

МЕТОДИКА ПОВЕРКИ КОМПЛЕКТОВ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОСЧЕТЧИКОВ.

Васильев Е.В. (ВНИИМС, г. Москва),

Белевцев А.В., Каржавин А.В., Петров Д.В., Улановский А.А., Фетисова О.В (ПК «Тесей» г. Обнинск).

Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов находится в прямой зависимости от точности приборов учета количества и расхода тепловой энергии – теплосчетчиков. Ответственным узлом теплосчетчиков, во многом определяющим их точность, является комплект термопреобразователей сопротивления.

Отсутствие нормативной базы, устанавливающей как единые технические требования к комплектам термопреобразователей сопротивления, так и единые методы и средства их поверки, вынуждает производителей самостоятельно устанавливать нормы точности и разрабатывать методики поверки. Так и нашему предприятию, приступившему к производству комплектов термопреобразователей типа ТСПТК, пришлось разработать настоящую методику.

В процессе ее подготовки были рассмотрены технические характеристики комплектов термометров ведущих производителей, проекты ГОСТов на «Комплекты термопреобразователей сопротивления платиновых. Общие технические требования и методы испытаний». «Комплекты термопреобразователей сопротивления платиновых для теплосчетчиков. Методика поверки».

На наш взгляд в этих документах имеются следующие недостатки.

Во-первых, у многих производителей градуировка технических термометров, для которых зависимость $R(t)$ описывается полиномом второй степени согласно ГОСТ 6651-94, производится в двух точках 0 и 100 °С. Такой подход не обеспечивает нужную точность при подборе термометров сопротивления в комплекты, что подробно и обоснованно доказано в статьях В.А. Медведева и О.Е. Олевской, Ростест - Москва.

Во-вторых, в проектах ГОСТов устанавливаются завышенные требования к эталонным термометрам, причем рекомендованный термометр типа ПТС – 10 имеет два недостатка – большую минимальную глубину погружения и хрупкую стеклянную оболочку.

В-третьих, в этих проектах, погрешность комплекта при измерении разности температур предлагается контролировать в ограниченном количестве точек, что снижает достоверность поверки.

В настоящей статье представлена методика поверки комплектов термопреобразователей сопротивления (ТС) для теплосчетчиков, лишенная указанных недостатков. Методика основана на индивидуальной градуировке методом непосредственного сличения с эталонным термометром 3-го разряда типа ЭТС – 100 и построении интерполяционной зависимости $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ для каждого из ТС, входящего в комплект, по методу наименьших квадратов. Погрешность комплекта термометров контролируется как для прямого, так и для обратного включения термометров внутри области, определяемой диапазоном возможных температур и диапазоном разности температур с шагом в 1 °С, что существенно повышает достоверность получаемых результатов.

Определение индивидуальной статической характеристики (градуировка) каждого ТС, входящего в комплект ТСПТК.

Градуировка ТС, входящих в комплект ТСПТК, проводилась методом сравнения с эталонным термометром сопротивления. Замена эталонного термометра сопротивления в процессе поверки комплекта **не допускалась**.

Градуировка ТС проводилась на трех уровнях рабочего диапазона температур:

- $0 \pm 0,01$ (нулевой термостат);
- $100 \pm 1,00$ (жидкостной термостат);
- $160 + (5 \div 10)$ (жидкостной термостат).

При градуировке применялись средства измерений и вспомогательные средства, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Средства измерений и вспомогательные средства

Наименование средств измерений и вспомогательных средств	Нормативно – техническая характеристика
1 Эталонный термометр сопротивления типа ЭТС-100	Эталонный термометр сопротивления 3-го разряда по ГОСТ 8558-93
2 Многоканальный прецизионный измеритель температуры МИТ 8	Предел допускаемой основной абсолютной погрешности ($0.0005 + 10^{-5} R$), Ом
3 Термостат нулевой ТН-11	Воспроизводимая температура 0°C , СКО $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$
4 Термостат жидкостный «Термотест – 50...200 $^{\circ}\text{C}$ »	Перепад температур на высоте 100 мм - $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$, стабильность поддержания температуры $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$

Примечание: Допускается использовать средства поверки с показателями не хуже вышеперечисленных.

Измерения проводились путем последовательного опроса измерительных каналов прецизионного измерителя температуры МИТ -8 после наступления стационарного режима. Режим считался стационарным, если при проведении серии измерений, содержащей не менее 4 отсчетов по каждому каналу, величины сопротивления каждого термометра (включая эталонный) во всех отсчетах не отличаются друг от друга в температурном эквиваленте более, чем на величину 0.01°C .

Градуировка термометров сопротивления производилась не менее чем по 12 измерениям, а обработка результатов градуировки производилась методом наименьших квадратов с помощью компьютерной программы предприятия-изготовителя.

Результатом расчета являются найденные коэффициенты R_0 , A , B полинома второй степени вида:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \quad [1]$$

Обусловленность (устойчивость) решения, полученного методом наименьших квадратов, подтверждается величиной случайной погрешности $S_x = \sqrt{\frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n (R_{изм}^i - R_{расч}^i)^2}$, которая в температурном эквиваленте должна быть не более $\leq 0.01^{\circ}\text{C}$

Если величина случайной погрешности $S_x > 0.01^{\circ}\text{C}$, то это значит, что измерения выполнены не корректно или не в стационарном режиме, либо сам термометр не исправен.

По найденной зависимости определяются значения R_{100} и W_{100} . По полученным параметрам термометр проверяется на соответствие требованиям ГОСТ 6651-94 для классов А и В. Подбор пар производится из термометров, отвечающих требованиям ГОСТ 6651-94 по классу А или классу В. Оценка погрешности определения ИСХ каждого из термометров комплекта приведена в таблице 2.

Определение значений относительной погрешности комплекта ТСПТК при измерении разности температур

Значения относительной погрешности комплекта термометров при измерении разности температур находились как:

$$\delta\Theta = \frac{\Theta_u - \Theta_p}{\Theta_p} \times 100\% = \\ = \frac{(t_{u_1} - t_{u_2}) - (t_{p_1} - t_{p_2})}{\Theta_p} \times 100\% = \frac{(t_{u_1} - t_{p_1}) - (t_{u_2} - t_{p_2})}{\Theta_p} \times 100\%,$$

где Θ_u - измеренная разность температур и Θ_p - расчетная разность температур,
 t_{u_1} - "измеренное" значение температуры на подающем трубопроводе "1",
 t_{u_2} - "измеренное" значение температуры на обратном трубопроводе "2",
 t_{p_1} - "расчетное" значение температуры на подающем трубопроводе "1",
 t_{p_2} - "расчетное" значение температуры на обратном трубопроводе "2",

Относительная погрешность комплекта термометров вычислялась внутри области, определяемой рабочим диапазоном температур и диапазоном разности температур.

Для всех возможных значений Θ от $\Theta_{\text{мин}}$ до $\Theta_{\text{макс}}$ с шагом один градус задавали температуру t_{p_1} ("расчетную" температуру в данной точке) от $t = \Theta_{\text{мин}}$ до $t = t_{\text{макс}}$ с шагом один градус, что существенно повышает достоверность получаемых результатов.

Рассчитывали сопротивление R_t для температур t_p для каждого ТС по уравнению [1] с использованием найденных коэффициентов ИСХ.

Значения температур t_u определяли, решая квадратное уравнение относительно t_u :

$$t_u = [-A_n + \sqrt{A_n^2 + 4B_n \cdot ((R_t / R_{0n}) - 1)}] / 2B_n,$$

В формуле R_{0n} - номинальное сопротивление ТС при 0°C, A_n и B_n - номинальные значения температурных коэффициентов сопротивления платиновых ТС по ГОСТ 6651-94

Значение относительной погрешности комплекта термометров при поверке вычисляется как для схемы установки, при которой один термометр сопротивления располагается на подающем (горячем) трубопроводе, а второй на отводящем (холодном) трубопроводе, так и для обратной схемы установки ТС.

Полученные значения $\delta\Theta$ сравнивали с пределом допускаемой относительной погрешности, установленным в технической документации на комплекты термопреобразователей.

$$\text{класс 1 } \delta\Theta \leq \pm(0.25 + 1.5 \cdot \Theta_{\text{мин}} / \Theta) \%$$

$$\text{класс 2 } \delta\Theta \leq \pm(0.50 + 3.0 \cdot \Theta_{\text{мин}} / \Theta) \%$$

Класс 1 присваивается комплекту термометров сопротивления, если значения относительной погрешности комплекта при определении разности температур не превышает 0,7 величины предела допускаемой относительной погрешности, установленные для класса 1.

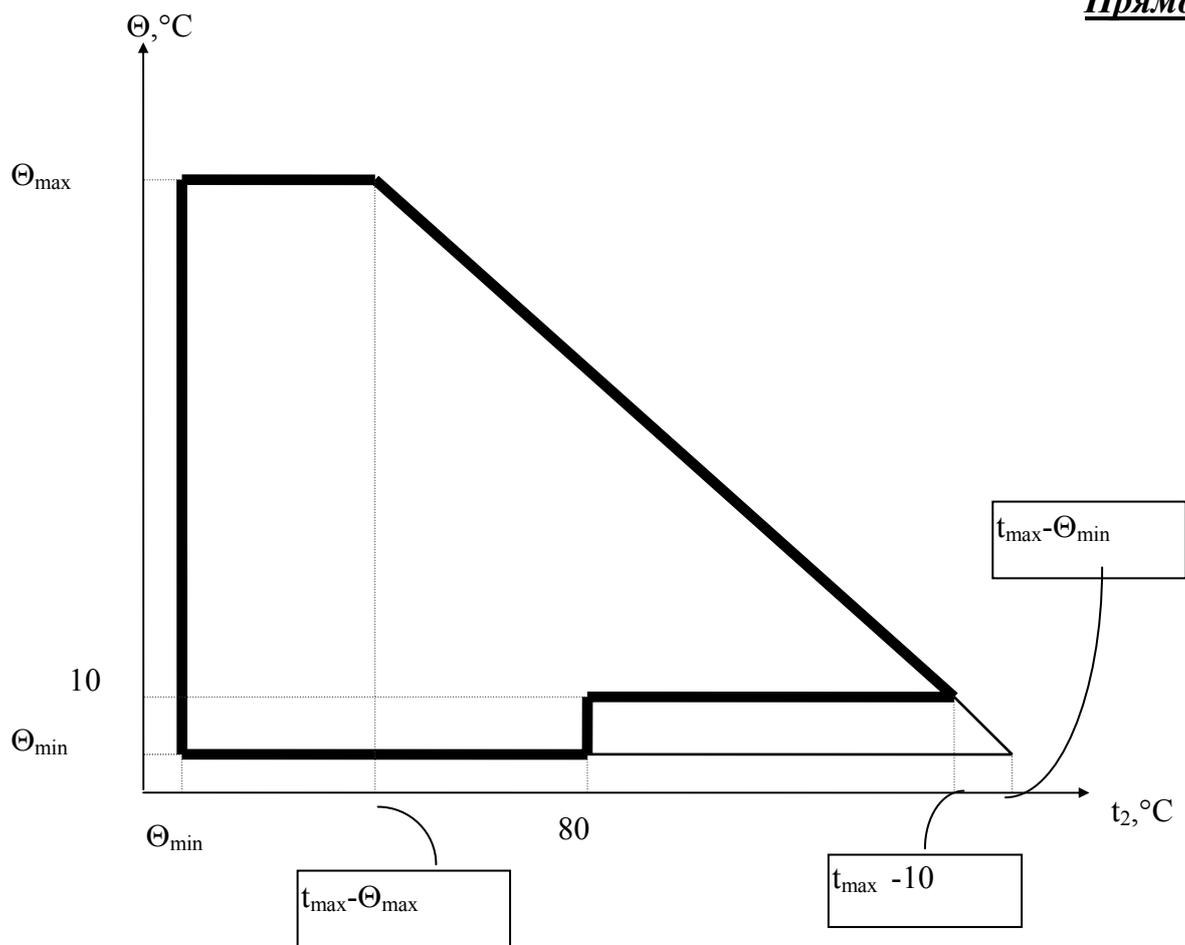
Класс 2 присваивается комплекту термометров сопротивления, если значения относительной погрешности комплекта при определении разности температур превышает 0,7 величины предела допускаемой относительной погрешности, установленные для класса 1, но не превышает величины 0,7 предела установленного для класса 2.

В протоколе поверки указывали значения для точки с максимальной относительной погрешностью определения разности температур комплектом термометров и для точек, в которых наиболее часто (что выявлено на основе статистических данных) значения относительной погрешности превышают предел, установленный в технической документации на комплекты термопреобразователей.

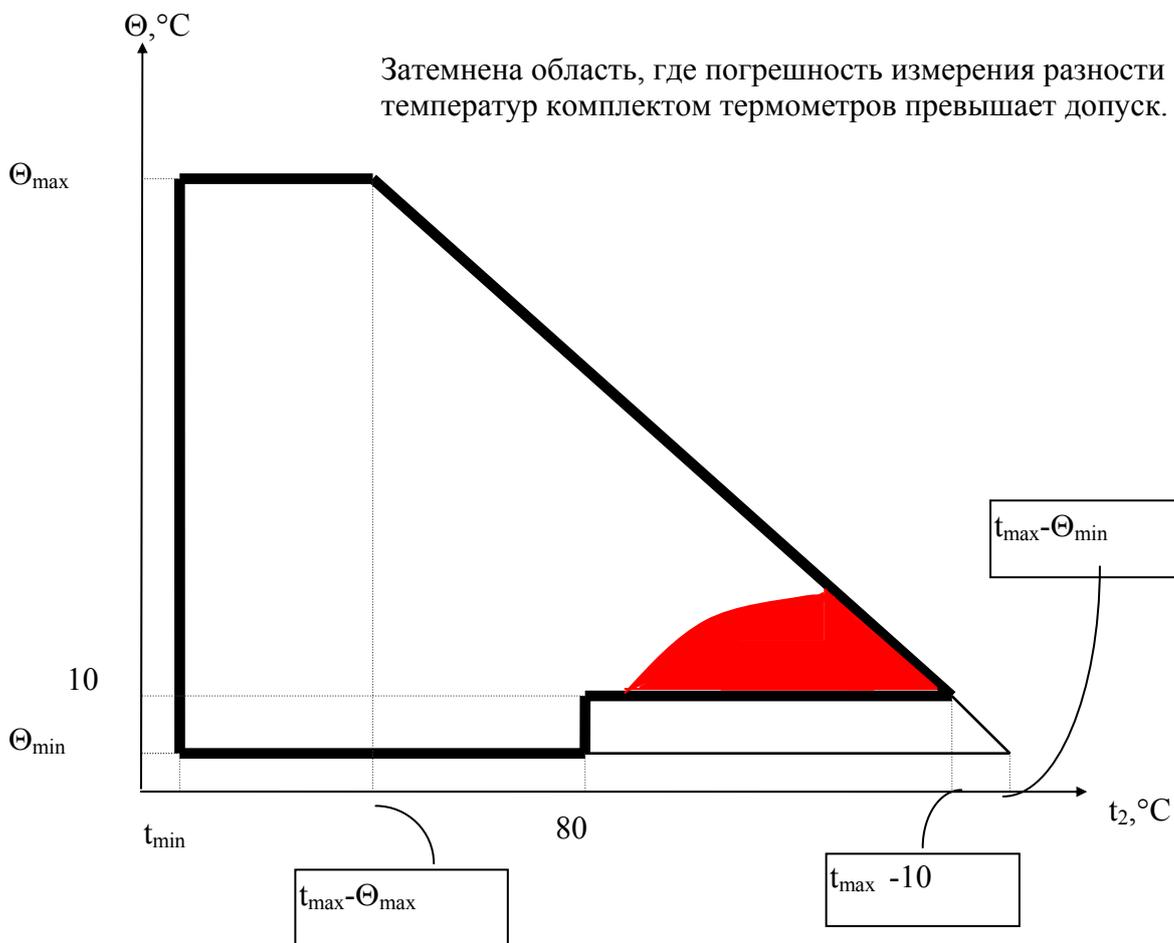
При дальнейших поверках рекомендуется для расчета значений относительной погрешности комплекта термометров во всей области возможных значений использовать программное обеспечение предприятия - изготовителя комплектов. В противном случае расчет относительной погрешности комплекта термометров производить в точках, представленных в прото-

коле предыдущей поверки. Пример графика поля погрешности и протокола поверки комплекта термометров показаны на рисунках.

Прямое включение



Обратное включение



Протокол № 41

Поверки комплекта термопреобразователей сопротивления платиновых

Серийный номер

"Г": 100/1

Тип: ТСПТК

"Х": 100/2

НСХ: 100П

Дата поверки: 31.10.2001

Рабочие диапазоны:

мин

макс

Температур:

0

160

Измеряемой разности температур:

5

150

Номинальное значение W_{100}

1,391

Параметры ИСХ для ТС №:	R_0	A	B	R_{100}	W
100/1	99,97982	3,9823E-03	-6,0428E-07	139,19083	1,392189
100/2	100,03161	3,9851E-03	-5,9820E-07	139,29720	1,392532

Значения погрешности измерения разности температур в семи точках рабочего диапазона:

"Прямое" включение:

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$(t_1-t_2), ^\circ\text{C}$	$T_{\text{гр}}(t_1), ^\circ\text{C}$	$T_{\text{хол}}(t_2), ^\circ\text{C}$	$(T_{\text{г}}-T_{\text{х}}), ^\circ\text{C}$	Разница, $^\circ\text{C}$	Допуск, $^\circ\text{C}$
5	0	5	4,964	0,08	4,885	0,115	0,175
85	80	5	85,179	80,411	4,768	0,232	0,175
160	150	10	160,324	150,671	9,652	0,348	0,2
160	10	150	160,324	10,123	150,201	-0,201	0,9
80	0	80	80,167	0,08	80,087	-0,087	0,55
100	25	75	100,212	25,187	75,025	-0,025	0,525

Максимум

84	80	4	84,176	80,411	3,765	0,235	0,17
----	----	---	--------	--------	-------	-------	------

"Обратное" включение:

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$(t_1-t_2), ^\circ\text{C}$	$T_{\text{гр}}(t_1), ^\circ\text{C}$	$T_{\text{хол}}(t_2), ^\circ\text{C}$	$(T_{\text{г}}-T_{\text{х}}), ^\circ\text{C}$	Разница, $^\circ\text{C}$	Допуск, $^\circ\text{C}$
5	0	5	5,101	-0,051	5,152	-0,152	0,175
85	80	5	85,431	80,167	5,263	-0,263	0,175
160	150	10	160,706	150,308	10,399	-0,399	0,2
160	10	150	160,706	9,98	150,727	-0,727	0,9
80	0	80	80,411	-0,051	80,462	-0,462	0,55
100	25	75	100,488	25,024	75,465	-0,465	0,525

Максимум

84	80	4	84,427	80,167	4,26	-0,26	0,17
----	----	---	--------	--------	------	-------	------

Комплект

Не годен

t_1 - температура в подающем трубопроводе, t_2 - температура в обратном трубопроводе

(t_1-t_2) – разность температур

$T_{\text{гр}}(t_1)$ - измеренное значение температуры в подающем трубопроводе,

$T_{\text{хол}}(t_2)$ - измеренное значение температуры в обратном трубопроводе

$(T_{\text{г}}-T_{\text{х}})$ – измеренная разность температур, **Разница** – $(t_1-t_2) - (T_{\text{г}}-T_{\text{х}})$

Поверитель _____.

Оценка погрешности определения индивидуальной статической характеристики (ИСХ) каждого из термометров сопротивления комплекта.

Таблица 2 – Погрешности градуировки термопреобразователей сопротивления

Вид погрешности	Предельная величина погрешности, °С для температуры		
	0 °С	100 °С	160 °С
<p>1. Суммарная неисключенная систематическая погрешность, $Q_{\Sigma} = 1.1\sqrt{Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2} = 1.1\sqrt{\sum_{i=1}^m Q_i^2}$, в т.ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - предел доверительной погрешности ЭТС-100 - погрешность, вызванная градиентом и дрейфом температура в термостатах - погрешность измерения сопротивления 	<p>± 0,025</p> <p>± 0,020</p> <p>± 0,01</p> <p>± 3.8·10⁻³</p>	<p>± 0,029</p> <p>± 0,024</p> <p>± 0,01</p> <p>± 4.9·10⁻³</p>	<p>± 0,033</p> <p>± 0,029</p> <p>± 0,01</p> <p>± 5.9·10⁻³</p>
<p>2. Случайная погрешность градуировки</p> <p>$\varepsilon = \tau S_x$, где S_x - среднее квадратичное отклонение сопротивления $R^i_{расч}$, рассчитанное по найденному полиному второй степени от значения $R^i_{изм}$ - измеренного значения для данной температуры $S_x = \sqrt{\frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n (R^i_{изм} - R^i_{расч})^2}$, n - число точек градуировки.</p> <p>$\tau = 2.31$ - коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности P=0,95 и n=12</p>	<p>± 0,0231 °С</p> <p>$S_x \leq 0,01$ (область значений S_x, при которых результаты градуировки признаются достоверными)</p>		
<p>3. Суммарное среднее квадратичное отклонение результата измерения $S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{Q_i^2}{3} + S_x^2}$</p>	<p>± 0.016</p>	<p>± 0.018</p>	<p>± 0.02</p>
<p>4. Суммарная погрешность результата измерения (погрешность градуировки) $\Delta = K S_{\Sigma}$, где K - эмпирический коэффициент</p> <p>$K = \frac{\varepsilon + Q_{\Sigma}}{S_x + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{Q_i^2}{3}}}$</p>	<p>± 0.034</p> <p>2,081</p>	<p>± 0.038</p> <p>2,065</p>	<p>± 0.041</p> <p>2,052</p>

Таким образом, максимальная погрешность градуировки ТС при температуре 160 °С равна $\Delta_r^{\max} = \pm 0,041$ °С

Оценка погрешности измерения разности температур комплектом термометров сопротивления.

В общем случае, погрешность определения разности температур комплектом ТС равна сумме погрешностей определения температуры каждым ТС. Из таблицы 2 видно, что основной составляющей общей погрешности градуировки ТС, зависящей от температуры, является погрешность ЭТС. Погрешность градуировки ТС без учета погрешности ЭТС практически одинакова для разных уровней температур.

Таким образом, погрешность определения разности температур $\Delta\Theta$ можно представить в виде суммы погрешностей Δ_r определения ИСХ каждого из ТС, входящих в комплект, (без учета погрешности ЭТС) и погрешности определения разности температур Δ_s , обусловленную величиной погрешности ЭТС:

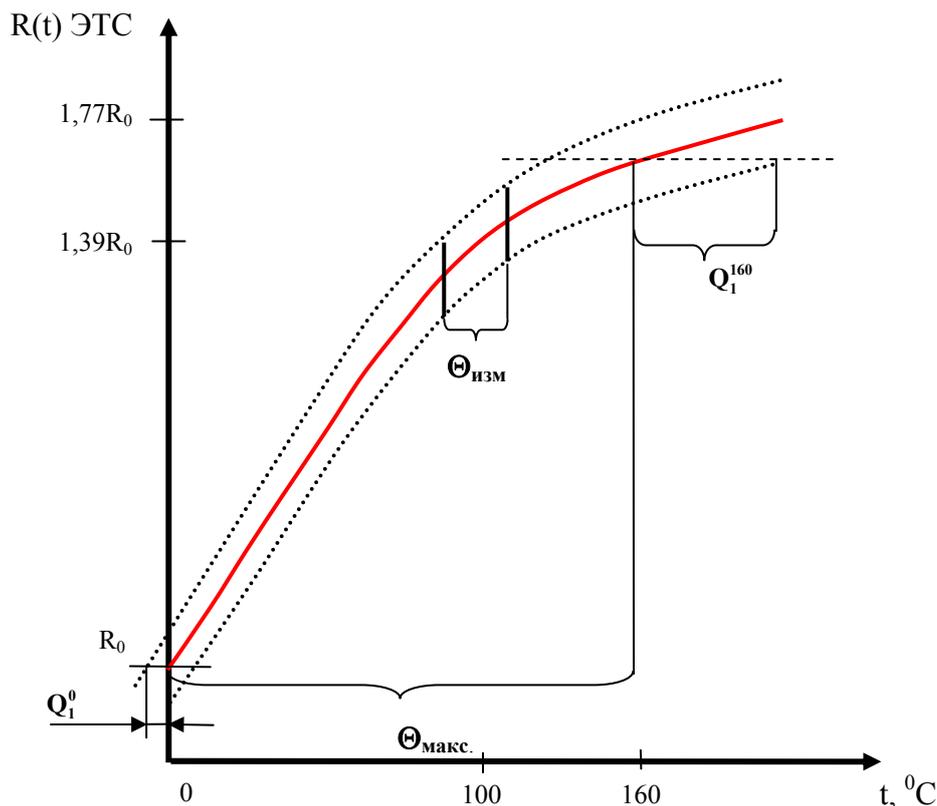
$$\Delta\Theta = 1.1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta_r^2 + \Delta_s^2}$$

Максимальная величина погрешности Δ_s , вносимая ЭТС при измерении максимальной разности температур, составит

$$\Delta_{s\text{макс}} = |Q_1^0| + |Q_1^{160}|, \text{ где}$$

Q_1^0 - погрешность ЭТС при минимальной температуре 0°C , равная $0,020^\circ\text{C}$

Q_1^{160} - погрешность ЭТС при максимальной температуре 160°C , равная $0,029^\circ\text{C}$



Очевидно, что при измерении разности температур $\Theta_{\text{изм}}$, составляющей небольшую часть рабочего диапазона измерений $\Theta_{\text{макс}}$ (см. график), погрешность Δ_s , вносимая ЭТС, будет меньше максимальной $\Delta_{s\text{макс}}$, так как градуировка ТС, входящих в комплект, проводилась одновременно по одному и тому же ЭТС, а зависимость $R(t)$ ЭТС является монотонной функцией.

Предполагая линейную зависимость погрешности ЭТС от температуры, можно представить погрешность Δ_s измерения заданной разности температур $\Theta_{\text{изм}}$, линейной функцией вида:

$$\Delta_{\theta} = \Delta_{\theta_{\text{макс}}} \cdot \frac{\Theta_{\text{изм}}}{\Theta_{\text{макс}}}, \text{ достигающей максимального значения при наибольшей измеряе-}$$

мой разности температур.

Значения возможной погрешности Δ_{θ} , вносимой ЭТС, при измерении разности температур представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Погрешность, вносимая ЭТС при измерении заданной разности температур

Уровень / Разность температур, °С	Максимально возможная погрешность Δ_{θ} , вносимая ЭТС, °С	Максимальная погрешность градуировки термометра Δ_T без учета вклада погрешности ЭТС, °С	Погрешность комплекта $\Delta\Theta$ при измерении разности температур, °С	Предел допускаемой погрешности при измерении разности температур, °С при $\Theta_{\text{мин}} = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
160 – 157 / 3	± 0,0009	± 0,026	± 0,038	± 0,105
160 – 150 / 10	± 0,0031		± 0,039	± 0,140
160 – 140 / 20	± 0,0062		± 0,041	± 0,190
160 – 130 / 30	± 0,0093		± 0,042	± 0,240
160 – 120 / 40	± 0,0125		± 0,044	± 0,290
160 – 110 / 50	± 0,0156		± 0,046	± 0,340
160 – 100 / 60	± 0,0187		± 0,048	± 0,390
160 – 90 / 70	± 0,0218		± 0,050	± 0,440
160 – 80 / 80	± 0,0249		± 0,051	± 0,490
160 – 70 / 90	± 0,0280		± 0,053	± 0,540
160 – 60 / 100	± 0,0312		± 0,055	± 0,590
160 – 50 / 110	± 0,0343		± 0,057	± 0,640
160 – 40 / 120	± 0,0374		± 0,058	± 0,690
160 – 30 / 130	± 0,0405		± 0,060	± 0,740
160 – 20 / 140	± 0,0436		± 0,062	± 0,790
160 – 10 / 150	± 0,0467		± 0,064	± 0,840
160 – 5 / 155	± 0,0483		± 0,065	± 0,865

Максимальная погрешность градуировки ТС Δ_T без учета погрешности эталонного термометра составляет 0,026 °С.

В общем виде погрешность измерения разности температур комплектом ТС можно представить в виде:

$$\Delta\Theta = 0,037 + 1,79 \cdot 10^{-4} \Theta$$

Т.к. погрешность комплекта при измерении разности температур не менее чем в 1,4 раза меньше нормируемого допуска для класса 1 и не менее чем в 2,8 раза меньше нормируемого допуска для класса 2, можно говорить о достоверности представленной методики поверки.

Заключение:

Описанная выше методика поверки в совокупности с программным обеспечением обладает следующими основными чертами:

1. Индивидуальная градуировка методом непосредственного сличения с эталонным термометром 3-го разряда типа ЭТС, обладающим повышенной механической прочностью и малой минимальной глубиной погружения, проводится на трех уровнях температуры $-0, 100$ и 160 °С. Интерполяционная зависимость $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ для ТС, входящих в комплект, находится по методу наименьших квадратов.

2. Значение относительной погрешности комплекта термометров при поверке находится как для схемы установки, при которой один термометр сопротивления располагается на подающем (горячем) трубопроводе, а второй на отводящем (холодном) трубопроводе, так и для обратной схемы установки ТС. При этом вычисление погрешности производится внутри всей области, определяемой диапазоном рабочих температур и диапазоном измерения разности температур с шагом в один градус по обеим осям, что повышает достоверность получаемых результатов.

3. Автоматизированная система обработки исходных данных позволяет оперативно обрабатывать большие массивы данных за короткий промежуток времени и оперативно варьировать параметрами обработки.