

Техника для рыбохозяйственных исследований

УДК 551.46

Временная изменчивость калибровочных характеристик измерительных датчиков CTD-зондов «Sea Bird»

А.Н. Рамазин, Д.А. Иващенко

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
ФГБНУ «ВНИРО», Москва

E-mail: ramazin@vniro.ru

Приведены результаты анализа экспериментальных данных исследований дрейфа калибровочных характеристик датчиков температуры, удельной электропроводности (УЭП) и давления, выполненных в процессе калибровки датчиков 7 моделей CTD-зондов «Sea Bird» в течение 10 лет с 2008 по 2017 гг. с помощью «Установки для измерения УЭП морской воды ВНИРО». Показано, что временной уход датчиков температуры за всё время наблюдений в (86,6÷95)% случаев — не превысил 0,002 °С. Временной дрейф датчиков УЭП моделей SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25 в (43,4÷63,0)% случаев не превысил 0,005 мСм/см. Сделан вывод о том, что временной дрейф калибровочных характеристик датчика УЭП в основном определяют условия их эксплуатации и качество профилактического обслуживания ячеек CTD-зондов. Показано, что временной уход датчиков давления всех 7 моделей в 54% случаев имеют уход калибровочных характеристик, не превышающий 0,1% от полной шкалы (ПШ).

Ключевые слова: CTD-зонды, временной уход, калибровочные коэффициенты, датчики температуры, УЭП и давления, ячейка УЭП.

DOI: 10.36038/2307-3497-2020-182-191-200

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время CTD-зонды заняли ведущее место в гидрофизических исследованиях Мирового океана, при изучении влияния процессов изменчивости океанологических полей на поведение и распределение гидробионтов.

При выборе типа, фирмы и модели CTD-зонда в числе основных его метрологических характеристик, наряду с точностными характеристиками измерительных датчиков, рассматривается вопрос о временной ста-

бильности их показаний на определённый период эксплуатации: время их постановки на буйковой станции, использовании в экспедиции или полевых работах. В результате, решается вопрос об определении периода между калибровками, проводимыми в условиях стационарного метрологического Центра, о том, как часто следует проводить дорогостоящие калибровки измерительных датчиков CTD-зондов.

Оборудование. В течение 10 лет с 2008 по 2017 гг. метрологической службой изме-

рителей параметров морской воды ВНИРО проводились работы по калибровке STD-зондов. Эти работы были выполнены с использованием зарубежного прецизионного калибровочного оборудования, сконструированного в виде «Установки для измерения УЭП морской воды ВНИРО» (свидетельство об утверждении типа средства измерений RU.E.31.001.A № 42535) [Рамазин, Левашов, 2016; Рамазин, 2016], представленной на рис. 1. В результате было откалибровано 122 зонда различных моделей, из них 107 STD-зондов — повышенной точности [Архипкин и др., 2009]. При этом 98 зондов (91,6%) приходились на различные модели фирмы «Sea Bird». В табл. 1 представлен перечень моделей STD-зондов и количество выполненных калибровок.



Рис. 1. Средства калибровки STD-зондов. Момент калибровки датчика давления и его температурной компенсации

Таблица 1. Перечень STD-зондов «Sea Bird», откалиброванных в период 2008–2017 гг.

№ п/п	Модель STD-зонда	Кол-во калибровок
1	SBE19plus	33
2	SBE19plusV2	20
3	SBE16plusV2	4
4	SBE37SM	32
5	SBE37SI	6
6	SBE25	2
7	SBE911	1

Анализ оснащённости научно-исследовательского флота рыбохозяйственной отрасли показал [Рамазин, Левашов, 2016], что 75% измерителей повышенной точности составляют различные модели STD-зондов, производимые фирмой «Sea Bird». Аналогичная ситуация и в других организациях, ведомствах России, занимающихся изучением Мирового океана. Моделями STD-зондов этой фирмы оснащено значительное число научно-исследовательских судов США, стран Европы, Японии, Китая и ряда других стран.

Целью данной работы является попытка оценить величину и возможные причины временного ухода калибровочных характеристик датчиков температуры, удельной электропроводимости (УЭП) и избыточного давления различных моделей STD-зондов «Sea Bird».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Временной дрейф (уход) калибровочных характеристик датчиков температуры, УЭП и избыточного давления, выражающийся в изменении коэффициентов статической функции преобразования (СФП) измерительных каналов, возникает в процессе эксплуатации STD-зондов. Он может значительно влиять на общую неопределённость измерения. Для его оценки были проведены сравнения СФП (основных уравнений калибровки) измерительных датчиков одних и тех же STD-зондов «Sea Bird», полученных в процессе калибровок в разное время за период с 2008 по 2017 гг.

Датчики температуры STD-зондов «Sea Bird», являющиеся, как правило, термисторными термопреобразователями, калибровались с помощью многоразовых измерений по 8 точкам температурного диапазона от 30 до $-1,64$ °С методом их сличения со стандартным платиновым термометром сопротивлений (СПТС) в прецизионном термостате, заполненном морской водой. Расширенная (при ширине охвата $K=2$) неопределённость СПТС U_{TO} , являющегося рабочим эталоном 0 разряда, составляет 0,1 мК в тройной точке воды (0,0100 °С); 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 неопределённость 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 неопределённость 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 $1 \div 3$ мин. составляла $\pm 0,2$ мК ($\pm 0,0002$ °C).

Суммарная стандартная неопределённость (ССН) измерения температуры в термобаке, выполняемая с помощью СПТС в процессе калибровки, и величина его возможного временного дрейфа за единицу времени представлена в табл. 2 [Рамазин, 2018].

Для датчиков температуры CTD-зондов фирмы «SeaBird» СФП имеет вид

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

где A_0, A_i — искомые калибровочные коэффициенты.

Для CTD-зондов SBE25, SBE911 и SBE35

$$R = 1000,00/f. \quad (2)$$

Для CTD-зондов SBE37SM и SBE37SI

$$R = f. \quad (3)$$

Для CTD-зондов SBE19plus, SBE19plusV2, SBE16plus, SBE16plusV2

$$R = \frac{(MV \cdot 2,9 \cdot 10^9) + (1,024 \cdot 10^8)}{(2,048 \cdot 10^4) - (MV \cdot 2,0 \cdot 10^5)}; \quad (4)$$

$$MV = \frac{f - 524288}{1,6 \cdot 10^7},$$

где f — частота сигнала измерительной схемы датчика температуры, Гц.

Датчики УЭПСТД-зондов «SeaBird» в качестве чувствительного элемента используют кондуктивную ячейку [Pederson, Gregg, 1979], имеющую три кольцевых платинизированных электрода шириной 10мм, размещённых внутри трубки из пирекса длиной 190 мм и внутренним диаметром 7 мм. Крайние электроды расположены симметрично относительно центрального и на расстоянии

Таблица 2. Метрологические характеристики рабочих эталонов Установки для измерения УЭП морской воды ВНИРО, используемых для калибровки CTD-зондов

Температура морской воды в термобаке, °C	30	25	20	15	10	5	1	-1,6	
УЭП морской воды в баке, мСм/см	58	53	48	43	38	33	29	27	
Название эталона		Время, τ		Временной уход показаний СПТС $\Delta \bar{T} = \bar{T}_1 - \bar{T}_2 \cdot 10^{-4}, \text{ °C}$					
СПТС	24 мес.	1,9	1,4	1,0	0,6	0,3	0,2	0,4	0,6
	1 мес.	0,08	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03
	Суммарная стандартная неопределённость СПТС и СПТС $\cdot 10^{-4}, \text{ °C}$								
	<i>и СПТС</i>	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3
		Время, τ		Временной уход показаний эталонной ячейки за 1 сутки $\Delta \bar{C} = \bar{C}_1 - \bar{C}_2 \cdot 10^{-4}, \text{ мСм/см}$					
Эталонная ячейка СТ01	$\Delta C_{\text{ср}}$	-	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
	$\Delta C_{\text{макс}}$	-	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8
	Суммарная стандартная неопределённость эталонной ячейки <i>и СCell</i> $\cdot 10^{-4}, \text{ мСм/см}$								
	<i>и СCell</i>	-	11,2	11,5	10,0	7,3	5,8	6,2	6,7

от него в 50 мм. Внутренний диаметр трубки на участке между крайними электродами сужен до 4 мм.

Датчики УЭП калибровались в прецизионном термобаке, заполненном искусственной морской водой солёностью $32,4 \div 35,2$ с помощью многоразовых измерений по 7, реже 8 точкам температурного диапазона от 30 до $-1,64$ °С методом их сличения с эталонной ячейкой калибратора (стандарта электропроводимость-температура) СТ01 «Установки для измерения УЭП морской воды ВНИРО».

ССН измерения УЭП в термобаке, выполняемая с помощью эталонной ячейки в процессе калибровки, и величина её возможного временного дрейфа за единицу времени представлена в табл. 2.

Для измерителей СТД-зондов фирмы «SeaBird» SBE19plus, SBE19plusV2, SBE16plus, SBE16plusV2, SBE37SM и SBE37SICФП имеет вид:

$$C = \frac{[g + h \cdot f^2 + i \cdot f^3 + j \cdot f^4]}{[1 + \delta \cdot T + \varepsilon \cdot p]}, \quad (5)$$

Для СТД-зонда SBE25:

$$C = \frac{[g + h \cdot f^2 + i \cdot f^3 + j \cdot f^4]}{[1 + \delta \cdot T + \varepsilon \cdot p] \cdot 10}, \quad (6)$$

где f — частота измеренного сигнала, кГц; T — температура, °С; МПТШ-68, и p — давление, дбар; g, h, i, j — калибровочные коэффициенты СФП.

Учёт влияния температуры и давления на постоянную ячейки осуществляется с помощью эмпирического выражения:

$$1 + \delta \cdot T + \varepsilon \cdot p;$$

где $\delta = 3,25 \cdot 10^{-6} \cdot \text{°C}^{-1}$ — поправочный коэффициент на влияние температуры T ; $\varepsilon = -9,5700 \cdot 10^{-8} \cdot \text{дбар}^{-1}$ — поправочный коэффициент на влияние давления p .

Для ряда СТД-зондов модели SBE37SM и SBE37SI:

$$f = f_{\text{INSRFREQ}} \sqrt{(1,0 + \text{WBO}TC \cdot T) / 1000,0}, \quad (7)$$

где WBO TC — поправочный коэффициент влияния температуры на измеряемую частоту сигнала $f_{\text{INSR.FREQ}}$ (для каждой ячейки ин-

дивидуально определяется на фирме изготовителе и указан в сертификате калибровки).

Датчики избыточного (гидростатического) давления. Все СТД-зонды «Sea Bird», калиброванные в период с 2008 по 2017 гг., были оснащены датчиками, использующими в качестве чувствительного элемента полупроводниковые тензорезисторы [Рамазин, Левашов, 2016], СФП которых с учётом температурной компенсации имеет вид:

$$p = PA0 + PA1 \cdot N + PA2 \cdot N^2, \quad (8)$$

где $N = X \times PTCSB0 / (PTCSB0 + PTCSB1 \cdot T_p + PTCSB2 \cdot T_p^2), \quad (9)$

$$X = P_{\text{output}} - (PTCA0 + PTCA1 \cdot T_p + PTCA2 \cdot T_p^2), \quad (10)$$

$$T_p = PTEMPA0 + PTEMPA1 \cdot Y + PTEMPA2 \cdot Y^2, \quad (11)$$

P_{output} — код (необработанные данные) датчика давления; Y — код (необработанные данные) компенсационного термистора; $PA0, PA1, PA2$ — калибровочный коэффициенты уравнения (8); $PTEMPA0, PTEMPA1, PTEMPA2$ — калибровочные коэффициенты уравнения (11); T_p — температура датчика давления, °С.

Реализация алгоритма компенсации осуществляется следующим образом:

в процессе калибровки датчиков температуры и УЭП СТД-зонда в термобаке выполняются измерения температуры T , давления P_{output} и кодовых значений показаний компенсационного термистора Y в 8 стабилизированных точках диапазона изменения температуры от 30 до $-1,6$ °С.

По данным измерений T и Y по методу наименьших квадратов осуществляется вычисление калибровочных коэффициентов уравнения (11). Долговременные калибровочные коэффициенты $PTCSB0, PTCSB1, PTCSB2, PTCA0, PTCA1, PTCA2$ уравнений (9 и 10) приводятся в первичном сертификате калибровки. Калибровочные коэффициенты $PA0, PA1, PA2$ уравнения (8) рассчитываются по методу наименьших квадратов в процессе калибровки датчика давления по данным сравнения образцовых значений давления грузопоршневого манометра

(ГМ) модели 58–1 фирмы «EG&G Chandler Engineering» (США) или модели 580DX фирмы «DH-Budenberg GmbH» (Германия) и кодовых значений N , рассчитанных по формулам (8–11). Расширенная относительная неопределённость образцовых ГМ ($K=2$) составляла 0,02%.

При анализе временного ухода датчиков давления принималось допущение о неизменности всех коэффициентов уравнений температурной компенсации (9–11).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Датчики температуры. Для каждого значения частоты датчика температуры f_i , соответствующей одной из 8 точек калибровки диапазона от $-1,6$ до 30 °С по уравнениям (1–4) с учётом соответствующих калибровочных коэффициентов первой калибровки $A_{0,j}, \dots, A_{3,j}$ и следующей — $A_{0,j+1}, \dots, A_{3,j+1}$, проведён расчёт значений температуры. И рассчитан временной уход показаний датчиков температуры $\Delta\bar{T}$ как разность между двумя ближайшими калибровками $T_{i,j}(f)$ и $T_{i,j+1}(f)$.

На рис. 2 представлены диаграммы временного ухода датчиков температуры STD-зондов 7 моделей. Как видно из диаграммы временной дрейф всех датчиков температуры семи моделей STD-зондов за всё время не превысил максимально допустимого значения инструментальной погрешности (неопределённости), равного 0,005 °С.

У 65,4% датчиков температуры STD-зондов моделей SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25 временной уход между

калибровками $\Delta\bar{T}$ не превысил 0,001 °С. Ещё 21,2% калибровок этих моделей зондов — у которых временной уход не достиг 0,002 °С

Хотя у зондов моделей SBE37SM и SBE37SI только для 51% датчиков температуры временной дрейф между калибровками не превысил 0,001 °С. Зато у этих моделей для 95% датчиков временной уход не превысил 0,002 °С. В то время как у остальных STD-зондов временной уход, не достигший 0,002 °С, составил всего 86,6%.

Датчики УЭП. Для каждого значения частоты датчика УЭП f_i , соответствующего одной из 7÷8 точек калибровки диапазона изменения УЭП от 53 (реже 58) мСм/см до 27 мСм/см, по уравнениям (5–7) с учётом соответствующих калибровочных коэффициентов одной калибровки g_j, h_j, i_j, j_j и следующей за ней $g_{j+1}, h_{j+1}, i_{j+1}, j_{j+1}$, проведён расчёт значений УЭП. Затем вычислен временной уход показаний датчиков УЭП $\Delta\bar{C}$ как разность между двумя ближайшими калибровками $C_{i,j}(f)$ и $C_{i,j+1}(f)$. При этом проанализирован дрейф калибровочных характеристик для моделей SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25 за периоды, не превышающие 15 месяцев (рис. 3 а), 24 месяцев (рис. 3б) и без учёта межкалибровочного периода (рис. 3в).

Как видно из диаграммы (рис. 3а, б, в) датчики УЭП этих 5 моделей в (43,4÷63,0)% случаев имеют уход калибровочных характеристик, не превышающий максимально допустимого значения инструментальной погрешности (неопределённости) измере-

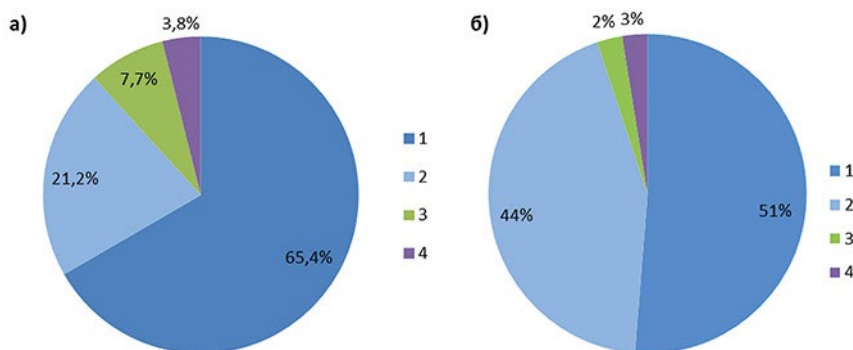


Рис. 2. Диаграмма временного ухода датчиков температуры STD-зондов: а) моделей SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25 и б) SBE37SM и SBE37SI.

Условные обозначения: 1 — $\Delta T \leq 0,001$ °С; 2 — $0,001$ °С $\leq \Delta T \leq 0,002$ °С; 3 — $0,002$ °С $\leq \Delta T \leq 0,003$ °С; 4 — $0,003$ °С $\leq \Delta T \leq 0,005$ °С

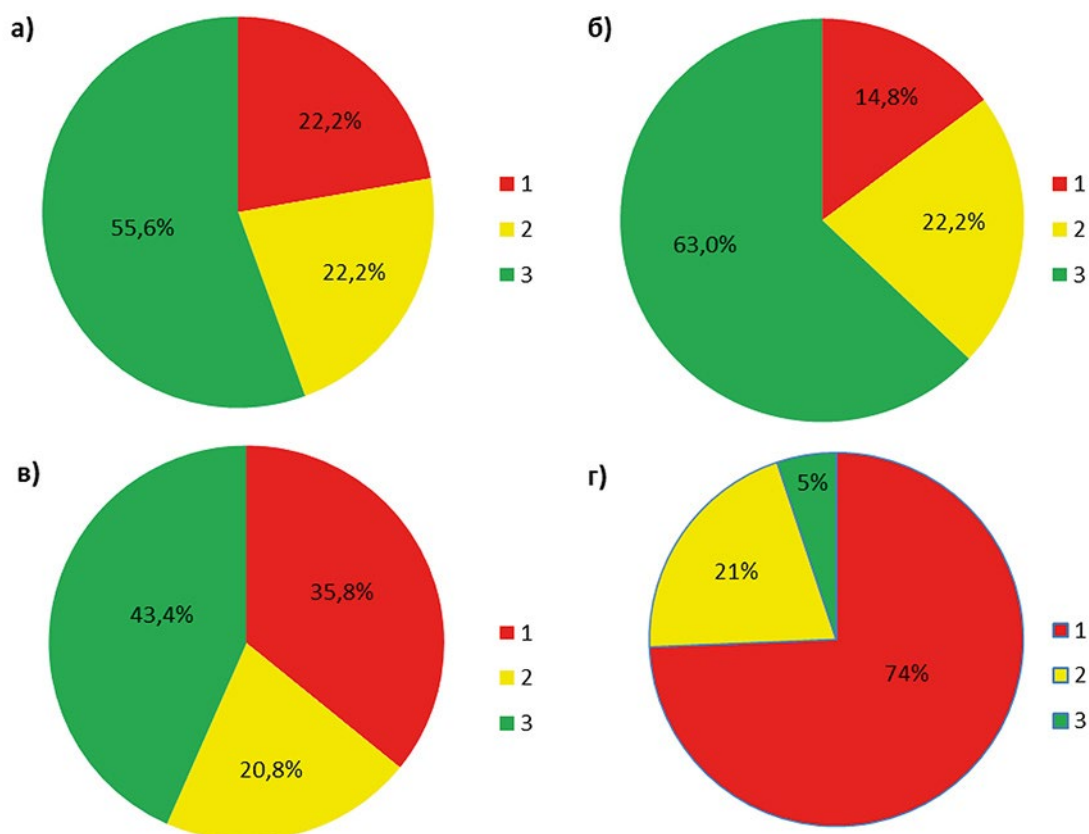


Рис. 3. Диаграмма временного ухода датчиков УЭП CTD-зондов «Sea Bird»: для моделей SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25: а) — за период ≤ 15 месяцев; б) — за период ≤ 24 месяцев; в) — без учёта межкалибровочного периода; г) — для моделей SBE37SM и SBE37SI — за всё время калибровок. Условные обозначения: 1 — $\Delta C \geq 0,015$ мСм/см; 2 — $0,005 \leq \Delta C \leq 0,014$ мСм/см; 3 — $\Delta C \leq 0,005$ мСм/см

ния УЭП, равного 0,005 мСм/см. 43,4% случаев, в которых уход калибровочных характеристик не превышает этого значения, ожидаемо приходится на самый длинный межкалибровочный период (рис. 3в).

Кроме того, для всех моделей характерно количество случаев (20,8÷22,2)%, временной уход калибровочных характеристик датчика УЭП которых, лежит на уровне $0,005 \leq \Delta C \leq 0,014$ мСм/см вне зависимости от рассматриваемого периода и модели зонда (рис. 3).

От 14,8 до 35,8% составляют случаи, когда временной уход превышает 0,015 мСм/см, при этом у моделей зондов SBE19plus временной дрейф достигал 0,068 мСм/см. У других моделей зондов эта величина не превышала 0,045 мСм/см.

СТД-зонды SBE37SM и SBE37SI используются для длительных постановок на байковые станции, где ячейка их датчика УЭП

на протяжении всего срока установки подвергается непрерывному воздействию морской воды. И как следствие, 95% датчиков УЭП имеют уход калибровочных характеристик СФП, значительно превышающий 0,005 мСм/см, максимально достигая 0,039 мСм/см.

Необходимо отметить, что перед каждой калибровкой ячейка датчика УЭП тщательно очищалась. Для этого она, примерно, на сутки заполнялась 1%-ным раствором жидкого мыла «Triton X-100», а затем промывалась пресной и дистиллированной водой. Поэтому, полученные результаты анализа временного ухода калибровочных характеристик датчиков УЭП далеко не в полной мере отражают влияние загрязнения морской водой на ячейку.

Схемы измерительных каналов температуры и УЭП построены в основном на одной элементной базе и схемотехнической идео-

логии, поэтому обладают практически одинаковой мерой прецизионности [Руководство..., 2015], что позволяет сделать вывод о том, что именно состояние кондуктивной ячейки, влияющее на её геометрические размеры и, как следствие, на величину постоянной ячейки K_{cell} , в основном определяет временной дрейф калибровочных характеристик датчика УЭП.

Сравнение результатов анализа временного ухода калибровочных характеристик датчиков УЭП STD-зондов регулярно поднимаемых на борт судна, ячейка которых в той или иной степени промывается пресной водой и STD-зондов, длительное время находящейся под воздействием морской воды (SBE37), позволяет сделать вывод об эффективности (43,4÷63,0)% и необходимости регулярной чистки ячейки датчиков УЭП путем их промывания пресной, дистиллированной водой и растворами жидкого мыла. Что правда, в свою очередь, не исключает необходимости регулярной лабораторной и морской калибровки датчиков УЭП [Рамазин, Левашов, 2016].

Датчики давления. Для каждого значения кода датчиков давления N_i , соответствующей одной из 11 (реже 9) точек калибровки диапазона давления по уравнению (8) с учётом соответствующих калибровочных коэффициентов первой калибровки $PA0_j, PA1_j, PA2_j$ и следующей — $PA0_{j+1}, PA1_{j+1}, PA2_{j+1}$ проведён расчёт значений давления. Затем вычислен временной дрейф показаний датчиков давления $\Delta\bar{p}$ как разность между двумя ближайшими калибровками $p_{i,j}(N)$ и $p_{i,j+1}(N)$. При этом за временной уход принимались значения $\Delta\bar{p}$, которые фиксировались при максимальных значениях диапазона измерения давления датчика.

Как видно из диаграммы (рис. 4) датчики давления всех 7 моделей в 54% случаев имеют уход калибровочных характеристик, не превышающий максимально допустимого значения инструментальной приведённой погрешности (неопределённости) измерения давления, равной 0,1% от полной шкалы (ПШ).

В 22% случаев при первичной калибровке датчиков давления наблюдался уход СФП,

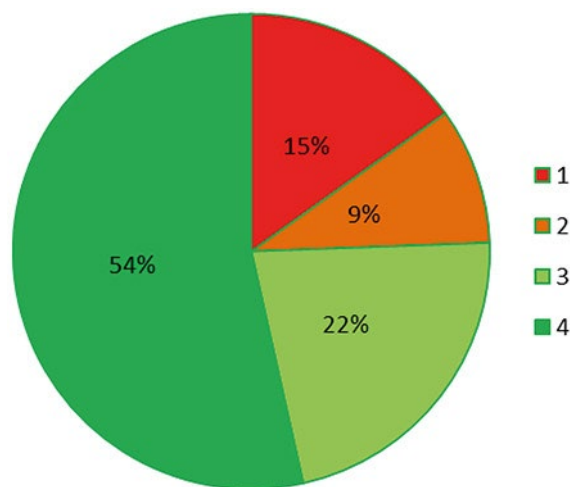


Рис. 4. Диаграмма временного ухода датчиков давления STD-зондов «Sea Bird».

Условные обозначения: 1 — 2,76% $\geq \Delta\bar{p} \geq 0,25\%$ ПШ; 2 — нестабильность показаний между калибровками; 3 — 0,25% $\geq \Delta\bar{p} \geq 0,1\%$ ПШ; 4 — $\Delta\bar{p} \leq 0,1\%$ ПШ

обусловленный, по-видимому, уровнем воспроизводимости образцовых значений избыточного давления фирмы изготовителя (2007–2009 гг.) и метрологической службой (МС) ВНИРО (2012 г.).

В 8% случаев отмечены значительные колебания СФП с переменным знаком от калибровки к калибровке. Срок между калибровками в этих случаях достигает 9 лет. И в 15% случаев наблюдались колебания СФП от калибровки к калибровке, по-видимому, являющиеся специфической особенностью конкретных зондов в связи с условиями их эксплуатации. Например, у STD-зонда SBE19plus № 4273 за 9 лет дрейф $\Delta\bar{p}$ составил 2,76% ПШ, у SBE19plus — 1,88% ПШ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ экспериментальных данных калибровок измерительных датчиков STD-зондов позволяет сделать вывод о том, что временной уход датчиков температуры за всё время наблюдений находился в пределах предельно допустимой инструментальной погрешности (неопределённости) измерений, а в (86,6÷95)% случаев — не превысил 0,002 °С.

Временной уход датчиков УЭП 5 моделей SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25 в (43,4÷63,0)% случаев имел уход калибро-

вочных характеристик, не превышающий максимально допустимого значения инструментальной погрешности (неопределённости) измерения УЭП, равной 0,005 мСм/см. Этот результат отчасти обусловлен процедурой очистки ячеек зондов перед каждой калибровкой.

Временной уход датчиков УЭП SBE37SM и SBE37SI, несмотря на проведение очистки ячеек перед каждой калибровкой, в 95% случаев превысил максимально допустимое значение инструментальной погрешности (неопределённости) измерения УЭП.

Сравнение результатов анализа временного ухода калибровочных характеристик датчиков УЭП STD-зондов, регулярно поднимаемых на борт судна, ячейка которых в той или иной степени ополаскивалась пресной водой и STD-зондов, длительное время находящихся под воздействием морской воды (SBE37), позволяет сделать вывод о необходимости и эффективности (43,4÷63,0)% регулярной чистки ячейки датчиков УЭП путём их промывки пресной, дистиллированной водой и растворами жидкого мыла.

Условия эксплуатации и качество профилактического обслуживания STD-зондов значительно влияют на метрологические характеристики измерительных ячеек за счёт изменения их геометрических размеров и, как следствие, на величину постоянной ячейки K_{cell} , в основном определяя временной дрейф калибровочных характеристик датчика УЭП.

Датчики давления всех моделей STD-зондов всех 7 моделей в 54% случаев имеют уход калибровочных характеристик, не превышающий максимально допустимое значение инструментальной приведённой погрешности (неопределённости) измерения давления, равной 0,1% от полной шкалы.

Большинство случаев дрейфа, когда он (Δp) превышал величину предельно допустимой инструментальной погрешности (неопределённости) датчика, наблюдались из-за недостаточной воспроизводимости значений избыточного давления образцовыми средствами измерения фирмы изготовителя и МС ВНИРО, находящейся на уровне (0,13÷0,25)% ПШ. Более значительный уход СФП наблюдался при очень больших межкалибровочных периодах или в силу специфических особенностей эксплуатации зондов.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипкин В.С., Лазарюк А.Ю., Левашов Д.Е., Рамазин А.Н. 2009. Океанология: инструментальные методы измерения основных параметров морской воды. М.: МАКС Пресс. 336 с.
- Левашов Д.Е. 2003. Техника экспедиционных исследований: инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО. 400 с.
- Рамазин А.Н. 2016. Некоторые научно-методические аспекты метрологического обеспечения измерений электропроводности и температуры морской воды с помощью STD-зондов // Труды ВНИРО, Т. 159. С. 167–182.
- Рамазин А.Н., Левашов Д.Е. 2016. Методические рекомендации по калибровке и метрологическому обеспечению измерителей параметров водной среды. М.: Изд-во ВНИРО. 127 с.
- Рамазин А.Н. 2018. Оценка неопределённости калибровки и измерений датчиков температуры STD-зондов «Sea Bird» // Системы контроля окружающей среды. Вып.14 (34). С. 33–42.
- Рекомендации по стандартизации Р50.01.097–2014. 2015. Статистические методы. Примеры измерений при анализе повторяемости и воспроизводимости. М.: Стандартинформ. 34 с.
- Pederson A.M., Gregg M.C. 1979. Development of a Small *In situ* Conductivity Instrument // IEEE J. Ocean Engineering. V. OE-04. N 3. pp. 69–75.

Поступила в редакцию 23.10.2019 г.
Принята после рецензии 18.04.2020 г.

Equipment for fisheries research

Temporal drift of calibration characteristics measuring sensors CTD probes «Sea Bird»*A.N. Ramazin, D.A. Ivashchenko*

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI «VNIRO»), Moscow

The results of analysis for the studies of experimental data drift of temperature sensors calibration characteristics, conductivity and pressure completed during the calibration of 7 models of CTD probes «Sea Bird» sensors from 2008 to 2017 are presented. It was shown that temporal drift of temperature sensors for the entire time of observation in 86.6 ÷ 95% of cases did not exceed 0.002 °C. The temporal drift of the SEC sensors SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25 in 43.4 ÷ 63.0% of cases did not exceed 0.005 mS/cm. It is concluded that temporal drift of calibration characteristics of SEC sensor mainly determines the conditions of their operation and quality of preventive maintenance of the CTD-probe cells. It is shown that the temporal drift of pressure sensors of all 7 models in 54% of cases have a drift of calibration characteristics not exceeding 0.1% of the full scale (FS).

Keywords: CTD-probe, temporal drift, calibration coefficient, sensors temperature, specific electrical conductivity (SEC) and pressure, SEC cell.

DOI: 10.36038/2307-3497-2020-182-191-200

REFERENCES

- Arhipkin V.S., Lazaryuk A. Yu., Levashov D.E., Ramazin A.N.* 2009. Okeanologiya: instrumental'nye metody izmereniya osnovnykh parametrov morskoy vody [Oceanology: instrumental methods for measuring the basic parameters of sea water]. M.: MAKSS Press. 336 s.
- Levashov D.E.* 2003. Tekhnika ekspeditsionnykh issledovaniy: Instrumental'nye metody i tekhnicheskie sredstva ocenki promyslovo-znachimyykh faktorov sredy [Facilities and technique for marine surveys: Instrumental methods and components for estimating the fishing-significant characteristics of water medium]. M.: Izd-vo VNIRO. 400 s.
- Ramazin A.N.* 2016. Nekotorye nauchno-metodicheskie aspekty metrologicheskogo obespecheniya izmereniy elektroprovodnosti i temperatury morskoy vody s pomoshch'yu STD-zondov [Some scientific and methodological aspects of metrological supply of conductivity and sea water temperature measurements with CTD-probes] // Trudy VNIRO. T. 159. S. 167–182.
- Ramazin A.N., Levashov D.E.* 2016. Metodicheskie rekomendatsii po kalibrovke i metrologicheskomu obespecheniyu izmeritelej parametrov vodnoy sredy [Guidelines for calibration and metrological support of measuring instruments for the parameters of the aquatic environment]. M.: Izd-vo VNIRO. 127 s.
- Ramazin A.N.* 2018. Ocenka neopredelyonnosti kalibrovki i izmereniy datchikov temperatury STD-zondov «Sea Bird» [Evaluation of calibration and measurement uncertainty of temperature sensors of CTD-probe «Sea Bird»] // Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. Vyp.14 (34), S. 33–42.
- Rekomendatsii po standartizatsii R50.01.097–2014.* 2015. Statisticheskie metody. Primery izmereniy pri analize povtoryaemosti i vosproizvodimosti [ISO/TR 12888:2011. Selected illustrations of gauge repeatability and reproducibility studies (IDT)]. M. Standartinform. 34 s.
- Pederson A.M., Gregg M.C.* 1979. Development of a Small *In situ* Conductivity Instrument // IEEE J. Ocean Engineering. V. OE-04. № 3. pp. 69–75.

TABLE CAPTIONS

Table 1. List of CTD probes «Sea Bird» calibrated during the period 2008–2017.

Table 2. Metrological characteristics of the working standards “Devices for measuring SEC of VNIRO sea water” using for CTD probes calibration.

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Calibration Tools for CTD Probes. Moment of calibration of pressure sensor and its temperature compensation

Fig. 2. Temporal drift diagram for temperature sensors of CTD probes: a) models SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25 and b) SBE37SM and SBE37SI; Symbols: 1 — $\Delta T \leq 0.001$ °C; 2 — 0.001 °C $\leq \Delta T \leq 0.002$ °C; 3 — 0.002 °C $\leq \Delta T \leq 0.003$ °C; 4 — 0.003 °C $\leq \Delta T \leq 0.005$ °C

Fig. 3. Temporal drift diagram for specific electrical conductivity (SEC) sensors of CTD probes «Sea Bird»: for models SBE16plusV2, SBE19plus, SBE19plusV2, SBE25 a) — for a period of ≤ 15 months; b) — for a period ≤ 24 months; c) — excluding the intercalibration period; d) — for models SBE37SM and SBE37SI — for all calibration time; Symbols: 1 — $\Delta C \geq 0.015$ mS/cm; 2 — $0.005 \leq \Delta C \leq 0.014$ mS/cm; 3 — $\Delta C \leq 0.005$ mS/cm

Fig. 4. Diagram of temporal drift of pressure sensors CTD probes «Sea Bird». Symbols: 1 — $2.76\% \geq \Delta \bar{p} \geq 0.25\%$ FS; 2 — instability of readings between calibrations; 3 — $0.25\% \geq \Delta \bar{p} \geq 0.1\%$ FS; 4 — $\Delta \bar{p} \leq 0.1\%$ FS