

Коэффициенты влияния параметров на погрешность измерения, отн. ед.

Параметр А (коэффициент)	Коэффициенты влияния							
	$\partial A/\partial V_{\text{и}}$	$\partial A/\partial p_{\text{и}}$	$\partial A/\partial p_{\text{с}}$	$\partial A/\partial t_{\text{с}}$	$\partial A/\partial p_{\text{а}}$	$\partial A/\partial F$	$\partial A/\partial I$	$\partial A/\partial t$
Открытая пористость	0,0360	0,1798	0,6843	0,0028	0,0355	0,0463	0,0947	0,0023
Коэффициент газопроницаемости	0,0360	0,1790	0,6835	0,0231	0,0709	0,0231	0,0946	0,0231
Коэффициент фильтрации	0,1788	0,7190	0,6835	0,0231	0,0709	0,0231	0,0946	0,0231
Коэффициент диффузии	0,0360	0,7204	0,6848	0,0231	0,0355	0,0232	0,0948	0,0231
Коэффициент растворимости	0,0359	0,7184	0,6830	0,0028	0,0709	0,0462	0,0945	0,0023

Из приведённых расчётов следует, что наибольшее влияние на погрешность измерений пористости материала оказывает погрешность измерений давления газа, определяемая погрешностью датчиков давления. Полученные результаты удовлетворяют требованиям производства.

Предлагаемое устройство рекомендуется к использованию на производстве для контроля пористости материала изделий, а также для контроля свойств материалов конструкций в процессе их эксплуатации.

Погрешность измерений открытой пористости, коэффициентов фильтрации, диффузии, растворимости газа и газопроницаемости материала находится в пределах 4—6% и зависит от инструментальных источников.

Л и т е р а т у р а

1. Пат. 2305820 РФ. Способ определения параметров пористости материалов / Ю. З. Житников, А. Н. Иванов, Ю. Н. Матросова, А. Е. Матросов // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 25.

2. **Можегова Ю.Н.** Устройство автоматизированного неразрушающего контроля механических свойств изделий машиностроения // Сб. науч. трудов Междунар. науч.-техн. конф. «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении». Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 234—238.

3. **ГОСТ 1055—88.** Сталь углеродистая качественная конструкционная.

Дата принятия: 28.09.2015.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

551.508:681.586

Методика градуировки измерителей температуры цифровых аэрологических радиозондов

А. С. БОРОВКОВ

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия,
e-mail: alex101787@mail.ru

Представлена методика градуировки измерителей температуры цифровых аэрологических радиозондов. Установлено, что погрешность градуировки — главный источник погрешности измерителей температуры аэрологических радиозондов, выпускаемых в России. Показано, что погрешность градуировки цифрового измерителя температуры при использовании методики табличной градуировки значительно меньше, чем при градуировке аналитической функцией.

Ключевые слова: аэрологический радиозонд, цифровой измеритель температуры, градуировка.

The method of calibration applicable to digital temperature meters used in aerological radiosondes is considered. The calibration error is shown to be the main source of errors for temperature meters produced in Russia. The digital temperature meter error of calibration, carried out in accordance with table calibration procedure, is shown to be significantly smaller than the error of calibration, performed by means of analytical function.

Key words: aerological radiosonde, digital temperature meter, calibration.

Оценка погрешностей измерений вертикальных профилей температуры методом радиозондирования атмосферы важна для прогнозирования погоды. Большинство выпуска-

емых серийно и эксплуатируемых отечественных измерителей температуры (ИТ) аэрологических радиозондов (РЗ) реализованы на принципах и методах 1970—1985 гг. с исполь-

зованием элементной базы и технических решений того периода. В течение последних 30 лет погрешности зарубежных ИТ РЗ уменьшены в 3—4 раза. Согласно результатам международных сличений разброс показаний ИТ одного типа отечественного РЗ МРЗ-3 в 3—4 раза больше по сравнению с зарубежными РЗ, принимавшими участие в сличениях [1]. Основным источником разброса показаний ИТ — суммарная инструментальная погрешность определения температуры.

До настоящего времени при оценке погрешностей ИТ рассматривали погрешность функции преобразования (ФП). Однако температуру атмосферы рассчитывали по индивидуальной градуировочной характеристике, являющейся функцией, обратной ФП. Таким образом, проводившийся ранее анализ погрешностей ИТ не учитывал доминирующую составляющую — суммарную погрешность градуировочной характеристики, т. е. погрешность градуировки ΔT_r , определяемую как погрешность действительной температуры терморезистора T_r , приписанной отметке шкалы средства измерений (СИ) в результате градуировки. В ИТ практически всех типов российских РЗ используют терморезистор ММТ-1 с ФП вида

$$R_T = A \exp [B (T_r + C)^{-1}],$$

где R_T — сопротивление терморезистора; A, B, C — константы, определяемые при градуировке.

Известен анализ погрешностей градуировочной характеристики на основе модели, описывающей измерение и метод градуировки для измерительной схемы с наиболее распространённой ФП и терморезистора ММТ-1 [2]. Исследованы зависимости погрешности измерений температуры от погрешностей рабочих эталонных ИТ и сопротивления, используемых при градуировке. Расчёт погрешностей произведён для градуировочной характеристики вида

$$T_r = B / \ln [(R_{01}/Y - R_{02})/A] - C, \quad (1)$$

где Y — отношение периодов следования импульсов каналов опорного и метеоинформации, содержащее информацию о преобразуемом сопротивлении ИТ; R_{01}, R_{02} — характеристические сопротивления (константы измерительной схемы). Для расчёта T_r по (1) проводят с заданной точностью индивидуальную градуировку ИТ с помощью специального термостата. Методика градуировки ИТ заключается в определении констант A, B, C для конкретного терморезистора. Измеряют сопротивления терморезистора при температурах $-68; -15; +36$ °С. Значения R_{01}, R_{02} определяют для ИТ, измеряя значения Y при подключении вместо терморезистора двух определённых сопротивлений 4,3; 62 кОм. Далее значения A, B, C, R_{01}, R_{02} заносят в этикетку на ИТ.

В результате анализа установлено, что при аппроксимации ФП терморезистора аналитической функцией, применяемой для всех РЗ, выпускаемых в России, погрешность ИТ в десятки раз больше, чем случайная погрешность при гра-

дуировке. Изготовитель РЗ устанавливает приблизительные пределы допускаемых значений погрешностей СИ, используемых при градуировке, при реализации которых погрешность градуировки ИТ на порядок больше, чем нормируется в технических условиях и на три порядка больше, чем рекомендует потребитель.

Описанный метод применяется до настоящего времени в целях «обеспечения минимальной трудоёмкости» [3]. Отметим, что разнообразные типы серийных цифровых датчиков температуры с линейной характеристикой не находят применения в РЗ [4]. Это связано с трудностями устранения следующих погрешностей: из-за поглощения солнечной радиации; из-за недостаточного диапазона измеряемых температур; динамической; неустойчивости к влиянию испарения и конденсации влаги в полёте.

Методика табличной градуировки, представленная в настоящей работе, разработана для применения в цифровых РЗ [5]. В таких РЗ используют цифровой ИТ и имеется достаточный технический ресурс для обработки и передачи показаний цифрового ИТ, требующего индивидуальной градуировки. Конечная цель такой градуировки — построение для каждого экземпляра ИТ градуировочной характеристики в виде таблицы (градуировочной таблицы), в которой каждому показанию ИТ (пятиразрядному числу N_i с минимальным разрядом 1) поставлена в соответствие температура T_i (четырёхразрядное число с минимальным разрядом 10^{-2} °С) в диапазоне температур $-80...+50$ °С (см. таблицу).

Градуировочная таблица может содержать от 10^3 до 10^4 пар значений $T_i (N_i)$ с разрядностью (дискретностью таблицы) в смежных парах (T_i, N_i) , $1 \leq N_i \leq 80$, $10^{-2} \text{ °С} \leq T_i \leq 10^{-1} \text{ °С}$. Дискретность градуировочной таблицы зависит от вида функции $T_i (N_i)$, который определяется измерительной схемой ИТ, скоростью изменения температуры и выбранным режимом усреднения показаний ИТ. Типовые значения $T_i (N_i)$ для ИТ, которые были исследованы при обработке метода градуировки ИТ на основе термисторов ММТ-1, Epcos B57550G0103F000 и Epcos B57861S0103F45 приведены на рис. 1.

Запишем уравнение измерения в виде

$$T_{ri} (N_{ri}) = T_{ri},$$

где T_{ri} — температура среды, в которой в условиях термодинамического равновесия размещён термистор градуируемого ИТ; T_{ri}, N_{ri} — температура термистора и показания ИТ в один и тот же момент времени t_i . Температура T_{ri} определяется как $T_{ri} = T_{\text{э}i}$, где $T_{\text{э}i}$ — результат измерения T_{ri} рабочим эталоном температуры.

Методика табличной градуировки реализуется с применением многоканальной измерительной установки. Схема градуировки ИТ показана на рис. 2. Внутри регулируемого термостата или испытательной камеры (климатической камеры) размещают блок термодинамического равновесия, изготовленный из металла с высокой теплопроводностью, на-

пример алюминия или меди, с 20 полыми измерительными ячейками. Характерный размер полости ячеек $80 \times 30 \times 30$ мм. Среда — воздух. В каждой ячейке размещают чувствительные элементы — 4 терморезистора градуируемых ИТ и платиновый термометр сопротивления ПТСВ-2-3 [6], используемый в каче-

Градуировочная таблица

Параметр	Значение							
N_i	64200	64197	...	46018	45968	...	10097	10092
$T_i (N_i)$	51,98	51,92	...	-15,70	-15,77	...	-81,93	-82,00

стве рабочего эталона, подключенный к измерительному блоку МИТ 8. Все элементы расположены на расстоянии 2—5 мм равномерно по длине ячейки. При таком расположении предполагается, что температуры элементов в одной ячейке равны. Градуировочный ИТ подсоединяют к микроконтроллерам, а затем к персональному компьютеру посредством USB-кабелей. Термостат, регулируемый программно или вручную, обеспечивает изменение температуры внутри ячейки в диапазоне $-85...+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ с заданной средней скоростью.

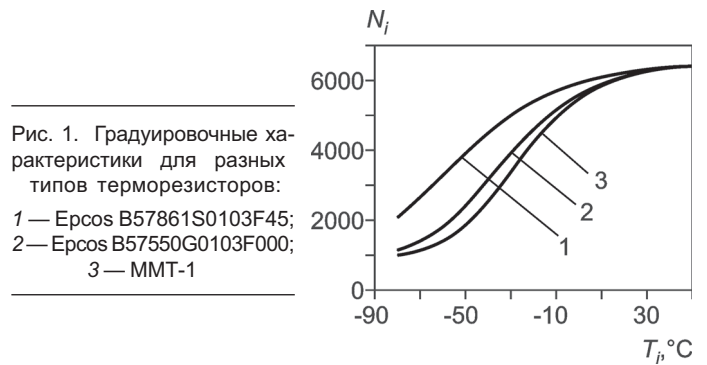
Процедура измерений включает: установление стабильной начальной температуры, например $-(80...82)\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+(50...52)\text{ }^{\circ}\text{C}$, и отсчёт исходных показаний ИТ и МИТ 8; управляемое изменение температуры внутри термостата и блока термодинамического равновесия с постоянной скоростью; отсчёт и усреднение за установленный интервал времени Δt текущих показаний ИТ с помощью программы; отсчёт текущих показаний $T_{\text{э}}$ МИТ 8, соответствующих интервалу времени Δt с помощью программы; формирование на персональном компьютере таблицы Excel, в которой каждая ячейка содержит усреднённое значение $N_{\text{и}}$ за Δt и значение $T_{\text{э}}$; сохранение таблицы на компьютере.

Взаимные связи и зависимость основных технических характеристик метода были исследованы при следующих установленных режимах работы: диапазон температур $-80...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$; диапазон фиксированных скоростей измерения температуры $28\cdot 10^{-3}$; $7\cdot 10^{-3}$; $1\cdot 10^{-2}$; $1,4\cdot 10^{-2}$; $2\cdot 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C/c}$; диапазон интервалов времени усреднения на одно показание $N_{\text{и}}$, $T_{\text{э}}$ 1, 2, 5, 10 с; случайная погрешность ИТ $\Delta \dot{N}_{\text{и}}$ при установившейся стабильной температуре в ячейке в интервале $1 \leq \Delta \dot{N}_{\text{и}} \leq 6$; случайная погрешность результатов измерений температуры $\Delta \dot{T}_{\text{и}}$ с учётом вида функции $T_{\text{и}}(N_{\text{и}})$ $2\cdot 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta \dot{T}_{\text{и}} \leq 7\cdot 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}$; диапазон показаний ИТ $9600 \leq N_{\text{и}} \leq 64800$; количество ячеек в таблице от 10^3 до 10^5 ; дискретность показаний $N_{\text{и}}$ между ячейками таблицы $1 \leq \Delta N_{\text{д}} \leq 80$; дискретность показаний $T_{\text{э}}$ между ячейками таблицы $10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{д}} \leq 10^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По результатам исследования технических характеристик методики установлены закономерности: дискретность значений в таблице при равных Δt пропорциональна скорости изменения температуры; случайная погрешность $\Delta \dot{T}_{\text{и}}$ растёт обратно пропорционально $\Delta t^{0,5}$.

На основе анализа погрешностей определён оптимальный режим градуировки со следующими техническими характеристиками: интервал усреднения показаний $\Delta t = 16\text{ с}$; скорость изменения температуры $V \approx 0,004\text{ }^{\circ}\text{C/c}$; количество ячеек в таблице порядка 2000; максимальная цена деления шкалы $\Delta T_{\text{д}} \approx 0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$; среднее квадратическое значение (СКЗ) случайной погрешности ИТ $\Delta \dot{T}_{\text{ИТ}} \approx 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$; суммарное время градуировки при постоянной скорости около 9 ч ($\approx 3,3\cdot 10^4\text{ с}$).

Далее оценим погрешность градуировки ИТ. Рассмотрим бюджет погрешностей с использованием полученных расчётно-экспериментальных



оценок их значений. Составляющими погрешности градуировки ИТ являются: предел допускаемого СКЗ погрешности рабочего эталона, включающей систематическую погрешность ПТСВ-2-3 и предел допускаемой погрешности МИТ 8, равный $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$; предел допускаемого СКЗ случайной погрешности ИТ $\Delta \dot{T}_{\text{ИТ}} = \pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$; максимальная допустимая разность температур внутри ячейки между местами расположения ПТСВ-2-3 и терморезистором ИТ (для равновероятного распределения) $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$; максимальная разность систематических динамических погрешностей ИТ и рабочего эталона (для равновероятного распределения) не более $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$; максимальное значение $\Delta T_{\text{д}}$ в градуировочной таблице (для равновероятного распределения) не более $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$; СКЗ суммарной погрешности градуировки ИТ $\Delta T_{\text{г ИТ}}$ не более $\pm 0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Из приведённого бюджета погрешностей градуировки ИТ следует, что при реализации принятых режимов градуировки ИТ и рабочего эталона СКЗ погрешности градуировки ИТ $\Delta T_{\text{г ИТ}} \approx 2,5\Delta \dot{T}_{\text{ИТ}}$. Погрешность градуировки может изменяться при изменении $\Delta \dot{T}_{\text{ИТ}}$. Другие факторы, влияющие на $\Delta T_{\text{г ИТ}}$, зависят от конструкции ячейки и реализуемых режимов работы установки.

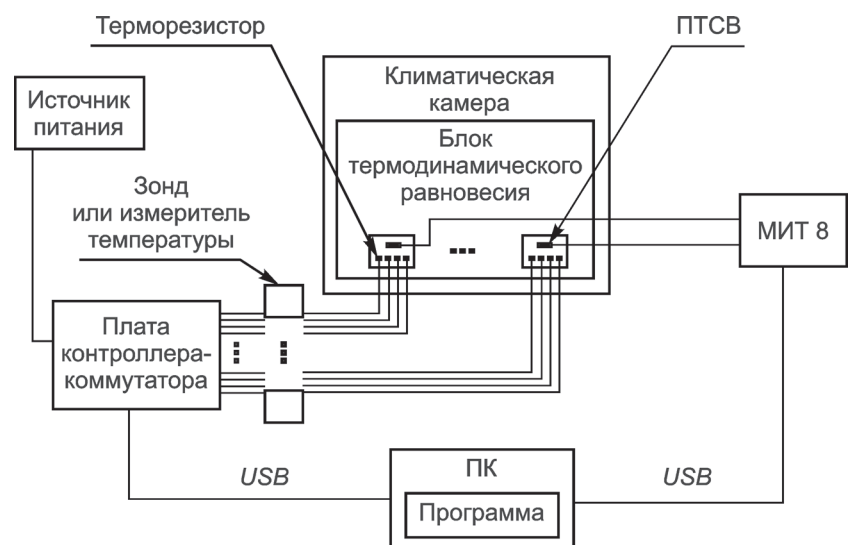


Рис. 2. Схема градуировки ИТ

Предложенная методика градуировки реализует прямой перевод T в N , исключает операции определения A , B , C , расчёт T по градуировочной характеристике, следовательно устраняет погрешности, обусловленные этим. Погрешность градуировки при реализации разработанной методики $\Delta T_{г\text{ ИТ}} \approx \pm 0,13$ °С. Внедрение предложенной методики градуировки повысит точность измерения температуры атмосферы.

С целью упрощения работы оператора, уменьшения затрат времени, повышения точности градуировки, увеличения количества градуируемых измерителей разработана программа «Градуировка цифровых измерителей температуры аэрологических радиозондов», которая предназначена для автоматизированной градуировки цифровых ИТ РЗ. С помощью данной программы формируются градуировочные характеристики в виде таблиц, содержащих все возможные показания измерителей с соответствующими им значениями температуры, интерполированными по методу наименьших квадратов на определенном интервале температур. При эксплуатации ИТ результат измерения определяется по градуировочной таблице как $T_i(N_i)$ для каждого показания цифрового ИТ. Интерполяция по методу наименьших квадратов позволяет уменьшить составляющую погрешности градуировочной характеристики из-за случайной погрешности измерений при градуировке. Программа реализована на возможности диалога персонального компьютера с прибором МИТ 8 и специальной платой, к которой подключены ИТ. Подключение к компьютеру осуществляется с помощью кабелей через разъёмы USB. Программа позволяет осуществлять градуировку большого количества ИТ одновременно в автоматическом режиме, что увеличивает производительность.

Заключение. Погрешность градуировки $\Delta T_{г\text{ ИТ}}$ при использовании методики табличной градуировки пропорциональна случайной погрешности $\Delta \dot{T}_{\text{ИТ}}$, а порядок её значения сопоставим с порядком значения $\Delta \dot{T}_{\text{ИТ}}$. При одинаковых значениях $\Delta \dot{T}_{\text{ИТ}}$ значение $\Delta T_{г\text{ ИТ}}$ цифрового ИТ на порядок меньше, чем $\Delta T_{г\text{ ИТ}}$ с применением традиционной методики, принятой для всех типов РЗ в России. Значение $\Delta T_{г\text{ ИТ}}$ окончательно должно устанавливаться на основе расчётно-экспе-

риментального определения технических характеристик методики градуировки и реализованных параметров режима при аттестации методики выполнения измерений с применением конкретных типов измерительного оборудования и СИ. При этом должны быть оценены все составляющие, перечисленные в бюджете $\Delta T_{г\text{ ИТ}}$. При наличии программно управляемых испытательных климатических камер или термостатов процедура градуировки ИТ с применением многоканальных блоков термодинамического равновесия может быть полностью автоматизирована для одновременной градуировки нескольких десятков ИТ. Ручные операции остаются только при размещении и извлечении термисторов в ячейках блоков и запуске компьютерной программы измерений.

Л и т е р а т у р а

1. **Guide** to Meteorological Instruments and Methods of Observation // World Meteorological Organization (WMO). 2006. N. 8. С. 1.12-20-1.12-23.
2. **Боровков А. С., Чуйко В. Г.** Погрешность градуировки термисторного измерителя температуры аэрологического радиозонда // Измерительная техника. 2014. № 6. С. 37—42.
3. **Осипов Ю. Г., Герасимова Н. В., Дядюра А. В.** Устройство и принцип действия аэрологической информационно-измерительной системы «Улыбка». Учебное пособие по дисциплине Методы зондирования окружающей среды. СПб.: РГГМУ, 2009. С. 26—28.
4. **Digital** temperature sensor ADT (datasheet). [Электрон. ресурс]. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADT7410.pdf> (дата обращения 17.05.2016).
5. **Пат. 103195 РФ.** Универсальный малогабаритный радиозонд / В. В. Чистюхин и др // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 9.
6. **Термометр** сопротивления платиновый эталонный ПТСВ-2-3/ [Электрон. ресурс]. <http://kipia.ru/catalog/izmeritelnye-pribory/izmerenie-temperatury/termopreobrazovateli-soprotivleniya/ptsv-1-ptsv/> (дата обращения: 17.05.2016)

Дата принятия: 30.05.2016.