

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ КАЛИБРОВОК И ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ СТД-ЗОНДОВ «SEA BIRD»

А.Н. Рамазин

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии  
ФГБНУ «ВНИРО», Москва, ул. Верхняя Красносельская, 17  
E-mail: ramazin@vniro.ru

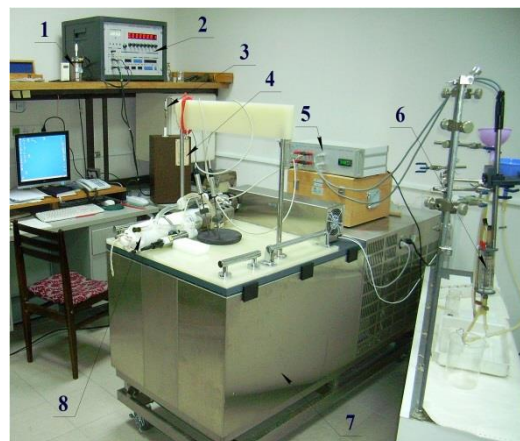
Рассмотрены факторы, определяющие неопределённость калибровки датчиков температуры прецизионных СТД-зондов. Проведен расчёт суммарной неопределённости и стандартных неопределённостей рабочих эталонов и испытательного оборудования, используемых в процессе калибровки основных моделей СТД-зондов фирмы «Sea Bird». Дан анализ вклада отдельных составляющих в суммарную неопределённость. Для этих моделей по экспериментальным данным рассчитаны характеристики зависимостей коэффициента чувствительности  $\partial f/\partial T$ , среднеквадратичных отклонений входного сигнала (частоты)  $s(f_i)$  и показаний датчика  $s(Tz_i)$  от температуры в термобаке. Выполнен анализ временного ухода  $\Delta T \cdot 10^{-40} \text{C}$  показаний температуры стандартного платинового термометра сопротивления (СПТС) и датчиков температуры СТД-зондов «Sea Bird» за время между калибровками.

**Ключевые слова:** многоразовые измерения, датчик температуры, калибровка, СТД-зонд, стандартная, суммарная и расширенная неопределённость, коэффициент чувствительности, стандартное отклонение, интервал неопределённости, временной уход.

Поступила в редакцию: 15.10.2018. После доработки: 19.11.2018.

**Введение.** Неуклонное технологическое развитие электронной элементной базы позволяет создавать всё более точные средства измерения (СИ), и в первую очередь измерители температуры, являющиеся наиболее распространённой и неотъемлемой составной частью СТД-зондов и других океанологических приборов. При этом по классификации СИ температуры [1] подавляющее число СТД-зондов, применяемых для океанологических исследований относятся к образцовым СИ или даже к рабочим эталонам. Что в свою очередь выдвигает повышенные требования к их метрологическому обеспечению. И в первую очередь, к методам и средствам калибровки, определяемых в результате анализа и оценки всей совокупности факторов влияющих на неопределённость их калибровки.

**Оборудование.** В течение 10 лет с 2008 по 2017 гг. «Метрологической службой измерителей параметров морской воды ВНИРО» (МС ВНИРО) было откалибровано 122 зонда различных моделей. Эти калибровки были выполнены с использованием зарубежного прецизионного калибровочного оборудования [2, 3], представленного на рис. 1.



**Рис. 1.** Средства калибровки СТД-зондов  
1 – эталонная катушка сопротивлений модель 5685A “Tinsley” (UK); 2 – прецизионный мост сопротивлений модели F-18 “ASL” (UK); 3 – СПТС модели 162CE “Rosemount” (USA); 4 – термостат с ячейкой точки плавления галлия модели 17041, 17042 “Yellow Springs Instrument” (USA); 5 – стандарт электропроводность-температура модели СТ-01 “Idronaut” (ITA); 6 – эталонные ячейки электропроводности; 7 – 216 л термобак модели 7051A “Hart Scientific” (USA); 8 – СТД-зонд SBE19plus перед калибровкой

**Материалы и методы.** При исследовании метрологических характеристик датчиков температуры использовались экспериментальные данные калибровок,

которым подверглись 107 СТД-зондов повышенной точности [4, 2, 3], при этом 98 зондов (91,6%) приходились на различные модели фирмы "Sea Bird".

Датчики температуры СТД-зондов, являющиеся, как правило, термисторными термопреобразователями, калибровались с помощью многоразовых измерений по 8 точкам температурного диапазона от минус 1,64 до плюс 30°C методом его сличения со стандартным платиновым термометром сопротивлений (СПТС) в прецизионном термостате, заполненном морской водой. Выходной параметр показаний датчиков температуры зонда – частота в Гц.

Расширенная (при ширине охвата  $K=2$ ) неопределенность СПТС  $U_{T0}$ , являющегося рабочим эталоном 0 разряда, указанная в сертификате, составляет 0,1 мК в тройной точке воды (0,0100°C); 0,24 мК в точке плавления галлия (29,7646°C) и 0,5 мК в точке плавления ртути (-38,8344°C).

Сопротивление СПТС измерялось с помощью прецизионного моста сопротивлений F18, расширенная неопределенность которого, при ширине охвата  $K = 2$  составляет  $U_M^R = 2 \cdot 10^{-5}$  Ом, и эталонной катушки сопротивления 100 Ом, расширенная ( $K = 2$ ) относительная неопределенность которой  $\delta_{ЭК} = 1 \cdot 10^{-7}$ .

Нестабильность температуры и наибольшая разность температур между двумя точками в рабочей зоне калибровки термостата, в которых размещались СПТС и датчик зонда, в течение не менее 1 ÷ 3 мин. составляла  $\pm 0,2$  мК ( $\pm 0,0002^\circ\text{C}$ ).

При калибровке датчика температуры зонда методом его сличения с СПТС в термостате, выполнялись следующие операции:

1. измерение температуры СПТС;
2. измерение температуры датчиком температуры зонда;
3. определение разности показаний термометров при измерении ими одной и той же температуры, поддерживаемой в рабочей зоне калибровки термостата.

Неопределенность калибровки представляет собой совокупность неопределенностей оценок этих разностей в каждой из 8 точек калибровки.

К факторам, определяющим неопределенность калибровки можно отнести [5, 6]:

1. неопределенность результата измерения температуры СПТС;

2. неоднородность температурного поля и нестабильность поддержания температуры в рабочей зоне калибровки термостата;

3. неопределенность результата измерения температуры калибруемого датчика зонда.

Для оценки неопределенности результата калибровки в каждой точке использовали суммарную стандартную неопределенность оценки.

Суммарная стандартная неопределенность результата калибровки  $u_\Sigma$  датчика температуры зонда складывается из следующих неопределенностей:

– стандартной неопределенности измерения температуры СПТС (образцового термометра) в рабочем объеме термостата  $u_{\Sigma 0}$ ;

– стандартной неопределенности, обусловленная неоднородностью температурного поля и нестабильностью поддержания температуры в рабочей зоне термостата  $u_{\Sigma T}$ ;

– стандартной неопределенности измерения температуры калибруемого датчика температуры зонда  $u_{\Sigma T_3}$ .

Суммарная стандартная неопределенность результата калибровки  $u_\Sigma$  датчика температуры зонда может быть представлена в виде

$$u_\Sigma = \sqrt{(u_{\Sigma 0})^2 + (u_{\Sigma T})^2 + (u_{\Sigma T_3})^2}. \quad (1)$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения температуры, выполняемая с помощью СПТС  $u_{\Sigma 0}$ , может быть представлена в виде

$$u_{\Sigma 0} = \sqrt{(u_{A0})^2 + (u_{B0})^2}, \quad (2)$$

где  $u_{A0}$  – стандартная неопределенность типа А измерения температуры, выполненного с помощью СПТС;  $u_{B0}$  – стандартная неопределенность типа В измерения температуры, выполненного с помощью СПТС.

Стандартная неопределенность  $u_{A0}$  представляет собой среднее квадратичное (стандартное) отклонение оценки среднего значения результата измерения температуры с помощью СПТС и может быть определена из соотношения

$$u_{AO} = \sqrt{\frac{1}{m \cdot (m-1)} \sum_{i=1}^m (T_{oi} - \bar{T}_O)^2} = \quad (3)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{m \cdot (m-1)} \sum_{i=1}^m \left(\frac{R_{oi} - \bar{R}_O}{\partial R / \partial T}\right)^2},$$

где  $m$  – число наблюдений температуры с помощью СПТС;  $T_{oi}$  –  $i$ -й результат наблюдения температуры с помощью образцового термометра в процессе калибровки;  $\bar{T}_O$  – среднее значение температуры из  $n$  наблюдений;  $R_{oi}$  –  $i$ -й результат наблюдения сопротивления образцового термометра в процессе калибровки;  $\bar{R}$  – среднее значение сопротивления образцового термометра из  $m$  наблюдений;  $dR/dT = 0,1 \text{ Ом}^\circ\text{C}$  – коэффициент чувствительности СПТС при измеряемой температуре.

Определяем по  $m$  наблюдениям среднее значение сопротивления образцового термометра  $\bar{R}_O$

$$\bar{R}_O = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m R_{oi} \quad (4)$$

Для наглядности представлена последовательность вычислений, выполненная по результатам калибровки одного из наиболее распространённых в практике океанологических исследований STD-зонда SBE19plusV2 № 6794.

Количество измерений температуры СПТС при калибровке датчика температуры этого STD-зонда при температуре термобака  $25^\circ\text{C}$  равно 62, а значения  $R_{oi}$  находятся в интервале значений  $28,10799 \div 28,10803$ , тогда

$$\bar{R}_O = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m R_{oi} = \frac{1}{62} \sum_{i=1}^{62} R_{oi} = 28,10801,$$

$$u_{AO} = \sqrt{\frac{1}{m \cdot (m-1)} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{R_{oi} - \bar{R}_O}{\partial R / \partial T}\right)^2} = \quad (5)$$

$$= 3,3 \cdot 10^{-6}.$$

Значения  $u_{AO}$  для всех точек калибруемого диапазона занесены в табл. 1.

Стандартная неопределенность  $u_{BO}$  измерения температуры СПТС, оцениваемая по типу В, складывается из стандартных неопределенностей калибровок СПТС, прецизионного температурного моста сопротивлений и эталонной катушки сопротивлений

$$u_{BO} = \sqrt{u_{TO}^2 + (u_M)^2 + (u_{ЭК})^2}, \quad (6)$$

где  $u_{TO}$  – стандартная неопределенность калибровки СПТС.

Стандартная расширенная неопределенность калибровки СПТС  $U_{TO}$  ( $K=2$ ) определена только для реперных точек, поэтому, для определения неопределенности СПТС  $u_{TO}$  в других точках диапазона изменения температуры, использовался метод линейной интерполяции [7], результаты которой представлены в табл. 1;  $u_M$  – стандартная неопределенность калибровки прецизионного моста F18 равна

$$u_M = \frac{U_M^R}{K \cdot \partial R / \partial T} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 0,1} = 1 \cdot 10^{-4}, \quad (7)$$

где  $U_M^R$  – расширенная неопределенность калибровки моста сопротивлений F18;  $u_{ЭК}$  – стандартная неопределенность калибровки эталонной катушки сопротивлений 100 Ом, определится из выражения

$$u_{ЭК} = \frac{\delta_{ЭК} \cdot R_{ЭК}}{K \cdot \partial R / \partial T} = \frac{1 \cdot 10^{-7} \cdot 100}{2 \cdot 0,1} = 5 \cdot 10^{-5}, \quad (8)$$

где  $\delta_{ЭК}$  – расширенная относительная неопределенность сопротивления эталонной катушки  $R_{ЭК}$ .

Результаты расчетов  $u_{BO}$ , приведены в табл. 1, из которой хорошо видно, что эта составляющая суммарной неопределенности СПТС  $u_{\Sigma O}$  практически полностью определяет её значение. Значения неопределенности  $u_{AO}$  пренебрежимо мало по сравнению с неопределенностями, оцениваемыми по типу В. При этом, значения стандартных неопределенностей калибровки моста сопротивлений F18 и эталонной катушки являются величинами постоянными во всём диапазоне изменения температуры.

Наибольший вклад в стандартную неопределенность  $u_{BO}$  измерения температуры СПТС, оцениваемой по типу В, вносят стандартная неопределенность калибровки прецизионного моста  $u_M$  и самого СПТС  $u_{TO}$ , внося тем самым наибольший вклад в оценивании суммарной стандартной неопределенности измерения температуры СПТС в рабочей зоне термостата  $u_{\Sigma O}$ . Значения неопределенностей  $u_{TO}$ ,  $u_{AO}$ ,  $u_{BO}$ ,  $u_{\Sigma O}$  для всех точек калибровки приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Значения суммарной неопределенности измерения температуры СПТС  $u_{\Sigma 0}$  и её составляющих в рабочей зоне термостата в температурном диапазоне  $-1,6 \div 30^\circ\text{C}$

Температура воды в баке, $^\circ\text{C}$	30	25	20	15	10	5	1	-1,6
$u_{A0} = \sqrt{\frac{1}{m \cdot (m-1)} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{R_i - \bar{R}_0}{\partial R / \partial T}\right)^2}$								
Число измерений СПТС $m$	47	62	41	60	41	52	54	39
$u_{A0} \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$	2,9	2,6	3,1	2,6	3,1	2,8	2,7	3,2
$u_{B0} = \sqrt{(u_{T0})^2 + (u_M)^2 + (u_{\text{ЭК}})^2}$								
$u_{T0} \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	1,2	1,09	0,97	0,86	0,74	0,62	0,52	0,58
$u_M \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$u_{\text{ЭК}} \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
$u_{B0} \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3
$u_{\Sigma 0} = \sqrt{(u_{A0})^2 + (u_{B0})^2}$								
$u_{\Sigma 0} \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3

Суммарная стандартная неопределенность  $u_{\Sigma T}$ , обусловленная неоднородностью температурного поля  $u_{T1}$  и нестабильностью поддержания температуры в рабочей зоне калибровки термостата  $u_{T2}$ , может быть оценена по типу В. Суммарная стандартная неопределенность  $u_{\Sigma T}$  может быть представлена в виде

$$u_{\Sigma T} = \sqrt{(u_{T1})^2 + (u_{T2})^2} \quad (9)$$

Методика калибровки, предусматривает проведение необходимого и достаточного числа образцовых измерений  $m$  (табл. 1), выполняемых с помощью СПТС и датчика температуры СТД-зонда  $n$  (табл. 2), в течение интервала времени, когда нестабильность показаний сопротивления (температуры) СПТС в термобаке не превышает значения  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  Ом ( $\pm 2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

Для приведённого в качестве примера СТД-зонда число измерений  $m$ , выполняемых с помощью СПТС для различных точек калибровки колеблется в пределах  $39 \div 62$ , что соответствует интервалу времени  $78 \div 124$  с.

Датчик температуры калибруемого зонда располагался в непосредственной близости от СПТС. Таким образом, неравномерность температурного поля  $u_{T1}$  и нестабильность температуры в рабочей зоне термостата  $u_{T2}$  лежат в пределах

$\pm 0,0002^\circ\text{C}$ , то есть верхней границей  $b_+$  распределения неравномерности и нестабильности является значение плюс  $0,0002^\circ\text{C}$ , а нижней,  $b_-$  минус  $0,0002^\circ\text{C}$ .

Можно предположить, что неравномерность температурного поля в рабочем объеме термостата носит равновероятный характер. В этом случае стандартная неопределенность неравномерности и нестабильности распределения температурного поля будет равна

$$u_{T1} = u_{T2} = \frac{b_+ - b_-}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,0002 - (-0,0002)}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,000115 \quad (10)$$

При этом, предполагается, что эта неравномерность температурного поля и его нестабильность справедливы для двух точек рабочей зоны калибровки термостата, в которых находятся СПТС и датчик температуры в течение времени калибровки (1–3 мин.)

Суммарную стандартную неопределенность  $u_{\Sigma T}$  находим из соотношения

$$u_{\Sigma T} = \sqrt{(u_{T1})^2 + (u_{T2})^2} = \sqrt{(0,000115)^2 + (0,000115)^2} = 0,00016 \quad (11)$$

Суммарная неопределенность измерения температурным датчиком температуры зонда  $u_{\Sigma T3}$  в рабочей зоне калибровки термостата может быть представлена в виде

$$u_{\Sigma T_3} = \sqrt{(u_{AT_3})^2 + (u_{BT_3})^2}, \quad (12)$$

где  $u_{AT_3}$  и  $u_{BT_3}$  – соответственно оценки неопределенности по типу  $A$  и типу  $B$ .

Используя данные результата калибровки датчика температуры зонда, оценку неопределенности по типу  $A$  можно определить из соотношения

$$\begin{aligned} u_{AT_3} &= \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (T_{3i} - \bar{T}_3)^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{3i} - \bar{f}_3}{\partial f / \partial T} \right)^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $T_{3i}$  –  $i$ -й результат наблюдения температуры с помощью температурного датчика зонда в процессе его калибровки;  $n$  – число многократных измерений в одной из точек калибровки, выполненные с помощью датчика зонда;  $\bar{T}_3$  – среднее значение температуры из  $n$  измерений;  $f_{3i}$  –  $i$ -й результат измерения частоты датчика;  $\bar{f}_3$  – среднее значение частоты измерений из  $n$  наблюдений;  $\frac{\partial f}{\partial T}$  – коэффициент чувствительности датчика температуры (Гц/°C) при измеряемой температуре в термобаке.

Значения  $n$  и  $f_{3i}$  брались из соответствующего файла калибровки.

Можем уверенно предположить, что неопределенность результатов измерений температуры с помощью термометра зонда типа  $A$  имеет нормальный закон распределения. Тогда, оценка стандартной неопределенности  $u_{AT_3}$  определяется из соотношения

$$\begin{aligned} u_{AT_3} &= \\ &= \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{3i} - \bar{f}_3}{\partial f / \partial T} \right)^2} = \\ &= \frac{s(T_{3i})}{\sqrt{n}}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\bar{f}_3 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n f_{3i}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} s(T_{3i}) &= \\ &= \frac{\partial T}{\partial f} \cdot \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (f_{3i} - \bar{f}_3)^2} = \\ &= \frac{\partial T}{\partial f} \cdot s(f_{3i}), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $s(T_{3i})$  и  $s(f_{3i})$  – экспериментальные стандартные отклонения измерений

температуры  $T_{3i}$  и частоты  $f_{3i}$  датчиком зонда от среднего значения.

Значения  $\bar{f}_3$  и  $s(f_{3i})$  рассчитывались непосредственно в файле с калибровочными данными с использованием стандартных функций Microsoft Excel 2003: СРЗНАЧ и СТАНДОТКЛОН.

Коэффициент чувствительность датчика температуры  $\partial f / \partial T$  (Гц/°C) при измеряемой температуре в термобаке определялись следующим образом

$$\frac{\partial f}{\partial T} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta T} = \left| \frac{f - (f + \Delta f)}{T - (T + \Delta T)} \right|, \quad (17)$$

где  $T = \varphi(f)$  – статическая (калибровочная) функция преобразования (СФП) датчика температуры СТД-зонда, определяемая в зависимости от модели зонда в виде одного из выражений (18÷22).

Для измерителей СТД-зондов фирмы “Sea Bird”, а также ряда СТД-зондов NXIC-CTD FSI, Citadel CTD-NV TRDI, СФП имеет вид

$$T = \frac{1}{A_0 + A_i \cdot \sum_{i=1}^3 \ln^i(R)} - 273,15, \quad (18)$$

где  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  – искомые калибровочные коэффициенты.

Для СТД-зондов SBE25, SBE911 и SBE35

$$R = 1000,00 / f. \quad (19)$$

Для СТД-зондов SBE37SM и SBE37SI

$$R = f. \quad (20)$$

Для СТД-зондов SBE19plus, SBE19plusV2, SBE16plus, SBE16plusV2

$$\begin{aligned} R &= \frac{(MV \cdot 2,9 \cdot 10^9) + (1,024 \cdot 10^8)}{(2,048 \cdot 10^4) - (MV \cdot 2,0 \cdot 10^5)}, \\ MV &= \frac{(f - 524288)}{1,6 \cdot 10^7}. \end{aligned} \quad (21)$$

где  $f = f_{3i}$  – частота сигнала измерительной схемы датчика температуры, Гц,

**Результаты и их обсуждение.** Полученные по данным калибровки 5 различных моделей СТД-зондов “Sea Bird” значения  $\partial f / \partial T$ ,  $s(f_i)$  и  $s(T_{3i})$  являлись исходными данными для вычисления неопределенности измерения температурным датчиком зонда  $u_{AT_3}$  (14, 16), оценённой по типу  $A$ .

Вычисленные значения неопределённости  $u_{AT_3}$  в температурном диапазоне калибровки  $-1,6 \div 30^\circ\text{C}$  зондов SBE19plusV2 № 6794 и SBE25 № 0342 занесены в табл. 2.

Оценка неопределённости датчика температуры по типу В  $u_{BT_3}$  обусловлена дискретностью  $\Delta f$  частотного способа измерений зонда

$$u_{BT_3} = \frac{\Delta f}{\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right) \sqrt{3}} \cdot \quad (22)$$

Для СТД-зондов SBE19plus, SBE19plusV2, SBE16plus, SBE16plusV2, SBE37SM и SBE37SI  $\Delta f = 1$  Гц.

Для СТД-зондов SBE25, SBE911  $\Delta f = 10^{-3}$  Гц.

Рассчитанные значения  $u_{BT_3}$  для диапазона изменения температуры от  $-1,6$  до  $30^\circ\text{C}$  представлены в табл. 2.

Таким образом, суммарная неопределённость  $u_{\Sigma T_3}$  калибровки датчика

температуры в рабочей зоне термостата зонда будет равна

$$u_{\Sigma T_3} = \sqrt{(u_{AT_3})^2 + (u_{BT_3})^2} \cdot \quad (23)$$

По рассчитанным оценкам составляющих  $u_{\Sigma O}$ ,  $u_{\Sigma T}$  и  $u_{\Sigma T_3}$  (табл. 2) находим суммарную стандартную неопределённость результата калибровки  $u_{\Sigma}$  датчиков температуры зондов SBE19plusV2 и SBE25

$$u_{\Sigma} = \sqrt{(u_{\Sigma O})^2 + (u_{\Sigma T})^2 + (u_{\Sigma T_3})^2} \cdot \quad (24)$$

В табл. 2 представлены значения суммарной неопределённости  $u_{\Sigma}$  и её составляющих  $u_{\Sigma O}$ ,  $u_{\Sigma T}$ ,  $u_{AT_3}$ ,  $u_{BT_3}$ , и  $u_{\Sigma T_3}$ , для всех 8 точек многообразных измерений в температурном диапазоне от  $-1,6$  до  $30^\circ\text{C}$ .

**Таблица 2.** Значения стандартных неопределённостей калибровки СТД-зондов SBE19plusV2 № 6794 и SBE25 № 0342

Температура воды в баке, $^\circ\text{C}$	30	25	20	15	10	5	1	-1,6
Число измерений зонда $n$	374	502	325	476	326	417	431	309
SBE19plusV2								
$s(Tz_i) \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}$	1,9	2,1	2,5	3,5	3,7	3,4	3,6	4,5
$\varepsilon(Tz_i) \cdot 10^{-3}, ^\circ\text{C}$	0,57	0,63	0,75	1,1	1,1	1,0	1,1	1,4
$u_{\Sigma T_3} = \sqrt{(u_{AT_3})^2 + (u_{BT_3})^2}$								
$u_{AT_3} \cdot 10^{-5}$	0,98	0,94	1,4	1,6	2,0	1,7	1,7	2,6
$u_{BT_3} \cdot 10^{-5}, ^\circ\text{C}$	6,1	5,2	4,4	3,8	3,3	2,8	2,6	2,5
$u_{\Sigma T_3} \cdot 10^{-5}, ^\circ\text{C}$	6,2	5,3	4,6	4,1	3,9	3,3	3,1	3,6
$u_{\Sigma T} \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}$	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
$u_{\Sigma O} \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}$	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3
$u_{\Sigma} = \sqrt{(u_{\Sigma O})^2 + (u_{\Sigma T})^2 + (u_{\Sigma T_3})^2}$								
$u_{\Sigma} \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}$	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1
SBE25								
$s(Tz_i) \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}$	1,3	1,2	2,1	1,8	2,2	1,8	1,5	
$\varepsilon(Tz_i) \cdot 10^{-3}, ^\circ\text{C}$	0,39	0,36	0,62	0,54	0,66	0,54	0,45	
$u_{AT_3} \cdot 10^{-5}$	1,2	1,4	2,4	2,4	3,9	3,0	3,1	
$u_{BT_3} \cdot 10^{-6}$	5,5	5,8	6,2	6,7	7,2	7,8	8,3	
$u_{\Sigma T_3} \cdot 10^{-5}, ^\circ\text{C}$	1,3	1,5	2,5	2,5	4,0	3,1	3,2	
$u_{\Sigma} \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}$	2,3	2,3	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	

Необходимо отметить, что для СТД-зондов моделей SBE19plus, SBE16plusV и SBE37 значения суммарных неопределённостей  $u_{\Sigma O}$ ,  $u_{\Sigma T}$  и  $u_{\Sigma T_3}$  практически не отличаются от значений, рассчитанных

для зонда модели SBE19plusV2.

Расширенная неопределённость для уровня доверия 0,95 равна

$$U = K \cdot u_{\Sigma} \cdot$$

где  $K$  – коэффициент охвата, определяемый по формуле Велча-Саттерсвейта как коэффициент Стьюдента с эффективным числом степеней свободы [6]  $v_{eff}$

$$v_{eff} = (n-1) \cdot \left(\frac{u_{\Sigma}}{u_A}\right)^4 = (325 \div 501) \times \times \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{9,4 \cdot 10^{-6}}\right)^4 = (2,7 \div 4,2) \cdot 10^{11}.$$

Для  $v_{eff}$  близкому к  $\infty$ , значение коэффициента Стьюдента  $K=1,96$ . Расширенная неопределённость калибровки датчиков температуры рассмотренных моделей СТД-зондов “Sea Bird” в любой точке диапазона не будет превышать

$$U = K \cdot u_{\Sigma} = = 1,96 \cdot (2,0 \div 2,4) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \leq (0,4 \div 0,5).$$

Необходимо отметить, что значения суммарной неопределённости СПТС  $u_{\Sigma O}$  и суммарной неопределённости, обусловленной пространственно-временной неоднородностью температурного поля в рабочей зоне калибровки  $u_{\Sigma T}$ , можно считать практически величинами постоянными или изменяющимися незначительно. Их суммарное значение будет в основном определять величину суммарной неопределённости калибровки датчиков температуры СИ в термобаке (табл. 2).

При достаточно большом количестве многократных измерений  $n$  составляющей оценки неопределённости по типу А  $u_{AT3}$  можно пренебречь (табл. 2). Суммарная неопределённость измерений датчика температуры в рабочей зоне термостата  $u_{\Sigma T3}$  будет определяться значением оценки неопределённости по типу В  $u_{BT3}$ , которая в свою очередь зависит от применяемого метода измерения данной модели зонда, математически выраженная в виде величины  $R$  (19–21).

**Среднее стандартное отклонение измерения.** Для метрологической оценки СИ такие параметры как  $s(f_i)$ ,  $\partial f/\partial T$  и  $s(Tz_i)$  и их функциональное взаимодействие, наряду с оценкой суммарной неопределённости калибровки, играют не мало важное значение.

На графике рис. 2 представлены зависимости: а) – коэффициентов чувствительности  $\partial f/\partial T$ , б) –  $s(f_i)$  и в) –  $s(Tz_i)$  от измеряемой температуры морской воды. Из графиков видно, что с уменьшением температуры происходит увели-

чение значений всех трех характеристик. Значения  $s(f_i)$  (рис. 3б) зондов SBE19plus, SBE19plusV2 и SBE16plusV2 при уменьшении температуры от 30 $^\circ\text{C}$  до – 1,6 $^\circ\text{C}$  увеличивается в (5,6 $\div$ 7,6) раза. Однако, это увеличение при вычислении  $s(Tz_i)$ , рис. 3в в значительной степени компенсируется за счёт увеличения величин коэффициента чувствительности. В результате значения  $s(Tz_i)$  при снижении температуры увеличиваются для этих зондов только в (2,4 $\div$ 3,3) раза (рис. 3в,г).

Вместе с тем, совсем иначе ведут себя характеристики датчика SBE25, имеющего несколько другую СФП (19). Значения  $\partial f/\partial T$  (рис. 3а) с уменьшением температуры снижаются в 1,5 раза, в то время как  $s(f_i)$  (рис. 3б) и  $s(Tz_i)$  (рис. 3г) меняются практически незначительно, оставаясь на уровне (1,1–1,9)·10 $^{-2}$  Гц и (1,2 $\div$ 2,2)·10 $^{-40}$ С соответственно.

В результате, для зондов моделей SBE19plus, SBE19plusV2 и SBE16plusV2 значения  $s(Tz_i)$  находятся в пределах (0,2 $\div$ 0,5) мК, а для SBE25 не превысит 0,2 мК во всём диапазоне изменения температуры.

Среднее стандартное отклонение измерения  $s(Tz_i)$  остаётся метрологическим параметром, характеризующим меру неопределённости СИ, часто оцениваемое за рубежом как характеристика его «ассурасу».

Используем  $s(Tz_i)$  для оценки интервала неопределённости измерений температуры датчиками зондов в предположении нормального закона распределения.

Для уровня доверия 0,9973 ( $K = 3$ ) результатов многократных измерений интервал неопределённости равен

$$\varepsilon(Tz_i) = 3 \cdot s(Tz_i) . \quad (25)$$

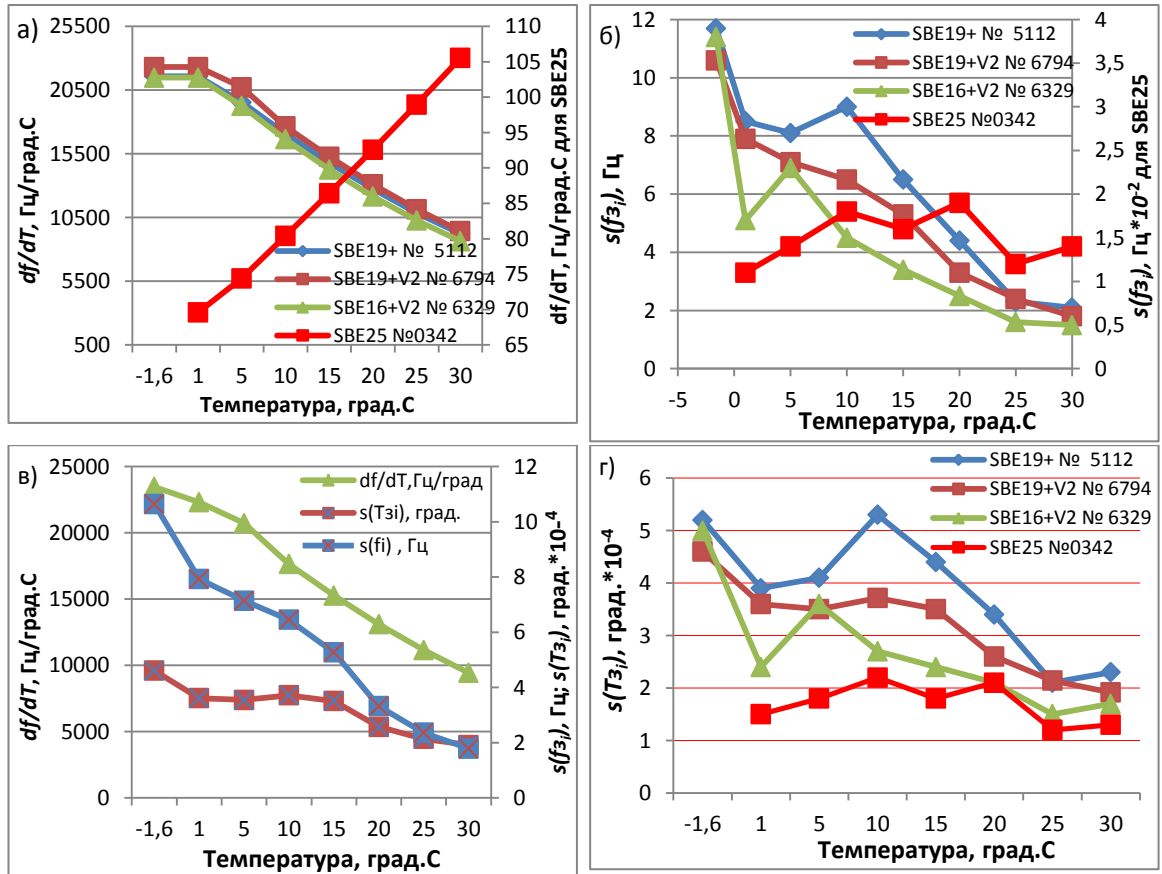
В табл. 2 размещены значения  $\varepsilon(Tz_i)$  для всех 8 точек многократных измерений SBE19plusV2 и SBE25 в температурном диапазоне от –1,6 до 30 $^\circ\text{C}$ . Значения  $\varepsilon(Tz_i)$  для других моделей зондов отличаются от SBE19plusV2 незначительно (рис. 2г).

Как видно из табл. 2 для СТД-зонда SBE25  $\varepsilon(Tz_i)$  не превышает 0,66 мК и 1,6 мК для зондов SBE19plus, SBE19plusV2 и SBE16plusV2 соответственно.

Следует отметить увеличенные значения  $\varepsilon(Tz_i)$  у датчиков SBE37SM при температурах от 20 до 30°C, характерные и для других зондов этой модели при температурах близких к 30°C.

**Временной уход калибровочных характеристик.** Необходимо рассмотреть ещё один фактор, влияющий на общую неопределённость измерения. Это

временной уход калибровочных характеристик СПТС и датчиков температуры STD-зондов в процессе эксплуатации. Для его оценки были использованы экспериментальные данные калибровок рассмотренных выше моделей STD-зондов “Sea Bird”, выполненных за период с 2008 по 2017 гг.



**Рис. 2.** Графики зависимости параметров  $f/dT$ ,  $s(f_i)$  и  $s(Tz_i)$  датчиков калибруемых зондов от температуры: а) зависимость  $df/dT$ ,  $s(f_i)$  и  $s(Tz_i)$  от температуры зонда SBE19plusV2 №6794; б) зависимость  $s(f_i)$  от температуры 4-х моделей зондов “Sea Bird”; в)  $df/dT$ ,  $s(f_i)$  и  $s(Tz_i)$  от температуры зонда SBE19plusV2 №6794; г) зависимость  $s(Tz_i)$  от температуры 4-х моделей зондов “Sea Bird”

По уравнениям (18–21) для каждого значения частоты датчика  $fz$ , с учётом соответствующих калибровочных коэффициентов  $A_0, \dots, A_3$ , проводился расчёт значений температуры для каждой из 8 точек температурного диапазона  $-1,6 \div 30^\circ\text{C}$ . Затем вычислялся временной уход показаний датчиков температуры  $\Delta T = T_1 - T_2$  между двумя ближайшими калибровками.

Аналогичным образом оценивался также временной уход СПТС. Для этого использовались калибровочные коэффи-

циенты функции отклонения [2, 3, 8] из сертификатов его калибровок.

В табл. 3 представлены значения временного ухода СПТС и временного ухода датчиков температуры STD-зондов “Sea Bird” за время между калибровками, выполненными метрологической службой ВНИРО. В том числе, оценивался временной уход между калибровками, выполненными фирмой изготовителем и МС ВНИРО.

Как видно из табл. 3, временной уход СПТС за 24 мес. лежит в диапазоне



(0,02÷0,19) мК, достигая максимального значения при 30°C.

Временной уход СТД-зондов SBE19plusV2, SBE19plus, за 11 мес. составил (0÷0,2) мК и (0,01÷0,14) мК соответственно. Максимальный временной уход 4-х моделей зондов SBE19plusV2, SBE19plus, SBE16plusV2 и SBE19plus и SBE37SM за более длительный срок, равный 81 мес., зафиксирован у

SBE19plusV2 № 6794 не превысивший значения в 1,0 мК при температуре -1,6°C.

Для СТД-измерителя SBE37SM № 6952, предназначенного для использования в режиме длительных буйковых постановок, за время между калибровками (45,7÷111) мес. максимальный уход не превысил 0,6 мК.

**Таблица 3.** Значения временного ухода  $\Delta\bar{T} \cdot 10^{-4} \text{°C}$  показаний температуры СПТС и датчиков температуры СТД-зондов “Sea Bird” за время  $\tau$  между двумя калибровками

Температура воды в термобаке, °C		30	25	20	15	10	5	1	-1,6
Название СИ	Время $\tau$ , мес.	Расхождения показаний датчиков температуры между двумя ближайшими калибровками $\Delta\bar{T} =  \bar{T}_1 - \bar{T}_2  \cdot 10^{-4} \text{°C}$							
		СПТС	24	1,9	1,4	1,0	0,6	0,3	0,2
SBE19plusV2 № 6794	11*)	0	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	0
	48,5	8,3	1,6	2,3	4,1	4,6	4,5	4,6	4,9
	20,5	0,8	1,8	2,5	3,1	3,6	4,3	4,8	5,2
	81**)	7,5	0,2	4,8	7,2	8,3	8,8	9,3	10,0
SBE25 0342	114,5*)	14	7,6	2,3	0,4	0,4	6,1	16	-
SBE16plusV2 № 6329	55	1,5	3,7	6,2	6,4	4,6	1,3	2,3	4,5
SBE19plus № 5112	66,5	4,9	1,6	4,5	4,8	3,0	0,1	3,0	4,6
SBE19plus № 4896	29	2,6	1,6	0,7	0,2	0,1	0,7	2,0	3,0
	11,5	0,1	0,5	1,0	1,4	1,4	0,9	0,04	0,8
SBE37SM № 6952	45,7*)	1,8	3,8	5,5	6,2	6,0	5,4	4,7	4,4
	64,7	1,2	5,3	9,4	11	10	6,0	3,2	4,0
	111**)	0,6	3,8	5,5	6,2	6,0	5,4	4,7	4,4

\*) Время, прошедшее между калибровкой на фирме “Sea Bird” и ближайшей за ней – МС ВНИРО.  
\*\*) Время, прошедшее между последней калибровкой на фирме “Sea Bird” и последней калибровкой МС ВНИРО.  
Например: 81\*\*) мес. – для SBE19plusV2 №6794 это время, прошедшее между последней калибровкой на фирме “Sea Bird” 25.02.2011 г. и последней калибровкой зонда МС ВНИРО 26.10.2017 г.

Наибольший уход калибровочных характеристик зафиксирован у модели SBE25, не превысивший 1,6 мК между калибровками, выполненными на фирме-изготовителе и затем через 114,5 мес. (9,5 лет) МС ВНИРО (табл. 3).

**Заключение.** Выполненный анализ экспериментальных данных калибровок СТД-зондов, выполненных с помощью прецизионного оборудования (рис. 1), позволяет сделать вывод о том, что расширенная неопределённость калибровки датчиков температуры рассмотренных моделей СТД-зондов “Sea Bird”, а также практически любых прецизионных СИ, в любой точке диапазона от -2 до 30°C не будет превышать (0,4÷0,5) мК.

Значения суммарной неопределённости СПТС  $u_{\Sigma 0}$  и суммарной неопределённости, обусловленной пространственно-временной неоднородностью температурного поля в рабочей зоне калибровки  $u_{\Sigma T}$ , можно считать практически величинами постоянными или изменяющимися незначительно. Их суммарное значение будет в основном определять величину суммарной неопределённости калибровки датчиков температуры СИ в термобаке.

При достаточно большом количестве многоцветных измерений  $n$  составляющей оценки неопределённости по типу А  $u_{AT3}$  можно пренебречь. Суммарная неопределённость измерений датчика температуры в рабочей зоне термостата  $u_{\Sigma T3}$

будет определяться значением оценки неопределённости по типу В  $u_{VTz}$ , которая в свою очередь зависит от применяемого метода измерения данной модели зонда, математически выраженная (19–21) в виде величины  $R$ .

Для зондов моделей SBE19plus, SBE19plusV2 и SBE16plusV2 значения  $s(Tz_i)$  находятся в пределах  $(0,2 \div 0,5)$  мК, а для SBE25 не превысят 0,2 мК во всём диапазоне изменения температуры  $-2 \div 30^\circ\text{C}$ .

Временной уход калибровочных характеристик СПТС, являющийся рабочим эталоном 0 разряда, не превышает 0,1 мК/год.

Временной годовой уход калибровочных характеристик рассмотренных моделей СТД-зондов между двумя калибровками не превышает значения расширенной неопределённости калибровки и составляет, как правило, не более 0,2 мК/год.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ 8.558-93 ГСИ*. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Издательство стандартов. 1994. 16 с.

2. *Рамазин А.Н., Левашов Д.Е.*, Методические рекомендации по калибровке

и метрологическому обеспечению измерителей параметров водной среды. М.: Изд-во ВНИРО. 2016. 127 с.

3. *Рамазин А.Н.* Некоторые научно-методические аспекты метрологического обеспечения измерений электропроводности и температуры морской воды с помощью СТД-зондов // Тр. ВНИРО. 2016. Т. 159. С. 167–182.

4. *Левашов Д.Е.* Техника экспедиционных исследований: инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО. 2003. 400 с.

5. *Походун А.И.* Экспериментальные методы исследований. Погрешности и неопределенности измерений. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО. 2006. 112 с.

6. *Руководство по выражению неопределенности измерения*: Перевод с англ. под науч. ред. проф. Слаева В.А. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, С.-Петербург. 1999. 134 с.

7. *Моисеева Н.П.* Неопределенность измерения температуры и разности температур с учетом корреляции. Измерительная техника № 11, 2010. <http://temperatures.ru/pdf/Moiseeva2010-2.pdf>

8. *Mangum B. W., Furukawa G. T.* 1990. Guidelines for realizing the international temperature of 1990 (ITS-90) // NIST Tech. Note 1265. 190 p.

## EVALUATION OF CALIBRATIONS AND MEASUREMENTS UNCERTAINTY OF TEMPERATURE SENSORS OF CTD-PROBE “SEA BIRD”

**A.N. Ramazin**

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO),  
Russian Federation, Moscow, V. Krasnoselskaya St., 17

The factors that determine the uncertainty in the calibration of precision CTD probes temperature sensors are considered. The calculation of total uncertainty and standard uncertainties of working calibration standards and testing equipment used in the calibration process of CTD probes main models (“Sea Bird” company) was carried out. An analysis of the contribution of individual components to the total uncertainty is given. For these models, the experimental data were used to calculate the characteristics of dependences of sensitivity coefficient  $\partial f/\partial T$ , the standard deviations of input signal (frequency) of the  $s(f_i)$ , and sensor readings  $s(Tz_i)$  on the temperature in the thermal bath. An analysis of the time walk  $\Delta T \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}$  of readings of the temperature of standard platinum resistance thermometer (SPTS) and temperature sensors of CTD probes “Sea Bird” between the calibrations.

**Keywords:** reusable measurements, temperature sensor, calibration, CTD probe, standard, total and extended uncertainty, sensitivity coefficient, standard deviation, uncertainty interval, time walk.