

**ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
ПЬЕЗОКВАРЦЕВЫХ ДАТЧИКОВ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ АНАЛИЗЕ
ИХ ГРАДУИРОВОК
В ТЕЧЕНИЕ 1990 – 2009 гг.**

А.П. Алексеев, В.И. Забурдаев, В.М. Ким

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

В статье представлены результаты анализа стабильности пьезокварцевых датчиков температуры при поверке и градуировке их в МГИ НАН Украины по рабочему эталону температуры типа ПТС-10.

Введение. Для поверки и градуировки рабочих средств измерений (СИ) температуры, применяемых в научно-исследовательских работах Морского гидрофизического института НАН Украины в экспедиционных и лабораторных условиях используются пьезокварцевые датчики температуры (ПДТ), разработанные и изготовленные Омским политехническим институтом.

Принципиальная электрическая схема ПДТ показана на рисунке 1, а основные технические характеристики приведены в таблице 1 [1].

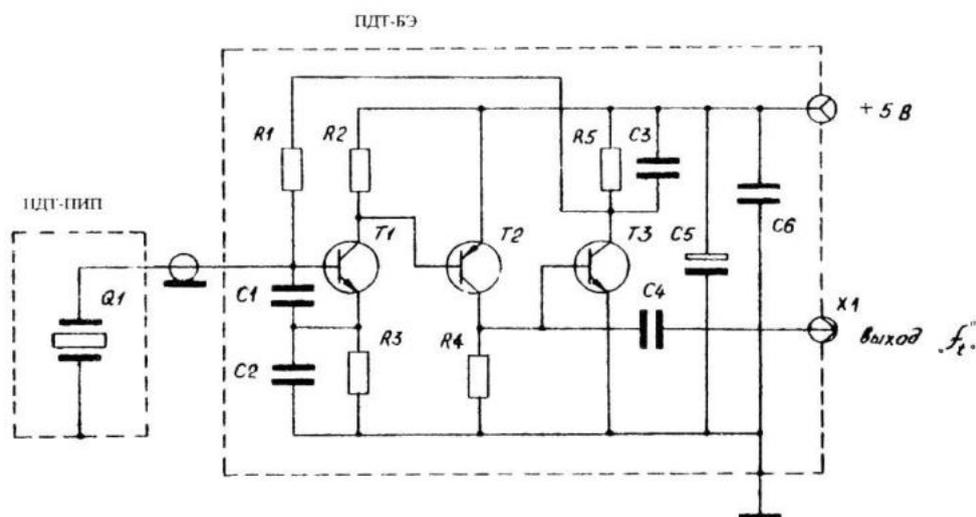


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная ПДТ

ПДТ-ПИП – первичный измерительный преобразователь (помещается в воду);

ПДТ-БЭ – блок электронный (подключается к источнику питания и на вход частотомера).

Таблица 1 – Основные технические характеристики ПДТ

Диапазон измерений	Средняя чувствительность	Диапазон изменения частоты	Напряжение питания	Потребляемый ток	Показатель тепловой инерции в воде	Погрешность аппроксимации полиномом 3-й степени
минус 2 + 40 °С	800 Гц / °С	980200 ÷ 1013800 Гц	+ 5 В	не более 5 мА	не более 10 с	не более 0,003 °С

Простота и удобство использования ПДТ в полевых условиях на метеорологических станциях, в экспедиционных условиях на морских платформах или на научно-исследовательских судах позволяют с достаточно высокой точностью поверять или градуировать рабочие СИ температуры.

В настоящей статье приводятся результаты исследования метрологических характеристик двух образцов ПДТ (заводские номера 3, 25), исследованных в отделе метрологии МГИ НАН Украины в течение 1990–2009 гг.

Установка и методика проведения исследований метрологических характеристик ПДТ. На рисунке 2 представлена структурная схема установки УРИЕ.441219.001 [2], которая использовалась для исследования метрологических характеристик ПДТ, в состав которой входил термостат с регулировкой поддержания температуры, изготовленный на базе автомобильного холодильника типа

«КВАРЦ х17». В нем были исследованы разности температуры между пятью точками по внутреннему объёму термостата при установленных значениях температуры (0, 8, 16, 25, 35) °С. Разности температуры в отдельных точках термостата измерялись платиновым термометром сопротивления ТСП с показателем тепловой инерции в жидкости не более 2 с.

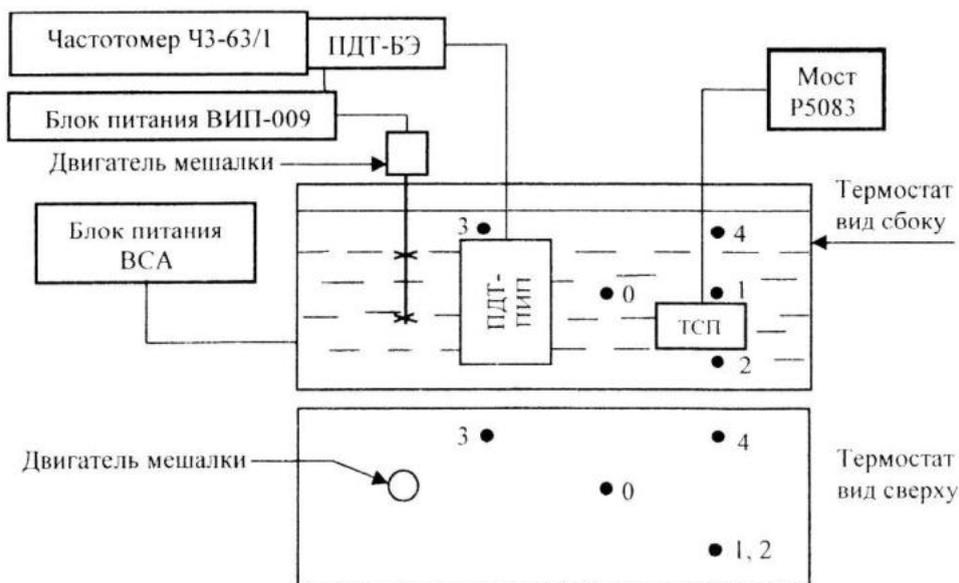


Рисунок 2 – Структурная схема установки УРИЕ.441219.001

При всех значениях температуры разность температуры между опорной (0) и контролируемой точкой не превышала 0,002 °С. Средняя скорость изменения температуры в термостате в течение трёх секунд (время проведения измерений при градуировке) не выходила за пределы 0,0007 °С/с.

При градуировке ПДТ в качестве рабочего эталона применялся платиновый термометр сопротивления ПТС-10 № 985 с погрешностью измерений не более 0,002 °С.

Результаты исследований метрологических характеристик ПДТ. Массив данных за период с 1990 по 2009 годы содержит в общей сложности около 70 градуировок через трёхмесячный интервал времени в пяти точках шкалы температуры с четырёхкратным отсчётом в каждой точке, что соответствует общему массиву синхронных отсчётов ПДТ и рабочего эталона температуры, равному 1400 отсчётам для каждого градуируемого ПДТ.

На рисунке 3 показан массив разности в показаниях ($\Delta_i = t_i - t_{90}$), между градуируемым ПДТ номер 3 (t_i) и значением темпера-

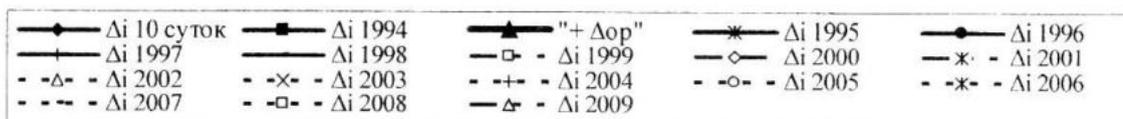
туры эталонного термометра (t_{90}), в предположении, что за все годы использовались коэффициенты градуировочной характеристики (КГХ), полученные в 1990 году. Аналогичные данные по ПДТ номер 25 представлены на рисунке 4.

Как видно из этих рисунков, долговременная нестабильность каждого ПДТ не превышает $\pm 0,015$ °С за 19 лет.

На рисунках 5 и 6 представлены погрешности измерения ПДТ номер 3 и ПДТ номер 25 при ежеквартальной градуировке в течение 2008 года в функции от температуры.

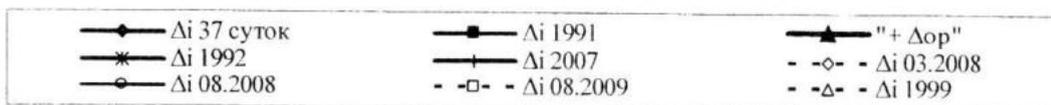
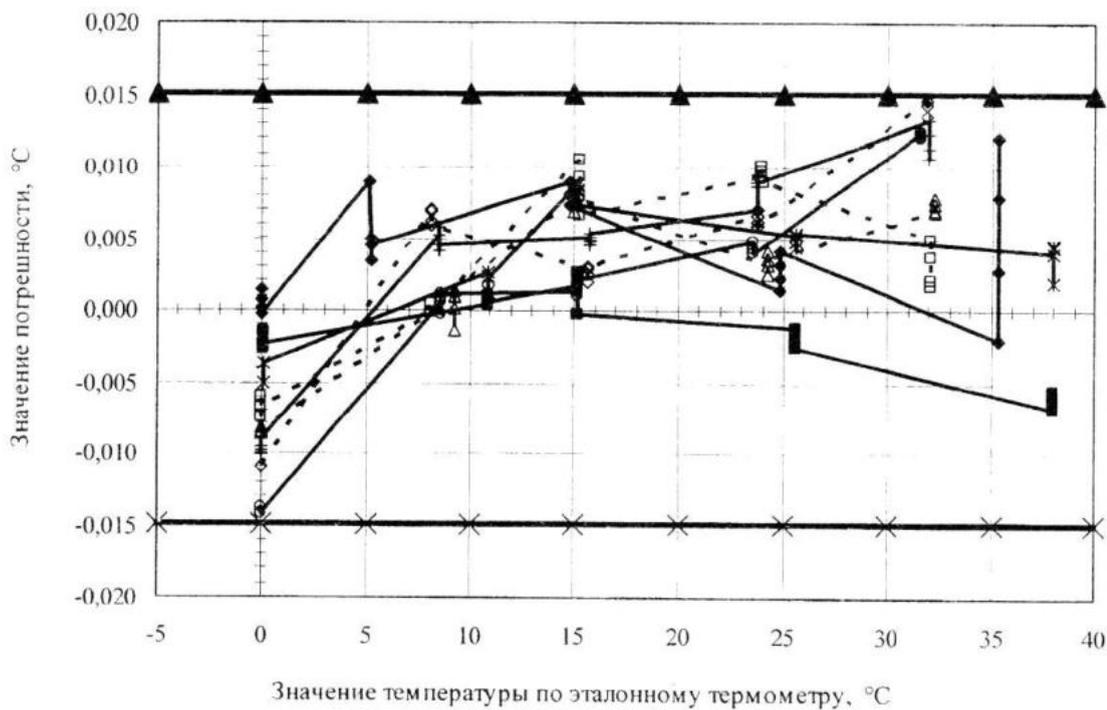
На рисунках 7 и 8 показана изменчивость погрешности измерений температуры ПДТ номер 3 и номер 25 в зависимости от времени (по годам), из которых видно, что замеченный временной тренд возрастания погрешности не превышает 0,0025 – 0,004 °С в год.

Там, где погрешности измерений минимальны и между собой равны (1998 г. для ПДТ номер 3 и 2007 г. для ПДТ номер 25), очевидно проведена качественная градуировка (без погрешностей оператора).



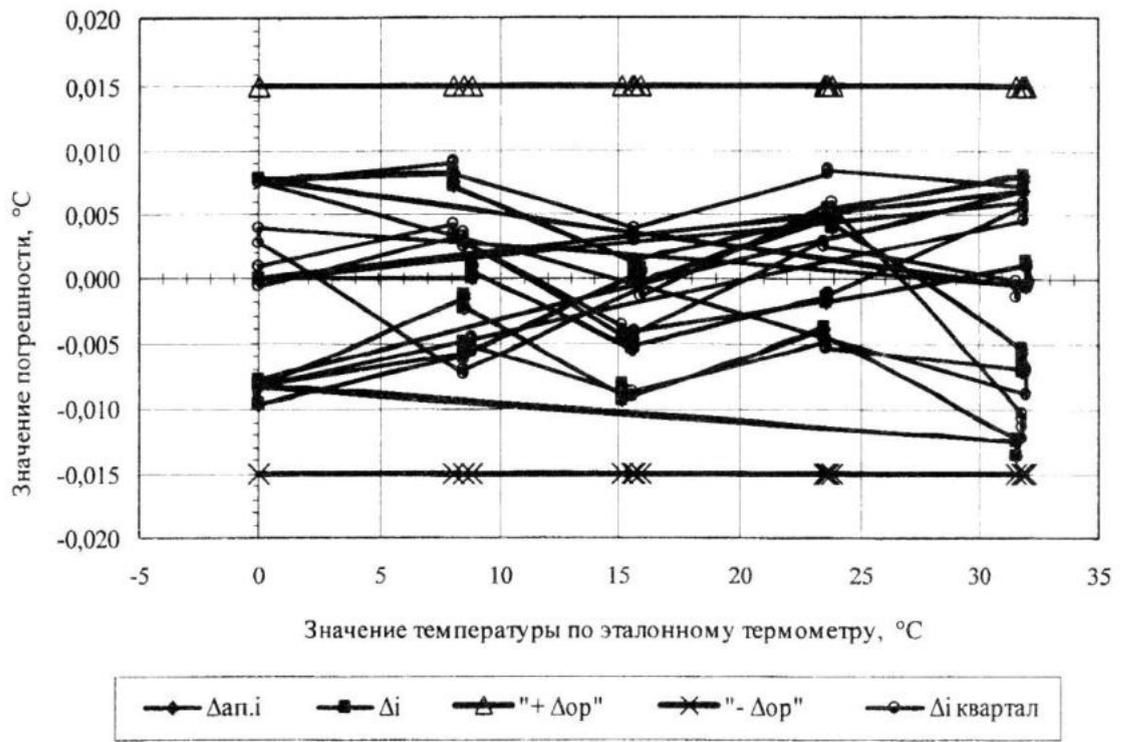
Градуировочная характеристика ПДТ $T_i = C_0 + N_T \times [C_1 + N_T \times (C_2 + N_T \times C_3)]$, где $N_T = F_i - 9900000$
 Коэффициенты градуировочной характеристики ПДТ № 3 от 24.09.1990 г.
 $C_0 = -91,29649$; $C_1 = 0,001376738$; $C_2 = -1,89267E-09$; $C_3 = 3,06692E-15$

Рисунок 3 – Значения разности показаний ПДТ номер 3 при использовании КГХ от 1990 г.



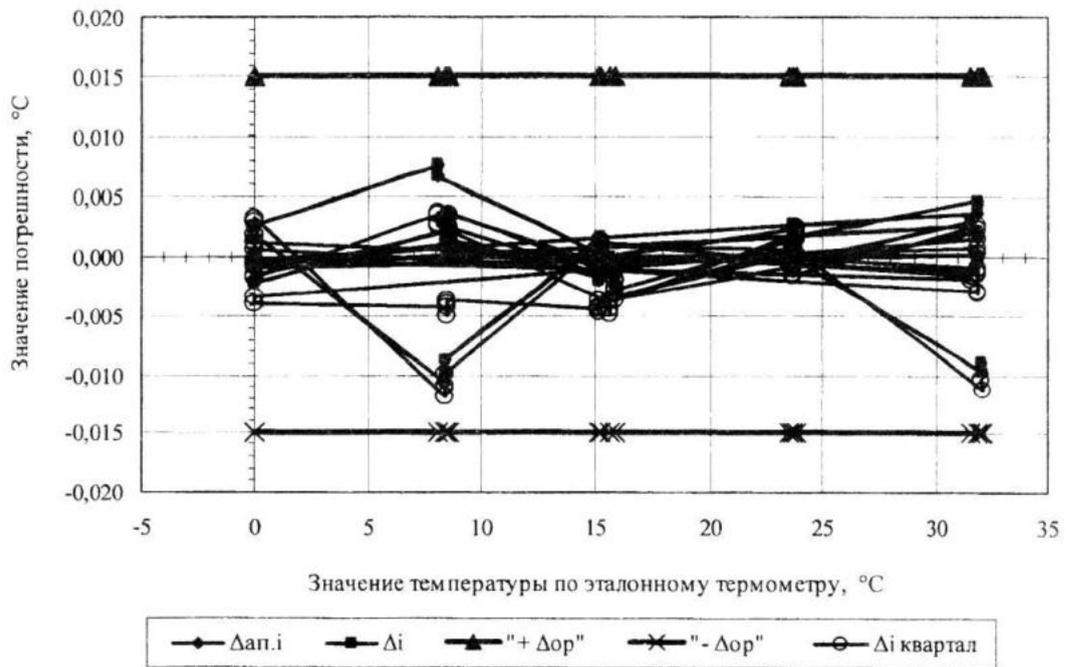
Коэффициенты градуировочной характеристики ПДТ № 25 от 14.11.1990 г.
 $C_0 = -46,8685$; $C_1 = 0,001241516$; $C_2 = -1,10453E-09$; $C_3 = -1,06724E-17$

Рисунок 4 – Значения разности показаний ПДТ номер 25 при использовании КГХ от 1990 г.



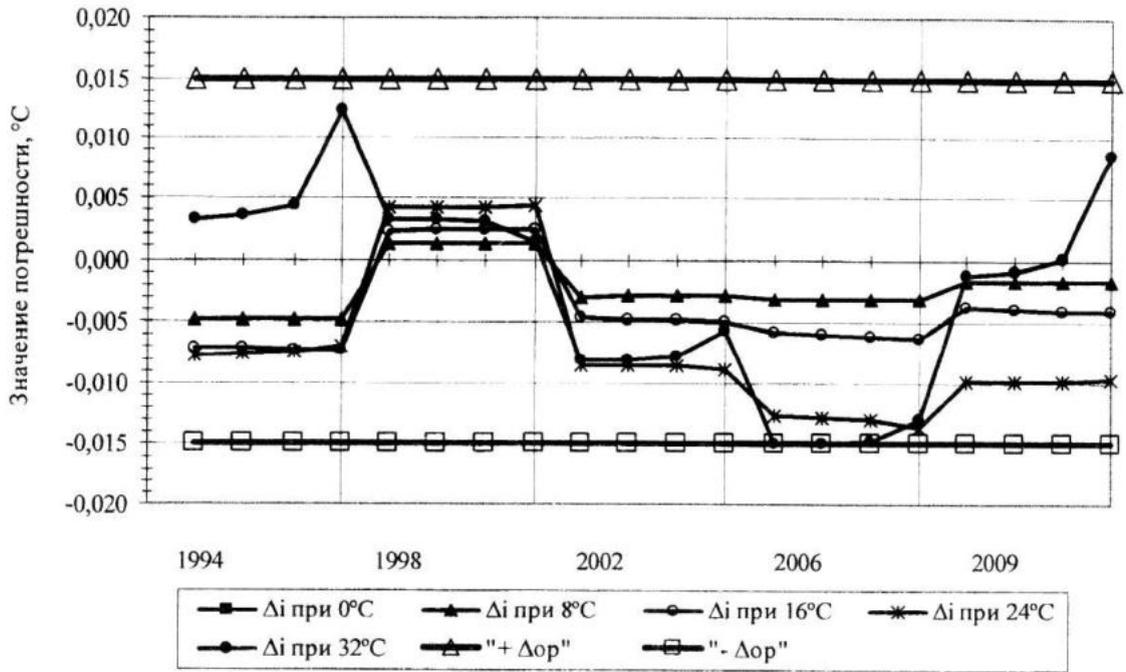
Коэффициенты градуировочной характеристики ПДТ № 3 по данным 2008 г.
 $C_0 = -91,45590$; $C_1 = 1,380055E-03$; $C_2 = -1,90595E-09$; $C_3 = 3,02157E-15$

Рисунок 5 – Значения разности показаний ПДТ номер 3 при ежеквартальной градуировке



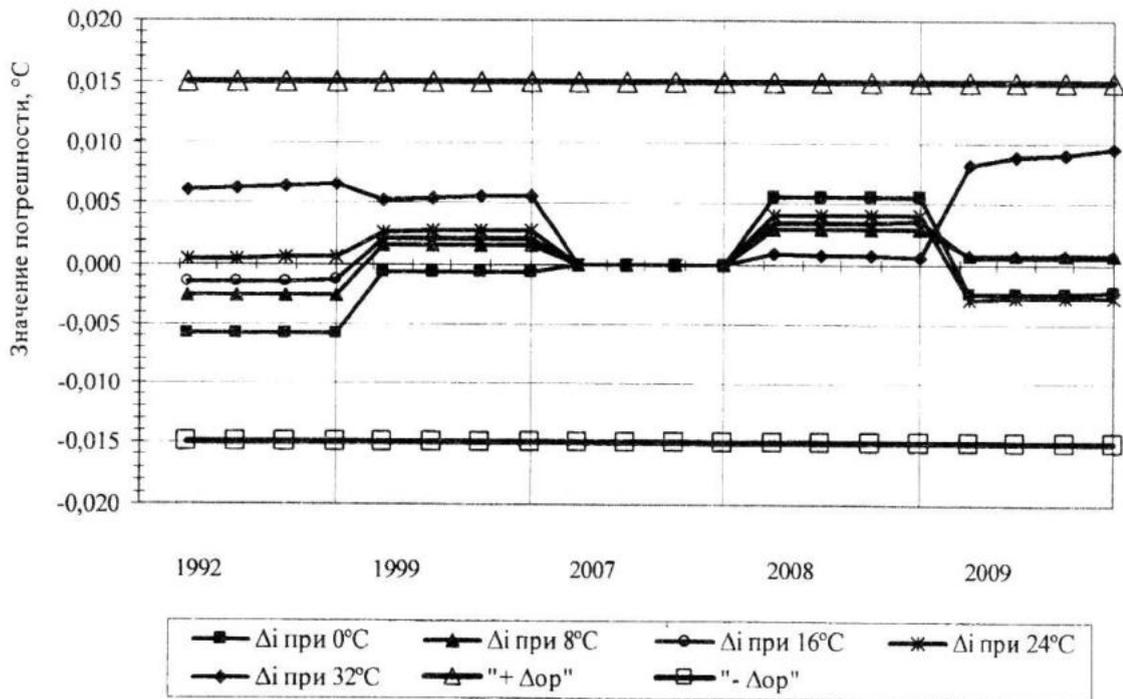
Коэффициенты градуировочной характеристики ПДТ № 25 по данным 2008 г.
 $C_0 = -46,32457$; $C_1 = 1,212408E-03$; $C_2 = -5,862163E-10$; $C_3 = -3,101753E-15$

Рисунок 6 – Значения разности показаний ПДТ номер 25 при ежеквартальной градуировке



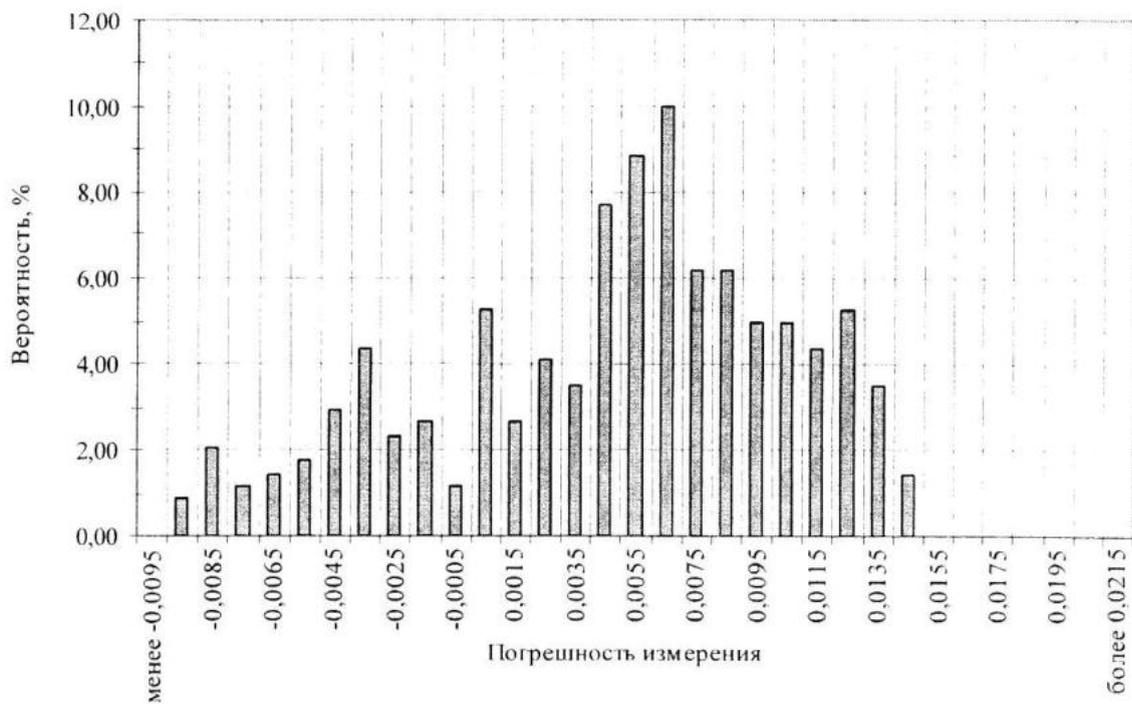
Коэффициенты градуировочной характеристики ПДТ № 3 от 24.09.1990 г.
 $C_0 = -91,29649$; $C_1 = 1,376738E-03$; $C_2 = -1,892669E-09$; $C_3 = 3,066916E-15$

Рисунок 7 – Изменчивость погрешности измерений температуры ПДТ номер 3 по годам



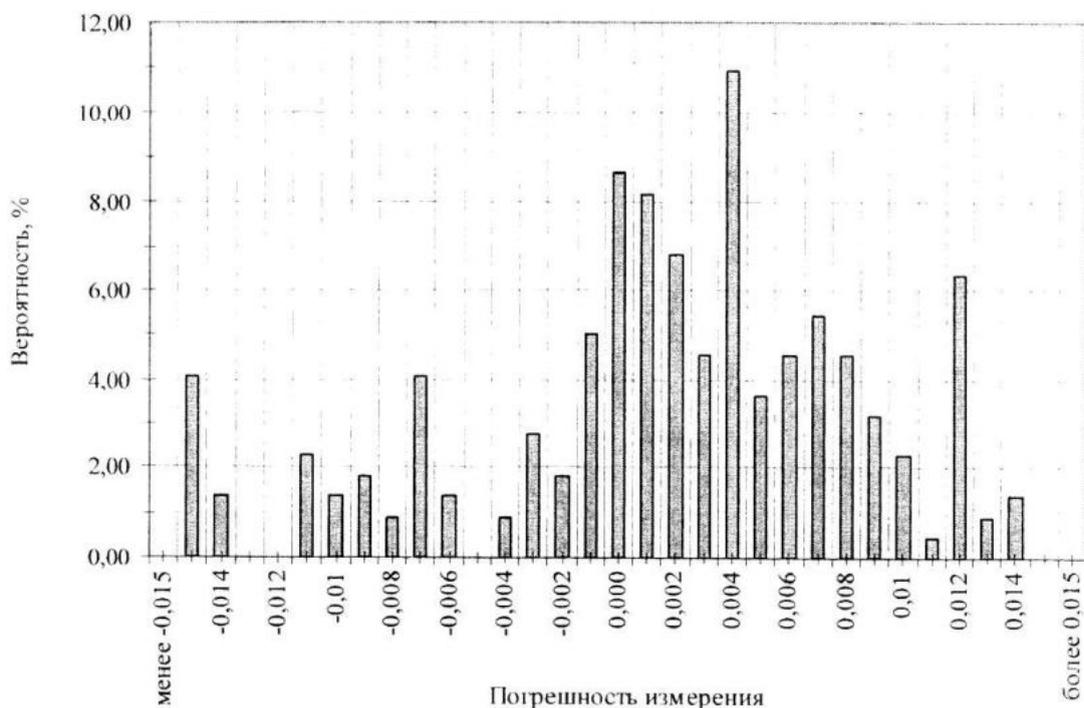
Коэффициенты градуировочной характеристики ПДТ № 25 от 21.12.1990 г.
 $C_0 = -46,32284$; $C_1 = 1,212112E-03$; $C_2 = -5,821553E-10$; $C_3 = -3,109520E-15$

Рисунок 8 – Изменчивость погрешности измерений температуры ПДТ номер 25 по годам



Коэффициенты градуировочной характеристики ПДТ № 3 от 24.09.1990 г.
 $C_0 = -91,29649$; $C_1 = 1,376738E-03$; $C_2 = -1,892669E-09$; $C_3 = 3,066916E-15$

Рисунок 9 – Гистограмма распределения погрешностей измерений температуры ПДТ номер 3



Коэффициенты градуировочной характеристики ПДТ № 25 от 14.11.1990 г.
 $C_0 = -46,86850$; $C_1 = 1,241516E-03$; $C_2 = -1,104526E-09$; $C_3 = -1,067239E-17$

Рисунок 10 – Гистограмма распределения погрешностей измерений температуры ПДТ номер 25

На рисунках 9 и 10 приведены гистограммы распределения погрешности измерений ПДТ номер 3 и номер 25 за всё время эксплуатации (19 лет), которая хорошо подтверждает, что погрешности измерения при градуировках близки к нормальному закону распределения.

При использовании ПДТ в качестве образцового средства при поверках (калибровках) или градуировках рабочих средств измерений температуры необходимо знать оценку неисключённой систематической погрешности (НСП) ПДТ, которую определяют следующие составляющие:

– неоднородность температуры в термостате – Δ_d ;

– средняя квадратическая погрешность аппроксимации градуировочной характеристики ПДТ – S ;

– неисключённая составляющая погрешности рабочего эталона температуры (использовался ПТС-10) – $\Delta_{рЭ}$.

Как уже было показано ранее, неоднородность температуры в термостате не превышает $\Delta_d = 0,002$ °С.

При исследовании качества аппроксимации градуировочной характеристики ПДТ полиномами различной степени были установлены следующие оценки достоверности аппроксимации R^2 :

– полиномом первой степени
 $R^2 = 0,999926$;

– полиномом второй степени
 $R^2 = 0,9999967$;

– полиномом третьей степени
 $R^2 = 0,9999970$;

– полиномом четвёртой степени
 $R^2 = 0,9999971$.

Наиболее оптимальным градуировочным уравнением для ПДТ является полином третьей степени, при котором погрешность аппроксимации не превышает $S \leq 0,002$ °С.

Допускаемая погрешность рабочего эталона температуры на базе ПТС-10 $\Delta_{рЭ} = 0,002$ °С.

Тогда в соответствии с рекомендациями [3] оценка границ НСП для ПДТ при доверительной вероятности $P = 0,997$ для нормального закона распределения погрешности будет равна:

$$\begin{aligned} \Theta &= \pm K \cdot \sqrt{\Delta_d^2 + S^2 + \Delta_{рЭ}^2} = \\ &= \pm 3 \cdot \sqrt{4 \cdot 10^{-6} + 9 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-6}} = \\ &= \pm 0,012 \text{ °С,} \end{aligned}$$

где K – коэффициент зависимости отдельных НСП от выбранной доверительной вероятности P в соответствии с [4] ПРИЛОЖЕНИЕ 2, при $P = 0,997$, $K \approx 3$.

Заключение. Как показали результаты долговременных исследований пьезокварцевых датчиков температуры, этот тип датчиков зарекомендовал себя как высокостабильное средство измерения температуры и, следовательно, может быть использовано в качестве образцового средства при проведении поверки или градуировки рабочих средств измерения температуры с погрешностью измерения более $\pm 0,015$ °С.

Л и т е р а т у р а

1. Пьезокварцевый датчик температуры. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
2. Установка для градуировки измерительных преобразователей температуры. Руководство по эксплуатации. УРИЕ.4441219.001РЭ.
3. РМГ 29-99 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. МЕТРОЛОГИЯ. Основные термины и определения.
4. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.