

Применимость метода МТШ-90 к термометрам из платины разной чистоты

А. В. КРЮКОВ

Научно-производственное предприятие «Элемер»,
e-mail: elemer@elemer.ru

Измерены статические характеристики термометров сопротивления с разной чистотой платины. Показано, что в диапазоне 0—420 °С метод МТШ-90 дает погрешность менее 0,01 °С, а в диапазоне 0—230 °С — менее 0,006 °С.

Ключевые слова: платиновый термометр сопротивления, МТШ-90, методика градуировки.

The static characteristics of platinum resistance thermometers with different purity of the platinum are measured. It was shown that uncertainty of ITS-90 for these thermometers is less than 0,01 °C in the range of 0—420 °C and less than 0,006 °C in the range of 0—230 °C.

Key words: platinum resistance thermometer, ITS-90, method of calibration.

Основными требованиями к средству измерений температуры являются воспроизводимость его индивидуальной статической характеристики (ИСХ), возможность ее стандартизации и адекватность описания. Для эталонного платинового термометра сопротивления последнее сводится к необходимости применения платины высокой чистоты: его относительное сопротивление $W(T) = R(T)/R(0,01)$ в точке плавления галлия должно быть не менее 1,11807, а $W(100) = R(100)/R(0)$ — не менее 1,3927 ($R(T)$ — сопротивление термометра при температуре T).

В настоящее время ряд предприятий (ФГУП «ВНИИФТРИ», НПП «Элемер») выпускают эталонные термометры, имеющие минимальное значение $W(100)$ 1,3924 и 1,3908 для 2-го и 3-го разрядов, соответственно. Метод МТШ-90 предусматривает градуировку в реперных точках, а «правильное» поведение термометров между точками определяется чистотой платины и регламентируется упомянутым выше требованием. Поэтому правомерность использования эталонных термометров с $W(100) < 1,3927$ надо обосновывать.

В поверочных лабораториях, а в последнее время и в различных отраслях промышленности, существует спрос на цифровые термометры с погрешностью 0,03—0,05 °С. В таких приборах часто применяют не эталонные, а рабочие термометры с $W(100)$ вплоть до 1,3850. В связи с этим становится актуальным вопрос методики их градуировки. Она должна быть по возможности простой, но обеспечивающей требуемую точность.

В [1] ИСХ $W(T)$ аппроксимируется полиномом второй степени. В [2] для повышения точности предлагается ввести относительно простую номинальную характеристику, а индивидуальность термометров описывать функцией отклонений. Естественным способом является градуировка в нескольких точках и нахождение обратного $T(W)$ полинома для вычисления температуры, надо лишь определить минимальное количество точек градуировки. Наконец, можно воспользоваться методикой МТШ-90.

Цель настоящей работы — проверка адекватности описания МТШ-90 при градуировке термометров сопротивления (ТСП), изготовленных из платины различной чистоты. Фактически, задача состояла в том, чтобы определить, описывается ли отклонение $\Delta W(T) = W(T) - W_{90}(T)$ в диапазоне 0—420 °С предлагаемым полиномом второй степени и, если нет, какова погрешность интерполяции ($W_{90}(T)$ — стандартная функция МТШ-90).

Схема проведения эксперимента и используемое оборудование. Эксперимент состоял из нескольких этапов: методом сравнения в термостате измеряли ИСХ $W(T)$ термометров;

в точках, близких к тройной точке воды, точкам затвердевания индия, олова и цинка находили отклонения $\Delta W(T) = W(T) - W_{90}(T)$, а затем вычисляли поправочные коэффициенты a и b функции отклонений $\Delta W_{90}(T) = W(T) - W_{90}(T) = a(W(T) - 1) + b(W(T) - 1)^2$;

во всех экспериментальных точках определяли разность $\Delta T(T)$ измеренных значений температуры и рассчитанных с помощью коэффициентов a и b по полиному МТШ-90. Величина $\Delta T(T)$ является температурным эквивалентом разности $[(W(T) - \Delta W_{90}(T))]$ — это и есть погрешность метода МТШ-90. В реперных точках эта разность равна нулю по определению, а в промежуточных точках может отличаться от нуля, если $\Delta W(T)$ представляет собой полином степени выше второй;

дополнительно экспериментальные данные обрабатывали методом наименьших квадратов на полиномы различной степени и определяли точность, которую они обеспечивают.

Как было указано выше, наибольший интерес вызывает поведение термометров в точках, промежуточных между реперными. Трудность таких измерений состоит в том, что требуются термостаты с небольшими градиентами и высокой точностью термостатирования. К тому же для качественных

Основные составляющие погрешности используемого оборудования

Термометр	Погрешность измерения сопротивления термометра при температуре, °С				Расширенная оценка суммарной погрешности при температуре, °С			
	30	160	230	420	30	160	230	420
ПТС-10 (10 Ом)	0,001 0,001	0,003 0,001	0,003 0,001	0,002 0,001	0,0015 0,0015	0,004 0,0015	0,004 0,0015	0,0055 0,002
ПТС-25 (25 Ом)	0,001 0,0005	0,002 0,0005	0,002 0,0005	0,002 0,0005	0,0015 0,001	0,003 0,001	0,0035 0,001	0,0055 0,0015
ПТСВ-3 (100 Ом)	0,0005 0,0005	0,0015 0,0005	0,0015 0,0005	0,0015 0,0005	0,0015 0,001	0,003 0,001	0,003 0,001	0,005 0,0015
Градиент температуры в термостате	0 0	0,0005 0,0005	0,0015 0,0005	0,004 0,001				

измерений необходима большая глубина погружения термометров, а следовательно, и большие размеры термостата. В исследованиях использовали термостаты, разработанные и изготовленные в НПП «Элемер» и предназначенные для работы с реперными точками галлия, индия, олова и цинка. Основные параметры термостатов: диаметр колодца для ампулы реперной точки 60 мм; глубина 500 мм; градиент по высоте не более 0,1—0,2 °С; погрешность поддержания температуры не более $\pm 0,02$ °С. Для градуировки термометров в колодец помещали термостатирующий алюминиевый блок в кремнеземной оболочке. Это позволило снизить нестабильность температуры в блоке до 0,002 °С за 2,5 ч. Блок имел шесть отверстий для градуируемых и эталонного термометров.

В качестве эталонного термометра использовали ПТС-25 1-го разряда производства ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» (в связи с тем, что среди исследуемых термометров имеются термометры эталонного назначения, в дальнейшем будем называть его «образцовым»).

Измерения сопротивления проводили 8-канальным измерителем температуры МИТ-8.15 производства фирмы «ИзТех».

Влияние погрешности приборов и оборудования. В настоящем исследовании определяли величину $\Delta T(T)$, которая отлична от нуля только в том случае, если отклонение $\Delta W(T)$ является полиномом выше второй степени. Именно с этой точки зрения следует оценивать влияние различных погрешностей. Рассмотрим, например, вклад градиента температуры в термостате. Его наличие приводит к тому, что приписываемая исследуемому ТСП температура отличается от образцовой на значение градиента. Если зависимость градиента от температуры квадратичная, то вследствие того, что в диапазоне 0—420 °С используют три реперных точки (квадратичная функция отклонения), такой градиент не изменит поведения термометра в промежуточных точках. Таким образом, если ТСП подчиняется формулам МТШ-90, то наличие квадратичного градиента не изменит данного статуса, а просто приведет к неправильным значениям поправочных коэффициентов a и b функции отклонений $\Delta W_{90}(T)$.

По этой же причине основным требованием к «образцовому» термометру является требование его стабильности, при этом предполагается, что он имеет квадратичную функ-

цию отклонений, а его значение $\Delta T(T)$ равняется нулю. В противном случае оно войдет составной частью в аналогичную величину всех исследуемых ТСП. Так же искажающее влияние на результаты исследования окажет только та часть погрешности измерителя сопротивления, которая не описывается полиномом второй степени.

В табл. 1 приведены расширенная оценка суммарной погрешности и ее основные составляющие: погрешность измерения сопротивления исследуемого термометра (ПТС-10, ПТС-25 или ПТСВ-3), «образцового» термометра (ПТС-25) и градиенты температуры в термостате. Поэтому все погрешности представлены двумя величинами. Первая (верхняя в каждой строке) относится к градуировке термометров методом сравнения в термостате (без учета погрешности градуировочной характеристики эталонного термометра). Вторая (нижняя) — это погрешность за вычетом квадратичной составляющей. Именно ее значения характеризуют погрешность определения $\Delta T(T)$.

Аналогично представлен градиент температуры в термостате в виде двух величин для указанных температур.

Исследуемые термометры. Сведения о термометрах приведены в табл. 2. Все термометры, кроме эталонных ПТС-10 и ПТС-25, изготовлены в НПП «Элемер» из чувствительных элементов (ЧЭ) разных производителей. Термометры № 028 и № 203 являются эталонными, но по конструкции их ЧЭ близки к рабочим.

Результаты измерений. До настоящих измерений термометры многократно нагревали до 500 °С. Измерения проводили в 12—15 точках, равномерно распределенных в диапазоне температур 0—430 °С. Первой и последней измеренной точкой была 0 °С. Воспроизводимость сопротивления $R(0)$ после нагрева до 430 °С была не хуже $\pm 0,001$ °С для всех термометров, кроме № 050 ($\pm 0,006$ °С) и № 219 ($\pm 0,003$ °С).

Предварительная обработка экспериментальных данных показала, что при температурах 0—420 °С ИСХ платиновых термометров сопротивления описываются полиномом четвертой степени с погрешностью менее 0,002 °С, а полиномом пятой степени — с погрешностью менее 0,001 °С (табл. 3). Последняя величина связана не с неадекватностью модели, а обусловлена разбросом, характеризующим случайную составляющую погрешности измерений и неста-

Таблица 2

Сведения об исследуемых термометрах

Заводской номер термометра	Номинальное значение $R(0)$	$W(100)$	Изготовитель чувствительного элемента	Материал корпуса
028 (ПТСВ-3)	100	1,3917	ВНИИФТРИ	12X18H10T
203 (ПТСВ-3)	100	1,3927	То же	12X18H10T
070	100	1,3918	«Электротермометрия» (Луцк, Украина)	12X18H10T
072	100	1,3920	То же	12X18H10T
073	100	1,3920	»	12X18H10T
074	100	1,3920	»	12X18H10T
217	100	1,3815	Sensycon (Германия)	12X18H10T
218	100	1,3852	То же	12X18H10T
219	100	1,3835	»	12X18H10T
050	100	1,3849	»	12X18H10T
281 (ПТС-10М)	10	1,3927	«Эталон», Владимир	Кварц
5190 (ПТС-10)	10	1,3928	То же	Кварц
0703 (ПТС-25)	25	1,3927	ВНИИМ	Кварц

бильность ТСП. Полином третьей степени увеличивал погрешность до 0,02 °С.

Результаты применения интерполяции МТШ-90 и обработки полиномом различной степени приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты обработки данных полиномом n -й степени и интерполяции МТШ-90

Заводской номер термометра	Максимальный разброс, °С, при обработке полиномом n -й степени в диапазоне		Погрешность метода интерполяции МТШ-90, °С, при числе использованных точек в диапазонах		
	0 — 420 °С		0 — 420 °С	0 — 230 °С	
	$n = 4$	$n = 5$	три	две	три
281	0,002	0,001	0,002	0,003	0,001
5190	0,002	0,001	0,002	0,003	0,001
0703	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001
028	0,002	0,001	0,001	0,006	0,001
203	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001
070	0,002	0,001	0,004	0,002	0,001
072	0,002	0,001	0,007	0,002	0,001
073	0,002	0,001	0,007	0,003	0,001
074	0,002	0,001	0,005	0,003	0,001
217	0,002	0,001	0,030	0,130	0,013
218	0,002	0,001	0,008	0,022	0,006
219	0,007	0,007	0,015	0,009	0,009
050	0,005	0,004	0,018	0,015	0,015

Отметим, что погрешности эталонных термометров (0,001—0,002 °С) свидетельствуют о правильности расширенной оценки суммарной погрешности, приведенной в табл. 1.

Из табл. 3 следует, что по результатам градуировки в диапазоне 0—420 °С все термометры можно разбить на три группы. В первой группе, в которую входят эталонные термометры и термометры с ЧЭ производства ВНИИФТРИ, погрешность метода составляет порядка 0,002 °С. Заметим, что в этой группе термометр № 028 имеет $W(100) = 1,3917$, что заметно меньше рекомендуемого значения. Отклонения, наблюдаемые у термометров данной группы, скорее всего можно объяснить суммарной погрешностью всего оборудования. Однако обращает на себя внимание поведение ПТС-25 № 0703. Дело в том, что этот термометр имеет сопротивление, близкое к сопротивлению «образцового» термометра. В этом случае суммарная погрешность измерения минимальна, так как вклад в нее дает только градиент температуры. Тем не менее, $\Delta T(T)$ имеет явно выраженную зависимость от температуры при относительно небольшом разбросе контрольных точек (рис. 1).

Во вторую группу входят термометры с ЧЭ, изготовленные на заводе «Электротермометрия» (Луцк, Украина), с погрешностью до 0,007 °С. Это однотипные ТСП с $W(100) \approx 1,3920$ и одинаковой зависимостью $\Delta T(T)$ (рис. 1, б, № 072).

Третью группу образуют термометры с $W(100) \leq 1,3852$. Расхождение с МТШ-90 здесь составляет до 0,030 °С. Термометры № 050 и № 219 имеют заметно больший разброс точек по гра-

дуировочной кривой (см. табл. 3) и нестабильность $R(0)$. Термометр № 217 хотя и стабилен, но его ИСХ отличается повышенной «кривизной», а значение $W(100)$ аномально мало. По-видимому, качественным ЧЭ в этой группе обладает лишь ТСП № 218, функция $\Delta T(T)$ которого и приведена на рис. 1, б.

Из рис. 1, б следует, что характер зависимостей $\Delta T(T)$ у ТСП второй и третьей групп принципиально разный. Является ли это следствием большой разницы в $W(100)$ или разной конструкции ЧЭ, определенно можно сказать только при исследовании таких элементов из платины разной чистоты, но одного производителя. В пользу значительного влияния конструкции и технологии изготовления ЧЭ говорит тот факт, что, несмотря на близость второй группы термометров по чистоте платины к первой, по значению $\Delta T(T)$ она находится ближе к третьей (с учетом того, что у первой группы $\Delta T(T)$ практически на уровне погрешности измерений). Об этом же свидетельствует и поведение ИСХ термометра № 028 ($W(100) = 1,3917$), который имеет чистоту платины ниже, чем термометры из второй группы, но входящий в первую наряду с эталонными.

В диапазоне 0—230 °С градуировка в двух точках всех термометров, кроме третьей группы, обеспечивает погрешность в 0,003—0,006 °С (рис. 2, а, № 072). Градуировка в трех точках, в соответствии с МТШ-90 сводит ее к уровню погрешности измерений 0,001 °С (рис. 2, б, № 072). Для термометров третьей группы погрешность составляет порядка 0,007—0,022 °С при градуировке как в двух, так и в трех

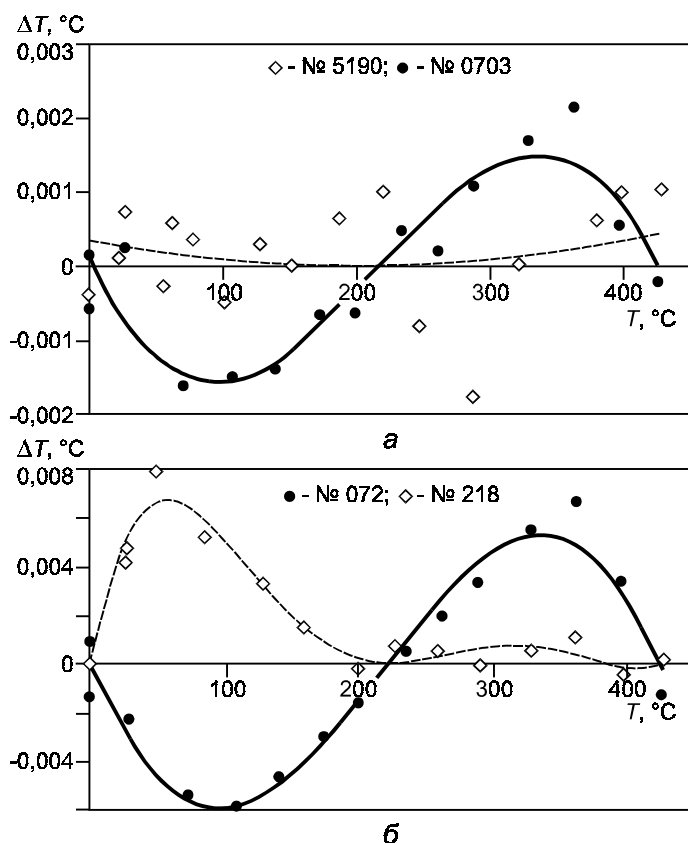


Рис. 1. Погрешность метода МТШ-90 в диапазоне 0—420 °С для эталонных (а) и рабочих (б) термометров

точках (см. табл. 3). Для них уменьшение диапазона не приводит к уменьшению погрешности в силу как специфичности ИСХ, так и повышенной нестабильности.

В заключение отметим следующее:

индивидуальные статические характеристики рабочих термометров отклоняются от интерполяционных формул МТШ-90. Тем не менее, в следующих пределах погрешностей метод МТШ-90 к рабочим термометрам применим в диапазоне 0—420 °С (погрешность интерполяции менее 0,01 °С); при температурах от 0 до 230 °С при двух градуировочных точках (погрешность менее 0,02 °С, а для большинства термометров менее 0,006 °С). При трех градуировочных точках погрешность может снижаться до 0,001 °С;

погрешность метода связана, по-видимому, не с различной чистотой платины, а с конструкцией и технологией изготовления ЧЭ;

применение МТШ-90 позволяет минимизировать количество точек градуировки: в диапазоне 0—420 °С требуется три точки, в диапазоне 0—230 °С — три или две точки;

градуировка в нескольких точках с последующей обработкой на обратный $T(W)$ полином имеет преимущество перед методом МТШ-90 в простоте обработки результатов градуировки и вычисления температуры. Однако при температурах от 0 до 420 °С для достижения максимально возможной точности требуется пять точек градуировки против трех

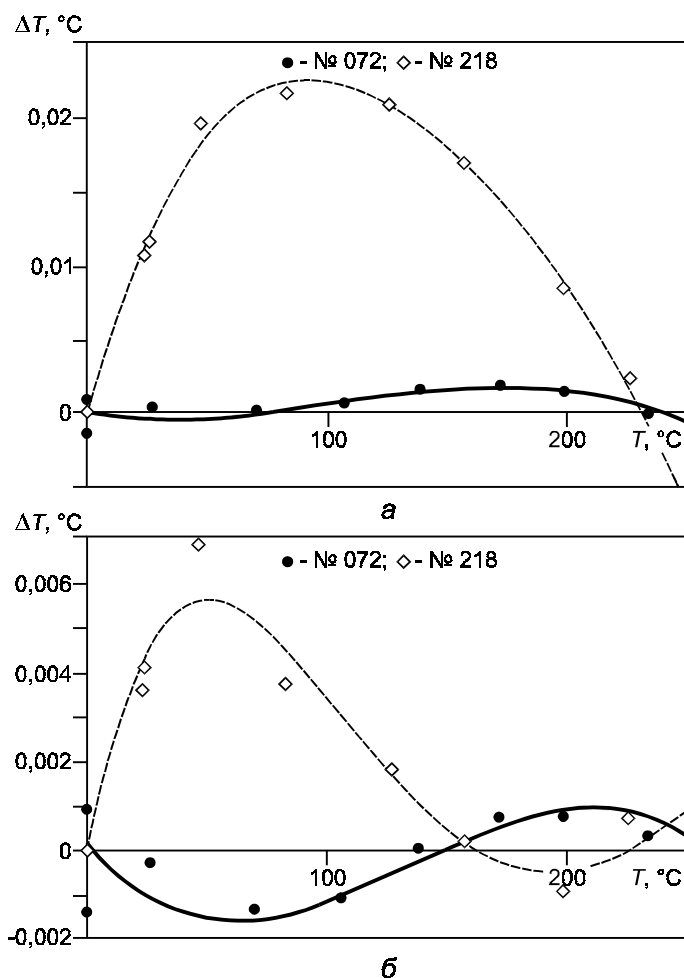


Рис. 2. Погрешность метода МТШ-90 для рабочих термометров в диапазоне 0—230 °С при градуировке в двух (а) и трех (б) точках

по методу МТШ-90 (если допустима методическая погрешность порядка 0,03 °С, достаточно и четырех точек).

К сожалению, среди исследованных ТСП не было термометров с $W(100) \approx 1,3910$ и достаточно стабильных термометров с $W(100) \approx 1,3850$, измерения которых, возможно, дали бы много дополнительной информации. Кроме этого, интерес представляют также пленочные термометры, так как многолетний опыт работы с ними показывает, что многие из них демонстрируют высокую стабильность. Особо следует отметить необходимость исследований эталонных термометров на более высоком уровне точности.

Литература

1. Моисеева Н. П. // Измерительная техника. — 2001. — № 5. — С. 39.
2. Моисеева Н. П. // Измерительная техника. — 2004. — № 11. — С. 39.

Дата одобрения 24.05.2006 г.