{Ti} считаются частные дифференциалы ΔT_{Ti1} , ΔT_{Ti2} , ΔT_{Ti3} по аргументам правой части (3) при условии $R_{01} = R_{02}$ которое обычно выполняется в схеме ИТ:

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{Ti1} &= (T_T + C)^2 [(1 - Y_{Ti})B]^{-1} (\delta Y_T^2 + \delta Y_{Ti}^2)^{1/2}; \\ \Delta T_{Ti2} &= [(1 - Y_T)B]^{-1} (T_T + C)^2 (\delta R_{01} - \delta R_{02} Y_T^r); \\ \Delta T_{Ti3} (\Delta A) &= \Delta A_\Sigma (T + C)^2 (AB)^{-1}; \\ \Delta T_{Ti3} (\Delta B) &= \Delta B_\Sigma (T + C) B^{-1}; \Delta T_{Ti3} (\Delta C) = \Delta C_\Sigma \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где δY_T — инструментальная погрешность, возникающая при кодировании R_T и формировании радиосигнала, несущего значение Y_T ; δY_{Ti} — погрешность измерения приемником радиолокационной станции значения Y_T ; δR_{01} , δR_{02} , ΔA , ΔB , ΔC — суммарные погрешности измерения констант в ГХ (1), (2).

Значение ΔT_{Ti} рассчитывается по формуле

$$\Delta T_{Ti} = (\Delta T_{Ti1}^2 + \Delta T_{Ti2}^2 + \Delta T_{Ti3}^2)^{1/2}. \quad (5)$$

Здесь и далее все погрешности и их составляющие представлены как абсолютные значения средних квадратических отклонений (СКО) погрешностей средств измерений или абсолютных погрешностей измерений температуры, а также относительных — δR и δY .

Анализ ΔT_{Ti} содержит несколько этапов. На первом этапе получены формулы для расчета R_{01} , R_{02} , A , B , C по результатам градуировки, затем — формулы для нахождения погрешностей ΔA , ΔB , ΔC , δR_{01} , δR_{02} , δY_T , как полных дифференциалов формул для A , B , C , R_{01} , R_{02} , Y_T , в которых за дифференциалы аргументов приняты инструментальные погрешности средств измерений, использованных для градуировки измерительной схемы и термистора, т. е. ΔT^r , ΔR^r . На третьем этапе получены формулы для расчета погрешностей ΔA_s , ΔB_s , ΔC_s , δR_{01s} , δR_{02s} , вызванных систематическими ΔT_s^r , δR_s^r , и

для $\Delta \dot{A}$, $\Delta \dot{B}$, $\Delta \dot{C}$, $\delta \dot{R}_{01}^r$, $\delta \dot{R}_{02}^r$, обусловленных случайными $\Delta \dot{T}^r$,

$\delta \dot{R}^r$ погрешностями средств измерений, использованных для определения констант в ГХ (1), (2). На четвертом этапе исследованы отдельно зависимости $\Delta \dot{A}$, $\Delta \dot{B}$, $\Delta \dot{C}$, $\delta \dot{R}_{01}$, $\delta \dot{R}_{02}$ и ΔA_s , ΔB_s , ΔC_s , δR_{01s} , δR_{02s} от режимов, процедур измере-



Рис. 1 Алгоритм процедуры измерения T_T

ний и погрешностей средств измерений ΔT^r , δR^r , ΔT_s^r , δR_s^r при градуировке. На пятом этапе определены суммарные погрешности каждой константы в зависимости от композиции значений ΔT^r , ΔT_s^r , δR^r , δR_s^r . На шестом этапе определены по (5) $\Delta T_{и1}$ с применением (4), в которых использованы значения суммарных погрешностей констант, полученные на пятом этапе.

Расчеты $\Delta T_{и1}$ по (4) выполнены при $B = 3600\text{K}$, $C = 65\text{K}$, которые близки к типовым для термисторов ММТ-1 [4], К19 [6], Ерсос [7], в диапазоне температур $193\text{K} \leq T_{и1} \leq 323\text{K}$ при $5 \cdot 10^{-6} \leq \delta Y_T \leq 2 \cdot 10^{-4}$, $\delta Y_{и1} = 10 \delta Y_T$. Полученная зависимость $\Delta T_{и1}$ аппроксимируется с погрешностью меньшей $\pm 0,1 \Delta T_{и1}$ формулами

$$\Delta T_{и1} = \delta Y_T (8,1 T_{и1} - 1,4 \cdot 10^3) \text{ K при } 193\text{K} \leq T_{и1} \leq 273\text{K};$$

$$\Delta T_{и1} = \delta Y_T (49 T_{и1} - 12,5 \cdot 10^3) \text{ K при } 273\text{K} \leq T_{и1} \leq 323\text{K}. \quad (6)$$

Отметим, что для всех действующих систем зондирования значения δY_T для измерительных схем в РЗ и $\delta Y_{и1}$ для приемника не нормируются, хотя, как следует из (6), уже при $\delta Y_T = 10^{-5}$, $\delta Y_{и1} = 10^{-4}$, $\Delta T_{и1}(273\text{K}) \approx 0,15\text{K}$, $\Delta T_{и1}(323\text{K}) \approx 0,65\text{K}$.

Рассмотрим погрешности определения констант δR_{01} , δR_{02} и суммарной $\Delta T_{и2}$ при градуировке измерительной схемы в РЗ типа МРЗ-3АК2 [3, Прил. Л]. Формулы для расчета R_{01} , R_{02} получены решением двух уравнений вида (1), в которых R_{01} , R_{02} являются неизвестными, два значения R_T при градуировке заменены известными сопротивлениями эталонных резисторов R_1^r , R_2^r , а показания Y_{T1}^r , Y_{T2}^r определены по методике измерений Y_T^r частотомером как отношения частот:

$$R_{01} = \left[Y_{T1}^r Y_{T2}^r (R_2^r - R_1^r) \right] / (Y_{T1}^r - Y_{T2}^r);$$

$$R_{02} = (R_2^r Y_{T2}^r - R_1^r Y_{T1}^r) / (Y_{T1}^r - Y_{T2}^r).$$

Формулы для нахождения δR_{01} , δR_{02} не приведены ввиду их громоздкости. По результатам расчетов при $R_{01}^r = 4,3\text{кОм}$, $R_{02}^r = 62\text{кОм}$ для δY^r в диапазоне значений, установленных в [3, Прил. Л], $5 \cdot 10^{-6} \leq \delta Y^r \leq 2 \cdot 10^{-4}$ определены границы составляющих погрешностей δR_{01} , δR_{02} из-за $\delta R_{(s)}^r$ и $\delta \dot{R}^r$ погрешностей сопротивлений эталонных резисторов:

$$0,6 \delta \dot{R}^r \leq \delta \dot{R}_{01} \leq 0,8 \delta \dot{R}^r; 0,5 \delta R_{(s)}^r \leq \delta R_{01(s)} \leq 1,5 \delta R_{(s)}^r;$$

$$0,75 \delta \dot{R}^r \leq \delta \dot{R}_{02} \leq \delta \dot{R}^r; 0,75 \delta R_{(s)}^r \leq \delta R_{02(s)} \leq \delta R_{(s)}^r. \quad (7)$$

Нижние границы $\delta \dot{R}_{01}$, $\delta \dot{R}_{02}$, $\delta R_{01(s)}$, $\delta R_{02(s)}$ соответствуют $\delta Y_T^r = 10^{-6}$, верхние — $\delta Y_T^r = 10^{-3}$.

Погрешности δR_{01} , δR_{02} использованы для получения суммарной составляющей $\Delta T_{и2}$. Для оценки влияния δR^r , δY^r на составляющую $\Delta T_{и2}$ приняты $5 \cdot 10^{-6} \leq \delta Y^r \leq 2 \cdot 10^{-4}$, $193\text{K} \leq T_{и1} \leq 323\text{K}$, $C = 65\text{K}$, $B = 3600\text{K}$, $|\delta R^r| \leq 0,2\%$, как установлено в [3, Прил. Л]. Границы $\Delta T_{и2}$ получены в пределах $0,05 \leq \Delta T_{и2} \leq 0,6$. Нижние границы соответствуют $T_{и1} = 193\text{K}$, верхние — 323K .

Далее представлен анализ погрешности $\Delta T_{и3}$ (4), обусловленной погрешностями ΔA , ΔB , ΔC , который до настоящего времени не проводили. Значения A , B , C , определяемые градуировкой по методике [3], получены решением системы трех линейных уравнений вида (2), в которых неизвестные — A , B , C , а аргументы — три пары результатов совместных измерений T^r и R^r . Зависимости A , B , C от шести пере-

менных (T_1^r, R_1^r) , (T_2^r, R_2^r) , (T_3^r, R_3^r) не приведены из-за их громоздкости. Формулы для расчета значений ΔA , ΔB , ΔC как функций дифференциалов шести переменных не представлены, поскольку они еще более громоздки. Для нахождения составляющих (4) отдельно определены ΔA_s , ΔB_s , ΔC_s из-за систематических ΔT_s^r , δR_s^r и $\Delta \dot{A}$, $\Delta \dot{B}$, $\Delta \dot{C}$ из-за случайных

ΔT^r , δR^r погрешностей. Отметим, что необходимо однозначно определять смысл и содержание понятий случайная ΔT^r , δR^r и систематическая ΔT_s^r , δR_s^r погрешности, так как нечеткое определение составляющих по причине и характеру проявления приводит к искажениям численных оценок ΔA , ΔB , ΔC в несколько раз.

Оценки численных значений и исследование свойств ΔA , ΔB , ΔC выполнены для термистора ММТ-1, который применяется во всех РЗ России и К-19 [6] на основе табличных данных зависимости R_T (T_T) при указанных ниже исходных данных.

При градуировке измерены значения $10^3 \leq R^r \leq 6 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ при температурах $T_1^r = 193\text{K}$, $T_3^r = 323\text{K}$, $T_2^r = 0,5(T_1^r + T_3^r) = 258\text{K}$.

Диапазоны пределов допускаемых СКО систематических погрешностей средств измерений, использованных при градуировке, находятся в пределах $5 \cdot 10^{-3} \text{K} \leq \Delta T_s^r \leq 2 \cdot 10^{-1} \text{K}$, $5 \cdot 10^{-6} \leq \delta R_s^r \leq 2 \cdot 10^{-4}$. При расчетах они приняты равными для всех T^r , R^r и равномерно распределенными в пределах допуска. Диапазоны пределов допускаемых СКО случайных погрешностей следующие: $5 \cdot 10^{-4} \leq \Delta T^r \leq 2 \cdot 10^{-2}$, $5 \cdot 10^{-6} \leq \delta R^r \leq 2 \cdot 10^{-4}$. Отметим, что разности вида $\Delta T_{12(s)} = \Delta T_{1(s)}^r - \Delta T_{2(s)}^r$ из-за систематических погрешностей средств измерений трех разностей вида $T_1^r - T_2^r$, используемых в определении кон-

стант, должны рассматриваться как составляющие ΔT^r .

Пределы допускаемых СКО суммарных погрешностей каждой из трех констант определены по формулам вида

$$\Delta I_{\Sigma} = (\Delta I_{\Sigma s}^2 + \Delta I_{\Sigma}^2)^{1/2}, \text{ где}$$

$$\Delta I_{\Sigma s} = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial I}{\partial T_i^r} \Delta T_{i(s)}^r + \frac{\partial I}{\partial R_i^r} \Delta R_{i(s)}^r \right);$$

$$\Delta \dot{I}_{\Sigma} = \left[\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial I}{\partial T_i^r} \Delta \dot{T}_i^r \right)^2 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial I}{\partial R_i^r} \Delta \dot{R}_i^r \right)^2 \right]^{1/2},$$

здесь I — это или A , или B , или C .

На основе численных значений ΔI_{Σ} для термисторов ММТ-1, К-19 сделаны выводы.

Значения ΔI_{Σ} обратно пропорциональны разностям температур $\Delta T_{21}^r, \Delta T_{32}^r, \Delta T_{31}^r$, установленным в методике градуировки. Наименьшие значения ΔI_{Σ} достигаются при $\Delta T_{21} = \Delta T_{32} = 0,5 \Delta T_{31}$. Увеличение количества пар значений (T_i^r, R_i^r) более трех на интервале $\Delta T_{31} = T_{\max}^r - T_{\min}^r$ не приводит к уменьшению ΔI_{Σ} .

При сопоставлении численных значений $\Delta I_{\Sigma(s)}$, $\Delta \dot{I}_{\Sigma}$ установлено, что доминирующими являются $\Delta \dot{I}_{\Sigma}$. При значениях $|\Delta \dot{T}^r| = |\Delta T_s^r|$, $|\delta \dot{R}^r| = |\delta R_s^r|$ — значения $|\Delta \dot{I}_{\Sigma}| > 10 |\Delta I_s|$.

Составляющие погрешностей всех констант пропорциональны $\Delta T^r, \delta R^r$. Зависимости $\Delta A_{\Sigma}, \Delta B_{\Sigma}, \Delta C_{\Sigma}$ от $\Delta T^r, \delta R^r$ для двух типов термисторов, изготовленных по разной технологии, практически одинаковы, хотя разности значений B, C достигают 30 %, а значения A отличаются в 30 раз. Это косвенно подтверждает надежность методики анализа и выводов о свойствах констант.

Рассчитаны зависимости погрешностей констант от $\Delta \dot{T}^r, \Delta T_s^r, \delta R^r$, которые представлены в табл. 1, для следующих соотношений абсолютных значений погрешностей:

$$|\Delta \dot{R}^r| = |\delta R_s^r| = |\delta R^r|; |\Delta \dot{T}^r| = 10^2 |\delta \dot{R}^r| \text{ К}; |\Delta T_s^r| = 10^3 |\delta R^r| \text{ К} \quad (8)$$

Из табл. 1 следует, что составляющие, обусловленные $\Delta \dot{T}^r, \delta \dot{R}^r$, в десятки раз превышают составляющие $\delta R_s^r, \Delta T_s^r$.

Далее в анализе влияние $\delta R_s^r, \Delta T_s^r$ не учитывалось, если

$$|\delta R_s^r| \leq 10 \delta \dot{R}^r, \quad |\Delta T_s^r| \leq 10 |\Delta \dot{T}^r|.$$

Погрешности констант из табл. 1 использованы для нахождения зависимости суммарной составляющей $\Delta T_{\text{из}}$ в (5) по формуле

$$\Delta T_{\text{из}} = \left[\Delta T_{\text{из}3}^2 \left(\frac{\Delta \dot{A}_{\Sigma}}{A} \right) + \Delta T_{\text{из}3}^2 \left(\frac{\Delta \dot{B}_{\Sigma}}{B} \right) + \Delta T_{\text{из}3}^2 \left(\frac{\Delta \dot{C}_{\Sigma}}{C} \right) \right]^{1/2} \quad (9)$$

для диапазона измерений температуры $193 \text{ К} \leq T_{\text{и}} \leq 323 \text{ К}$ при погрешностях $2 \cdot 10^{-5} \leq \delta R^r \leq 5 \cdot 10^{-4}$, $2 \cdot 10^{-3} \text{ К} \leq \Delta \dot{T}^r \leq 5 \cdot 10^{-2} \text{ К}$, $2 \cdot 10^{-2} \text{ К} \leq \Delta \dot{T}_s^r \leq 5 \cdot 10^{-1} \text{ К}$ и соотношениях (8). Оказалось, что составляющая $\Delta T_{\text{из}}$ в (5) является доминирующей. Зависимость $\Delta T_{\text{из}}$ от $T_{\text{и}}, \Delta \dot{T}^r$ аппроксимируется формулой

$$\Delta T_{\text{из}} = [0,55 + 0,005(T_{\text{и}} - 193)] \Delta \dot{T}^r. \quad (10)$$

Доля относительного вклада составляющих $\Delta T_{\text{из}1}, \Delta T_{\text{из}2}, \Delta T_{\text{из}3}$ в суммарную $\Delta T_{\text{и}}$, рассчитанную по (9), выражается неравенством

$$\Delta T_{\text{из}} > 10 (\Delta T_{\text{из}1}^2 + \Delta T_{\text{из}2}^2)^{1/2}.$$

Это неравенство подтверждает сделанное предположение об основном источнике разброса показаний ИТ в ансамбле однотипных РЗ, «сосредоточенном» в способе аппроксимации ФП термистора, методике и процедуре экспериментального определения ГХ (2). Влияние составляющих $\Delta T_{\text{из}1}, \Delta T_{\text{из}2}$, не рассматривается, если $\Delta T_{\text{из}} \geq 0,9 \Delta T_{\text{и}}$.

В табл. 2 сопоставлены требования к нормируемым в [4, С. 48] $\Delta A/A, \Delta B/B, \Delta C/C$ со значениями $\Delta A_{\Sigma}/A, \Delta B_{\Sigma}/B, \Delta C_{\Sigma}/C$, которые достигаются при методиках градуировки, установленных в технических условиях на серийные РЗ [8].

Таблица 1

Зависимости погрешностей констант в ГХ (2) от погрешностей измерений при градуировке

Погрешность	Источник погрешности градуировки	Погрешности констант ГХ (2)		
		$\Delta A, \text{ Ом}$	$\Delta B, \text{ К}$	$\Delta C, \text{ К}$
Систематическая	δR_s^r	$\Delta A_{s,r} = 0,3 \delta R_s^r$	*	*
	ΔT_s^r	*	*	$\Delta C_{s,T} = -\Delta T_s^r$
Случайная	$\delta \dot{R}^r$	$\Delta \dot{A}_r = 10 \delta \dot{R}^r$	$\Delta \dot{B}_r = 1,8 \cdot 10^4 \delta \dot{R}^r$	$\Delta \dot{C}_r = 750 \delta \dot{R}^r$
	$\Delta \dot{T}^r$	$\Delta \dot{A}_T = 0,3 \Delta \dot{T}^r$	$\Delta \dot{B}_T = 620 \Delta \dot{T}^r$	$\Delta \dot{C}_T = 27 \Delta \dot{T}^r$

* — значение менее 10^{-13} .

На рис. 2 представлены рассчитанные по (10) зависимости $\Delta T_{\text{из}}$ от температуры $T_{\text{и}}$ для заданных $\Delta \dot{T}^r$,

$\Delta \dot{T}_s^r, \delta R^r$, находящихся в соотношениях (8).

На рис. 3 показаны рассчитанные по (5) $\Delta T_{\text{и}}$ с учетом всех составляющих $\Delta T_{\text{из}1}, \Delta T_{\text{из}2}, \Delta T_{\text{из}3}$ для пяти значений $T_{\text{и}} = 323; 290,5; 258; 225,5; 193 \text{ К}$ по координате x , где каждому значению x соответствует набор значений по соотношению (8): $\delta R^r = 10^{-2} x$,

$$\Delta \dot{T}^r = x, \quad \Delta T_s^r = 10x, \quad \Delta \dot{Y}_i^r = \Delta Y_i^r = \delta R^r.$$

Из графиков рис. 3 следует, что по-

Таблица 2

Сопоставление требуемых и достигнутых значений погрешностей констант в ГХ (2)

Погрешность	Погрешности констант		
	1	2	3
$\Delta A/A$	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}$	$\geq 3,5 \cdot 10^{-1}$
$\Delta B/B$	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$	$\leq 3,5 \cdot 10^{-3}$	$\geq 6,7 \cdot 10^{-2}$
$\Delta C, K$	$\leq 10^{-2}$	$\leq 0,56$	≥ 10
$^*\Delta T_{из}, K$	$\leq 0,014$	$> 1,5$	> 14

* — расчетное значение $\Delta T_{из}$ для $T_{и} = 258,15 K$;

1, 2, 3 — значения констант, установленные в [4, С. 48]; рассчитанные для $|\delta R^r| = 2 \cdot 10^{-4}$, $|\Delta T^r| = 2 \cdot 10^{-2}$, $|\Delta T_s^r| = 2 \cdot 10^{-1} K$; для $|\delta R^r| = 2 \cdot 10^{-3}$, $|\Delta T^r| = |\Delta T_s^r| = 2 \cdot 10^{-1} K$, соответственно.

грешность $\Delta T_{и}$ при разных $T_{и}$ изменяется в пределах $\pm 0,2 \Delta T_{и} (T_{и}^r)$, где $T_{и}^r = 258 K$ — средняя температура при градуировке в интервале температур. Дополнительные расчеты показали, что $\Delta T_{из}$ обратно пропорциональна интервалу температуры, в котором выполнена градуировка.

Результаты анализа, представленные формулой (10), данными таблиц 1, 2 и рис. 2, 3, подтвердили несостоятельность исходной концепции построения ИТ с аналоговым кодированием и декодированием на основе аппроксимации ФП термистора в большом интервале температур $-80...+50 ^\circ C$ аналитической функцией вида $R_T = A \exp B(T + C)^{-1}$. Этот вывод очевиден уже из формулы для нахождения константы C в ГХ (2), поскольку C рассчитывается как отношение двух значений величины, определенных с равными абсолютными погрешностями при делителе в 60—100 раз меньше делимого [3, Прил. Л]. Из этого отношения следует, что погрешности ГХ (2) и ИТ превышают погрешности ΔT^r , ΔT_s^r в десятки раз. Прокомментируем это.

Все расчеты ΔA , ΔB , ΔC выполнены по формулам, полученным дифференцированием формул для A , B , C , которые приведены в [3]. В методике градуировки [3, Прил. Л] показатели точности измерений ΔT^r , δR^r нормированы в виде: «погрешность установки» температуры $\leq \pm 0,3 K$, «погрешность поддержания» $\pm 0,5 K$, «отклонение» сопротивления резистора от номинальных значений $\leq \pm 0,2\%$. Приняв одну из погрешностей температуры за случайную, а другую за систематическую и равными по $\pm 0,4 K$, $\delta R^r = 0,2\%$, получим данные графы 3 табл. 2.

Основной потребитель радиозондов — Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в [4, С. 48] рекомендует обеспечить при градуировке $\Delta A = 10^{-5} \text{ Ом}$, $\Delta B = 10^{-4} K$, $\Delta C = 10^{-2} K$. Для этого изготовитель должен добиться выполнения условий при экспериментальной гра-

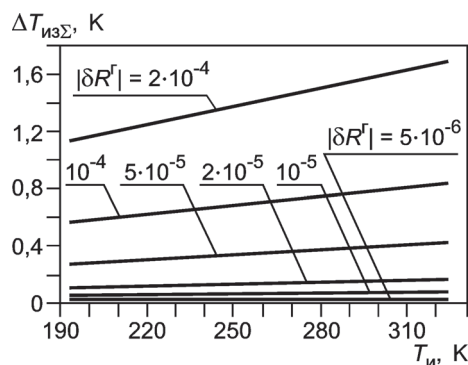


Рис. 2. Зависимость $\Delta T_{из}$ от $T_{и}$ при различных δR^r

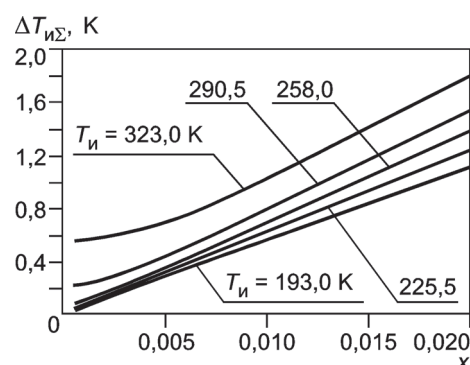


Рис. 3. Зависимость $\Delta T_{и}$ от x при различных $T_{и}$

дуировке $|\delta R^r| \leq 10^{-6}$, $|\Delta T^r| \leq 10^{-4}$. При этом будет достигнута $\Delta T_{из} \leq 0,015 K$. Очевидно, такие малые значения $\Delta T_{из}$ не нужны, а δR^r и, особенно, ΔT^r недостижимы. Для получения $\Delta T_{из}$, сопоставимой с нормируемой погрешностью ИТ $\pm(1—1,5) K$, достаточно иметь значения $\Delta T^r = 2 \cdot 10^{-2} K$, $\Delta T_s^r = 2 \cdot 10^{-1} K$, $\Delta R^r = 2 \cdot 10^{-4}$, использованные для нахождения значений $\Delta A/A$, $\Delta B/B$, ΔC , приведенных в графе 2 табл. 2. Однако изготовитель устанавливает приблизительные пределы допускаемых значений $|\Delta T^r| \approx 4 \cdot 10^{-1} K$, $|\Delta T_s^r| \approx 4 \cdot 10^{-1} K$,

$|\Delta R^r| \approx 2 \cdot 10^{-3} K$, [4, С. 48]. Таким образом, потребитель рекомендует заведомо ненужные и невыполнимые на практике требования к градуировке ИТ [4, С. 48]. Изготовитель выпускает РЗ с требованием к ΔT^r , δR^r , при реализации которых погрешности градуировки ИТ на порядок больше, чем нормируются в технических условиях [3], и на три порядка больше, чем рекомендует потребитель. Это противоречие не удалось устранить в течение 25 лет, так как его и невозможно устранить при аппроксимации ГХ функциями (1), (2) и применении аналогового способа передачи по радиоканалу значений Y_T .

Существует дополнительная составляющая погрешности градуировки, обусловленная неадекватностью принятой модели ФП и реальной зависимости $R_T(T)$ на большом интервале температур. В основе ГХ (2) находится предположение, что в ФП значение $A = \text{const}$ и, соответственно, имеется зависимость $\alpha(T) (T + C)^2 = B$, где $\alpha(T)$ — температурный коэффициент сопротивления термисторов, B , C — константы. Экспериментальные данные о зависимости $\alpha(T)$ в [6, 7] не соответствуют такой модели. Результаты дополнительного исследования влияния неадекватности модели ГХ (2) на $\Delta T_{и}$ показали, что погрешность из-за неадекватности модели соизмерима с максимальным значением $\Delta T_{из}$.

Вывод. Большие погрешности градуировки измерителей температуры для аэрологических радиозондов возникают из-за совмещения кодирования температуры термистора функцией ГХ(2) с аналоговым кодированием значения R_T функцией ГХ (1). В результате для получения приемлемых погрешностей значений ГХ (2) требуются методы градуиров-

ки с применением средств измерений сопротивления термистора и, особенно, температуры тела термистора с погрешностями, трудно достижимыми в условиях серийного производства, т. е. примерно в 10—20 раз меньше, чем заданные в технических условиях [3].

В цифровом радиозонде есть возможность эти недостатки устранить [8]. Исследование и испытание макетов цифрового радиозонда с градуировкой ИТ по новым методикам и передачей данных по радиоканалу цифрового радиозонда показали, что $\Delta T_{\text{и}}$ сопоставимо с погрешностями измерений $\Delta T_{\text{г}} = \pm 0,4 \text{ K}$, если применить методики градуировки без использования градуировочных характеристик, аппроксимируемых аналитическими функциями.

Л и т е р а т у р а

1. Фридзон М. Б., Ермошенко Ю. М. Радиозондирование атмосферы // Мир измерений. 2009. № 7. С. 18.
2. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation // World Meteorological Organization (WMO). 2006. № 8. С. 1.12-20—1.12-23.

3. Зонд аэрологический малогабаритный АК2. Технические условия. МНЖИ. 416123.002 ТУ. 2007.

4. Положение о метрологическом обеспечении аэрологических наблюдений. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Москва. 2007.

5. Радиозонды аэрологические. [Электрон. ресурс]. http://www.fundmetrology.ru/10_tipy_si/list.aspx (дата обращения 22.11.2013 г.).

6. Термисторы фирмы Siemens and Matsushita. Библиотека электронных компонентов. Выпуск 5. 1999 г. [Электрон. ресурс]. <http://www.platan.ru/docs/bek/0,5pdf> (дата обращения 22.11.2013 г.).

7. NTC thermistors for temperature measurement. [Электрон. ресурс]. <http://fraden.brandeis.edu/courses/phys39/Thermal%20Control/hardware/Thermistor%20EPCOS%20B57861S0202F040.pdf> (дата обращения 22.11.2013 г.).

8. Пат. 103195 РФ. В. В. Чистюхин и др. Универсальный малогабаритный радиозонд // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 9.

Дата принятия 20.02.2014 г.

681.12.001.24.008:621.1.013.018.5

Измерения массы влажного насыщенного пара и отдаваемой паром тепловой энергии с применением объемных расходомеров

Б. М. БЕЛЯЕВ, И. М. ШЕНБРОТ

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: shen11@yandex.ru

Рассмотрены особенности измерения массы и тепловой энергии насыщенного водяного пара с использованием датчика объемного расхода и учетом коэффициентов влияния температуры, давления и степени сухости. Приведен пример расчета погрешностей измерений массы и тепловой энергии при проектировании узла учета влажного насыщенного пара.

Ключевые слова: насыщенный водяной пар, тепловая энергия, расходомер.

The peculiarities of measurement of the mass thermal energy of saturated water vapor with use of volume flow transducer and with taking into account the influence of temperature, pressure and dryness factor are considered. An example of errors calculation for measurement of mass and heat energy at designing of database site for accounting of wet saturated vapor with application of volume flow transducer is given.

Key words: saturated water vapor, heat energy, flow meter.

При измерениях массы насыщенного водяного пара по объемному расходу, последний умножается на плотность, которая вычисляется по температуре или давлению пара (значение любой из этих величин определяет точку на кривой насыщения пара).

Современные тепловычислители допускают измерения массового расхода и массы только сухого насыщенного пара или предусматривают ввод степени сухости пара как условно-постоянной величины. Состояние сухого насыщенного пара неустойчиво: пар либо возвращается в перегретое состояние, либо становится влажным. Состояние влажного насыщенного пара может быть достаточно устойчивым: пе-

реход из неустойчивого состояния сухого насыщенного пара в жидкость сопровождается снижением его сухости от 1 до 0, при этом плотность пара возрастает примерно в 1600 раз при абсолютном давлении 10 кПа, в 200 раз при 1 МПа и в 15 раз при 10 МПа [1]. Степень сухости насыщенного пара можно найти по его объему и массе, но применение одновременно и массового, и объемного счетчиков (расходомеров) достаточно затратно.

Плотность и энтальпия перегретого пара и воды в жидком состоянии определяются двумя параметрами — температурой и давлением, а насыщенного пара — температурой (либо абсолютным давлением) и степенью его сухости.