

Tretyakov Sergey Vladimirovich – e-mail: tretyakov@vector.ttn.ru; deputy director; cand. of eng. sc.

Kolosov Kirill Vladimirovich – Reacont Ltd; e-mail: k.v.kolosov@mail.ru; 13A, Kashirskoye shosse, Moscow, 115230, Russia; phone/fax: +74957415576; deputy director; cand. of eng. sc.

Kutsenko Alexander Nikolayevich – Southern Federal University; e-mail: kan1208@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone/fax: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 551.463.22

И.И. Микушин, Г.Н. Серавин

КАЛИБРОВКА ИМПУЛЬСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДЕ

Целью проведенных исследований явилось теоретическое обоснование и разработка алгоритма калибровки и градуировки аппаратуры измерения скорости звука (ИСЗ), использующей импульсно-циклический или прямой импульсный метод измерения скорости звука в воде. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: выявлены распределения систематических погрешностей канала измерения скорости звука импульсно-циклических и прямых импульсных ИСЗ в нормальных условиях с применением калибровочных жидкостей (пресная вода, растворы в ней поваренной соли или этилового спирта) и эталонного ИСЗ; выработаны технические предложения по повышению точности измерения скорости звука перспективными импульсными ИСЗ с использованием N-го, а также i-го и N-го отраженных в акустической базе ультразвуковых импульсов; рассмотрены алгоритмы калибровки и градуировки ИСЗ в воде; разработаны основные положения методики градуировки ИСЗ. В результате исследований установлено и экспериментально доказано, что при калибровке ИСЗ необходимо минимизировать погрешность измерения скорости звука программно-аппаратным способом за счет корректуры вводимых коэффициентов преобразования времени распространения импульса (или его частоты) в значение скорости звука, а в последующем при градуировке ИСЗ в процессе его эксплуатации проверять систематическую погрешность измерения скорости звука минимум в двух точках – в середине и на одном конце диапазона измерения.

Скорость звука; измеритель; калибровка; градуировка.

I.I. Mikushin, G.N. Cerawin

CALIBRATION OF PULSE METERS OF SOUND SPEED IN WATER

The aim of the research was a theoretical study and development of calibration and graduation algorithm of the speed of sound measuring equipment, using pulse-cyclical or direct pulse method for the speed of sound measuring in water. To achieve this goal we solved following tasks: distribution identification of systematic errors of the speed of sound measuring using the above method in normal conditions with calibration liquids (fresh water, saline or ethanol solutions in water) and a reference method of the speed of sound measuring; development of technical proposals to improve the measuring accuracy of the speed of sound by the promising pulse measuring equipment using N-th, as well as i-th and N-th ultrasonic pulses present at the acoustic basis; consideration of the calibration and graduation algorithms of the speed of sound measuring in water; development of the basic provisions of the graduation methods for the speed of sound measuring. As a result of studies we found and experimentally proved, that at the calibration it is necessary to minimize the speed of sound measuring error by hardware – software method using correction of input conversion factors of the pulse (or its frequency) propagation time in the value of the speed of sound; and further, at the graduation, the systematic measuring error testing in at least two points – in the middle, and at one end of the measuring range, is needed.

Sound speed; meter; calibration; graduation.

Введение. Современные боевые корабли оснащены аппаратурой измерения скорости звука (ИСЗ) и построения ее вертикального распределения по глубине, знание и учет которого позволяет существенно повысить эффективность использования гидроакустических средств освещения подводной обстановки [1, 14–17, 19]. Федеральным законом России осуществление деятельности в области гидрометеорологии включено в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений, так как данный вид деятельности непосредственно связан с обеспечением обороны и безопасности государства [2]. Следовательно, измерение скорости звука обязательно должно выполняться с использованием средств измерений, прослеживаемых к национальным эталонам [3, 4]. Вопрос проведения калибровки аппаратуры ИСЗ непосредственно на корабле без ее демонтажа по унифицированной методике требует своего разрешения с учетом научной обоснованности [5, 18].

Постановка задачи. Калибровка – это совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным данным средством измерений и соответствующим значением величины, определенным посредством использования эталона с целью определения действительных метрологических характеристик и/или пригодности к применению этого средства измерений [6]. Калибровка измерительных каналов проводится метрологическими службами предприятий, осуществляющих выпуск аппаратуры из производства или ее эксплуатацию.

Если целью калибровки измерительного средства является уточнение зависимости между его показаниями и размером измеряемой величины (градуировочной характеристики), то имеет место метрологическая операция градуировки. Под градуировкой понимается процесс приведения показаний рабочего ИСЗ в соответствии с показаниями эталонного измерителя скорости звука (ЭИСЗ).

Далее будем полагать, что калибровка ИСЗ производится в нормальных условиях с применением калибровочных жидкостей (пресная вода, растворы в ней поваренной соли или этилового спирта), а у ИСЗ значения случайной погрешности измерения значительно меньше по сравнению со значениями его возможных систематических погрешностей. Предполагается также, что ИСЗ снабжен вычислительным блоком (микропроцессором) [20].

Рассмотрим алгоритмы калибровки и градуировки ИСЗ, использующих в своей основе импульсно-циклический и прямой импульсный методы измерения скорости звука в морской воде.

1 Импульсно-циклические измерители скорости звука в воде. В настоящее время наиболее распространёнными измерителями скорости звука в море являются импульсно-циклические [7, 8]. В датчике такого ИСЗ устанавливается непрерывное генерирование последовательности ультразвуковых (УЗ) импульсов в идеальном случае с частотой следования

$$F = C / L_0, \quad (1)$$

где C – скорость звука в воде в диапазоне измерения от C_1 до C_2 ; $L_0 = 2 \cdot l_0$ – расчётный путь распространения акустического сигнала; l_0 – расчётное расстояние между акустическим преобразователем и отражателем в акустической базе датчика.

Показания частотомера ЭИСЗ в зависимости от скорости звука в воде будут соответствовать

$$C_0(C) = F \cdot L_0 = C. \quad (2)$$

В реальных условиях в электроакустическом кольце (ЭАК) датчика, кроме «полезного» времени распространения акустического сигнала $t_c = L / C$, всегда имеется дополнительная неинформационная временная задержка сигнала, обусловленная в основном акустической базой $\tau_3 \approx (2 \cdot f)^{-1} + (8 \cdot f)^{-1}$, где f – несущая частота УЗ радиопульса. Для $f \approx 2,5$ МГц, $\tau_3 \approx 0,25$ мкс.

Период следования импульсов в реальном ЭАК равна $t_\tau = t_c + \tau_3$, а их частота следования – выражению

$$F_\tau = \frac{1}{t_\tau} = \frac{C}{L_0 + \tau_3 \cdot C}. \quad (3)$$

Полагая $C \approx 1500$ м/с, получим для $\tau_3 \approx 0,25$ мкс увеличение эффективной длины L_0 на $\Delta L_{\tau_3} \approx \tau_3 \cdot C \approx 0,4$ мм.

Зависимость показаний частотомера ИСЗ от скорости звука в воде для этого случая будут соответствовать выражению

$$C_\tau(C) = F_\tau \cdot L_0. \quad (4)$$

Зависимость систематической погрешности от скорости звука будет равна

$$\Delta C_\tau(C) = C_\tau(C) - C. \quad (5)$$

Таким образом, наличие дополнительной временной задержки τ_3 в ЭАК согласно соотношениям (3) и (4) приводит к занижению по сравнению с расчетными формулами (1) и (2) значений частоты следования импульсов и измеряемой скорости звука.

Влияние дополнительной временной задержки τ_3 можно значительно уменьшить компенсацией её в средней точке C_0 диапазона измерения скорости звука путем уменьшения пути L_0 до значения L_τ , так, чтобы частота следования импульсов в реальном ЭАК была равна расчетному её значению по «идеальной» формуле (2), т.е. $F_\tau(C_0) = F(C_0)$ или $C_0 / (L_\tau + C_0 \cdot \tau_3) = C_0 / L_0$, откуда

$$L_\tau = 2 \cdot l_\tau = L_0 - C_0 \cdot \tau_3. \quad (6)$$

В этом случае частота следования импульсов в ЭАК будет равна $F_{\tau_0} = \frac{C}{L_0 + (C - C_0) \cdot \tau_3}$. Зависимость показаний частотомера от скорости звука в воде будет соответствовать выражению

$$C_{\tau_0}(C) = F_{\tau_0} \cdot L_0. \quad (7)$$

Зависимость систематической погрешности от скорости звука в этом случае равна

$$\Delta C_{\tau_0}(C) = C_{\tau_0}(C) - C. \quad (8)$$

Наибольшее распространение получили импульсно-циклические датчики скорости звука в воде с компенсацией τ_3 уменьшением до l_τ в акустической базе расстояния l_0 между акустическим преобразователем и отражателем.

В табл. 1 представлены рассчитанные по (5) и (8) значения систематической погрешности скорости звука $\Delta C_\tau(C)$ и $\Delta C_{\tau_0}(C)$ в характерных точках диапазона при следующих исходных данных: $L_0 = 0,1$ м, $\tau_3 = 0,25$ мкс, $C_1 = 1405$ м/с и $C_2 = 1560$ м/с.

Таблица 1

Значение систематических погрешностей

| C , м/с | 1405 | 1465 | 1480 | 1495 | 1560 |
|---------------------------|------|-------|--------|--------|-------|
| ΔC_{τ} , м/с | -4.9 | -5.3 | -5.5 | -5.6 | -6.1 |
| ΔC_{τ_0} , м/с | 0.28 | 0.055 | 0 | -0.056 | -0.31 |
| | 0.23 | 0 | -0.055 | -0.11 | -0.37 |
| | 0.33 | 0.11 | 0.056 | 0 | -0.25 |

Из табл. 1 видно, что наличие некомпенсированной временной задержки τ_3 , приводит к значительным систематическим погрешностям измерения скорости звука. Если при компенсации τ_3 значение C_0 соответствует точно середине диапазона измерения скорости звука, то абсолютные значения систематической погрешности на краях диапазона практически совпадают, т.е. $|\Delta C_{\tau_0}(C_1)| \approx |\Delta C_{\tau_0}(C_2)|$. При смещении значения C_0 к началу диапазона, абсолютное значение систематической погрешности в конце диапазона будет больше, чем её значение в начале диапазона, то есть $|\Delta C_{\tau_0}(C_2)| > |\Delta C_{\tau_0}(C_1)|$. При смещении значения C_0 к концу диапазона, наоборот, абсолютное значение систематической погрешности в начале диапазона будет больше, чем её значение в конце диапазона $|\Delta C_{\tau_0}(C_1)| > |\Delta C_{\tau_0}(C_2)|$.

В последнее время встречаются импульсно-циклические ИСЗ, у которых в ЭАК база имеет фиксированное расстояние l между акустическим преобразователем и отражателем [9], т.е. постоянное номинальное значение пути распространения акустического сигнала в базе $L \approx L_0$, известно с некоторой погрешностью $\pm \Delta L_0$. У этих ИСЗ электроника выполнена на микросхемах. Показания частотомера в зависимости от скорости звука в воде соответствует выражению

$$C_{FL}(C) = F_{\tau l} \cdot L_0 = \frac{C \cdot L_0}{L + \tau_3 \cdot C}, \quad (9)$$

а значения систематической погрешности от скорости звука в воде соотношению

$$\Delta C_{FL}(C) = C_{FL}(C) - C. \quad (10)$$

В данном случае возможно проведение компенсации τ_3 в середине диапазона измерения скорости звука аппаратно-программным способом, используя микропроцессор ИСЗ. Для этого в программе микропроцессора зависимость измеренной скорости звука по диапазону приводят в следующий вид $C_{FK}(C) = F_{FL} \cdot K_F$. Ей соответствует зависимость систематической погрешности

$$\Delta C_{FK}(C) = F_{FL} \cdot K_F - C. \quad (11)$$

Здесь K_F – коэффициент преобразования частоты следования импульсов в ЭАК в значение скорости звука, имеющий размерность длины, величина которого в процессе градуировки ИСЗ аппаратно-программным способом может изменяться. В точке C_0 диапазона его значение будет равно $K_F = L + C_0 \cdot \tau$.

В табл. 2 представлены значения систематических погрешностей $\Delta C_{FL}(C)$ и $\Delta C_{FK}(C)$ скорости звука при различных K_F в характерных точках диапазона рассчи-

танные по (10) и (11) при следующих исходных данных: $L_0 = 0,1$ м, $L = 0,1002$ м, $\tau_3 = 0,25$ мкс, $C_1 = 1405$ м/с и $C_2 = 1560$ м/с, $K_F = 0,10057$ ($C_0 = 1480$ м/с), $0,100566$ ($C_0 = 1465$ м/с) и $0,100574$ ($C_0 = 1495$ м/с). $\Delta C_{FK}(C) = \Delta C_{FL}(C)$ при $K_F = 0,1$.

Из сопоставления табл. 1 с табл. 2 следует, что при тех же исходных данных они идентичны, то есть в импульсно-циклических ИСЗ компенсация τ_3 в середине диапазона измерения скорости звука способом изменения значения l_0 и аппаратно-программным способом при постоянном значении l дают одинаковые результаты, при этом компенсация τ_3 аппаратно-программным способом значительно менее трудоёмка.

Таблица 2

Значения систематической погрешности $\Delta C_{FK}(C)$, м/с

| K_F | $C, \text{ м/с}$ | | | | |
|----------|------------------|-------|--------|--------|-------|
| | 1405 | 1465 | 1480 | 1495 | 1560 |
| 0,1 | -7.7 | -8.2 | -8.4 | -8.5 | -9,1 |
| 0,10057 | 0.28 | 0.055 | 0 | -0.056 | -0.3 |
| 0,100566 | 0.23 | 0 | -0.055 | -0.11 | -0.37 |
| 0,100574 | 0.33 | 0.11 | 0.056 | 0 | -0.25 |

Для приведения показаний ИСЗ к показаниям ЭИСЗ во всём диапазоне измерения скорости звука необходимо к показаниям ИСЗ $C_{FK}(C)$ внести аппаратно-программным способом поправки, которые равны систематическим погрешностям с обратным знаком. Тогда показания отградуированного импульсно-циклического ИСЗ с постоянной базой будут равны $C_{FK}(C)_Г = C_{FK}(C) - \Delta C_{FK}(C)$.

2. Измерители скорости звука в воде на прямом импульсном методе. Автоматизированные прямо-импульсные ИСЗ были предложены сравнительно недавно, так как они могут быть реализованы только при использовании современных цифровых микросхемных электроэлементов. В этих ИСЗ значения скорости звука находят по измеренным значениям времени распространения УЗ импульса в акустической базе с постоянным значением L .

Известны [10, 11] два основных варианта выполнения датчиков скорости звука этих ИСЗ: 1) использование N -го отраженного в акустической базе УЗ импульса; 2) использование i -го и N -го отраженных в акустической базе УЗ импульсов.

2.1. Использование N -го отраженного УЗ импульса. В этом случае уровень принятых импульсов уменьшается по экспоненте. При этом каждый последующий принятый радиоимпульс меняет фазу высокочастотного заполнения на 180^0 при отражении от акустического преобразователя. Используются многократные отражения акустических импульсов в базе и формирование временного интервала по амплитуде n -го полупериода N -го отражённого от отражателя и акустического преобразователя базы принятого радиоимпульса. Для акустического преобразователя базы подобной как в зонде аппаратуры «Съёмка-ИСЗ» [12] и при измерении времени t_N по положительной амплитуде 2-го полупериода принятого радиоимпульса $N = 1, 3, 5, \dots$, т.е. нечётные импульсы.

Измеренные значения временных интервалов t_N в этом случае будут равны

$$t_N(C) = \frac{2 \cdot l \cdot N}{C} + \tau_3, \text{ а первоначально рассчитанное показание ИСЗ } C_N(C) = L_0 / t_N.$$

Здесь N – используемый отражённый принятый импульсный сигнал.

Значения систематической погрешности находят по соотношению

$$\Delta C_N(C) = C_N(C) - C. \quad (12)$$

В данном случае также возможна компенсация τ_3 в середине диапазона измерений скорости звука аппаратно-программным способом. Для этого зависимости измеренной скорости звука $C_{NK}(C)$ и систематической погрешности $\Delta C_{NK}(C)$ по диапазону приводят в следующий вид

$$C_{NK}(C) = K_N / t_N \\ \Delta C_{NK}(C) = C_{NK}(C) - C = K_N / t_N - C. \quad (13)$$

Здесь K_N – коэффициент преобразования времени распространения УЗ импульсов в значения скорости звука, имеющий размерность длины.

В табл. 3 представлены значения систематических погрешностей $\Delta C_N(C)$ и $\Delta C_{NK}(C)$ скорости звука при различных K_N в характерных точках диапазона рассчитанные по (12) и (13) при следующих исходных данных: $l_0 = 0,09$ м, $N = 1$, $L_0 = 2 \cdot l_0 \cdot N = 0,18$ м, $L = 0,1804$ м. $C_1 = 1405$ м/с, $C_2 = 1560$ м/с, $\tau_3 = 0,2$ мкс, $K_N = 0,180696, 0,180693$ и $0,180699$. $\Delta C_{NK}(C) = \Delta C_N(C)$ при $K_N = 0,18$.

Таблица 3

Значения систематической погрешности, $\Delta C_{NK}(C)$, м/с

| K_N | $C, \text{ м/с}$ | | | | |
|----------|------------------|------|-------|-------|-------|
| | 1405 | 1465 | 1480 | 1495 | 1560 |
| 0,18 | -5.3 | -5.6 | -5.7 | -5.9 | -6 |
| 0,180696 | 0.12 | 0.02 | 0 | -0.02 | -0.14 |
| 0,180693 | 0.1 | 0 | -0.02 | -0.05 | -0.16 |
| 0,180699 | 0.15 | 0.05 | 0.02 | 0 | -0.1 |

Из сравнения соотношений (13) и табл. 3 с выражениями (11) и табл. 2 видно, что с учётом в различии исходных данных они аналогичны.

Показания отградуированного прямо-импульсного ИСЗ с использованием N -го отраженного в акустической базе УЗ импульса в общем случае будут соответствовать выражению $C_{NK}(C)_r = C_{NK}(C) - \Delta C_{NK}(C)$.

2.2. Использование i -го и N -го отраженных УЗ импульсов. Формирование временного интервала производится по амплитудам n -го полупериода i -го и N -го принятых из многократно отражённых от отражателя и акустического преобразователя базы радиоимпульсов.

Микропроцессор определяет по амплитудам n -го полупериода времена прихода i -го и N -го принятых радиоимпульсов, а затем находит временные интервалы $t_{N-i}(C)$ по соотношению $t_{N-i}(C) = t_N(C) - t_i(C) = \frac{2 \cdot l \cdot (N-i)}{C}$, и первоначально рассчитанные показания ИСЗ

$$C_{N-i}(C) = L_0 / t_{N-i}. \quad (14)$$

При определении временного интервала t_{N-i} должны использоваться пары принятых импульсов i и N одинаковой чётности – два чётных или два нечётных. Только при соблюдении этих условий будет иметь место отсутствие влияния неинформационной временной задержки сигнала τ_3 на определение временного интервала t_{N-i} .

Для выполнения градуировки выражение (14) преобразовывают в следующий вид

$$C_{N-i}(C)_K = \frac{K_{N-1}}{t_{N-i}} = \frac{K_{N-1}}{L} \cdot C. \quad (15)$$

Зависимость систематической погрешности $\Delta C_{N-i}(C)_K$ по диапазону примет следующий вид

$$\Delta C_{N-i}(C)_K = C_{N-i}(C)_K - C = C \cdot \left(\frac{K_{N-1}}{L} - 1 \right). \quad (16)$$

Здесь K_{N-1} – коэффициент, имеющий размерность длины, значение которого в процессе градуировки может изменяться. Из соотношений (15) и (16) следует, что когда $K_{N-1} = L$ зависимость $C_{N-i}(C)_K = C$, т.е. они совпадают и при этом систематические погрешности в показаниях ИСЗ отсутствуют. Когда $K_L > L$ значения $C_{N-i}(C)_K > C$, будут иметь место положительные систематические погрешности в показаниях ИСЗ, а при $K_L < L$ значения $C_{N-i}(C)_K < C$ и будут иметь место отрицательные систематические погрешности в показаниях ИСЗ.

В табл. 4 представлены значения систематических погрешностей $\Delta C_{N-i}(C)_K$ скорости звука при различных K_{N-1} в характерных точках диапазона рассчитанные по (16) при следующих исходных данных: $L = 0,1804$ м, $C_1 = 1405$ м/с и $C_2 = 1560$ м/с. $K_{N-1} = 0,1808, 0,1804$ и $0,18$.

Таблица 4

Значения систематической погрешности $\Delta C_{N-i}(C)_K$, м/с

| K_{N-1} | C , м/с | | | | |
|-----------|-----------|------|------|------|------|
| | 1405 | 1465 | 1480 | 1495 | 1560 |
| 0,1808 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.3 | 3.5 |
| 0,1804 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,18 | -3.1 | -3.2 | -3.3 | -3.3 | -3.5 |

Показания отградуированного (когда $K_{N-1} = L$) прямо-импульсного ИСЗ с использованием i -го и N -го отраженных в акустической базе УЗ импульса будут соответствовать выражению $C_{N-i}(C)_F = C$.

Выводы. Таким образом, методики калибровки и градуировки ИСЗ заключаются в следующем.

Измеряют в одной и той же ёмкости эталонным и рабочим ИСЗ скорость звука в пресной воде при нормальной температуре [13]. Выполняют действия с рабочим ИСЗ, которые приводят к тому, что его показание будет такое же, что и показание эталонного ИСЗ. Для этого:

1) у рабочего импульсно-циклического ИСЗ с подвижным отражателем в акустической базе изменяют расстояние между ним и акустическим преобразователем до совпадения показаний рабочего ИСЗ с эталонным;

2) у рабочего импульсно-циклического ИСЗ с постоянным расстоянием между отражателем и акустическим преобразователем совпадения показаний рабочего ИСЗ с эталонным достигают аппаратно-программным способом изменением коэффициента K_F преобразования частоты следования импульсов в ЭАК в значение скорости звука;

3) у рабочего прямо-импульсного ИСЗ с использованием N -го отраженного в акустической базе УЗ импульса совпадения показаний рабочего ИСЗ с эталонным достигают аппаратно-программным способом изменением коэффициента K_N преобразования времени распространения УЗ импульсов в значения скорости звука;

4) у рабочего прямо-импульсного ИСЗ с использованием i -го и N -го отраженного в акустической базе УЗ импульса совпадения показаний рабочего ИСЗ с эталонным достигают аппаратно-программным способом изменением коэффициента преобразования K_{N-i} .

В пунктах 1–3 если значение измеренной ЭИСЗ скорости звука C_0 соответствует точно середине диапазона измерения скорости звука, то необходимо проверить абсолютное значение систематической погрешности в начале или конце диапазона. При смещении значения C_0 к началу диапазона, необходимо проверить абсолютное значение систематической погрешности в конце диапазона. При смещении значения C_0 к концу диапазона необходимо проверить абсолютное значение систематической погрешности в начале диапазона. Если в любом из этих случаев значение систематической погрешности будет превышать допустимое значение, ввести в показания рабочего ИСЗ соответствующие поправки.

Из вышеизложенного следует, что если у рабочих ИСЗ импульсно-циклических и прямо-импульсного с использованием N -го отраженного в акустической базе УЗ импульса систематические погрешности на краях диапазона измерения скорости звука меньше допустимых значений, то их калибровку и градуировку можно проводить в двух точках – в середине и одном конце диапазона.

Калибровку и градуировку рабочего прямо-импульсного ИСЗ с использованием i -го и N -го отраженного в акустической базе УЗ импульса можно проводить в одной любой точке диапазона измерения скорости звука.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф.* Дальность действия гидроакустических средств. – Л.: Судостроение, 1981. – 208 с.
2. Об обеспечении единства измерений / Федеральный закон №102-ФЗ.
3. *Кочарян С.А., Пронин А.Н.* Особенности и современное состояние обеспечения единства гидрологических измерений // *Материалы конференции «Метрология гидроакустических измерений»*. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. – С. 174-196.
4. *Механиков А.И.* Введение в метрологию. Основы единства измерений. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. – 292 с.
5. *Бараненко А.А., Микушин И.И., Сильвестров С.В.* Состояние и перспективы развития метрологического обеспечения гидрофизических измерений // *Материалы конференции «Метрология гидроакустических измерений»*. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. – С. 5-12.

6. ПМГ 29-99. Рекомендация по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – Минск, 2000. – 50 с.
7. *Комляков В.А.* Корабельные средства измерения скорости звука и моделирования акустических полей в океане. – СПб.: Наука, 2003. – 357 с.
8. *Лободин И.Е., Микушин И.И., Серавин Г.Н.* Малогабаритный морской измеритель скорости звука «МИСЗ-100» // Материалы конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики «ГА-2004». – СПб.: Наука, 2004. – С. 41-43.
9. *Микушин И.И., Серавин Г.Н.* Автономный измерительный зонд гидрофизических параметров // Материалы конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2008)». – СПб.: Наука, 2008. – С. 257-260.
10. *Микушин И.И., Серавин Г.Н.* Методы и средства измерения скорости звука в море. – СПб.: Судостроение, 2012. – 224 с.
11. *Лобанов В.Н., Микушин И.И., Серавин Г.Н.* Прямые импульсные методы измерения скорости звука в жидкости // Известия ТРТУ. Технические науки. – 2011. – № 9 (122). – С. 239-243.
12. *Жилина Н.А., Полканов К.И., Романов В.Ю., Васильев С.А., Смелов Д.А.* Измеритель скорости звука в морской воде // Навигация и гидрография. – 2005. – № 20-21. – С. 97-101.
13. *Микушин И.И.* Метрологическое обеспечение измерения скорости звука в воде для ВМФ // Материалы конференции «Метрология гидроакустических измерений». – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. – С. 106-111.
14. Patent 3388372 USA. Determination of ocean sound velocity profiles / *De Witz G.H.* Publ. 11.06.68.
15. *Brown E.H., Farmer D.M.* The echometer-an acoustic ocean sound speed profiler – Int. Geosci. Sens. Symp. San Fransisco, Calif. 31 fugust-2 sept. 1983. – Vol. 2. – P. FA6 3/1-FA6 3/6.
16. *Brown E.H., Farmer D.M., Gilheany J.J., Woodward W.E.* The Echometer: An acoustic sound speed profiler // IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing. – 1984. – Vol. GE-22, No. 6. – P. 641-647.
17. *Leroy C.C., Parhiot F.* Depth-pressure relationships in the oceans and seas // J. Acoust. Soc. Amer. – 1998. – Vol. 103, No. 3. – P. 1346-1352.
18. *Shaar Edwin W.* ASW of the Naval Officer - Oceanographer // USNIP. – 1978. – Vol. 104, No. 2. – P. 43-49.
19. *Chace A.B., Galdorisi C.V.* Tactical ASW and Acoustic Forecasting // USNIP. – 1978. – III. – Vol. 104, No. 3. – P. 146-147.
20. <http://www/sippican.com>.

REFERENCES

1. *Matvienko V.N., Tarasyuk Yu.F.* Dal'nost' deystviya gidroakusticheskikh sredstv [The range of the hydroacoustic equipment]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 208 p.
2. Ob obespechenii edinstva izmereniy [On ensuring the uniformity of measurements], Federal'nyy zakon №102-FZ [Federal law №102].
3. *Kocharyan S.A., Pronin A.N.* Osobennosti i sovremennoe sostoyanie obespecheniya edinstva gidrologicheskikh izmereniy [Features and current state of unity maintenance of hydrological measurements], *Materialy konferentsii «Metrologiya gidroakusticheskikh izmereniy»* [The proceedings of the conference "Metrology of hydroacoustic measurements"]. Mendeleev: FGUP «VNIIFTRI», 2013, pp. 174-196.
4. *Mekhannikov A.I.* Vvedenie v metrologiyu. Osnovy edinstva izmereniy [Introduction to Metrology. the basis of measurements unity]. Mendeleev: FGUP «VNIIFTRI», 2013, 292 p.
5. *Baranenko A.A., Mikushin I.I., Sil'vestrov S.V.* Sostoyanie i perspektivy razvitiya metrologicheskogo obespecheniya gidrofizicheskikh izmereniy [The state and development prospects of metrological support of hydrophysical measurements], *Materialy konferentsii «Metrologiya gidroakusticheskikh izmereniy»* [The proceedings of the conference "Metrology of hydroacoustic measurements"]. Mendeleev: FGUP «VNIIFTRI», 2013, pp. 5-12.
6. PMG 29-99. Rekomendatsiya po mezhgosudarstvennoy standartizatsii. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Metrologiya. Osnovnyye terminy i opredeleniya [RMG 29-99. Recommendation on interstate standardization. State system for ensuring the measurements uniformity. Metrology. Basic terms]. Minsk, 2000, 50 p.

7. *Komlyakov V.A.* Korabel'nye sredstva izmereniya skorosti zvuka i modelirovaniya akusticheskikh poley v okeane [Shipboard means of measuring the speed of sound and the modeling of acoustic fields in the ocean]. St. Petersburg: Nauka, 2003, 357 p.
8. *Lobodin I.E., Mikushin I.I., Seravin G.N.* Malogabaritnyy morskoy izmeritel' skorosti zvuka «MISZ-100» [Marine small-size measuring equipment of the speed of sound" MISZ-100", *Materialy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki «GA-2004»* [Proceedings of conference "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics" GA-2004"]. St. Petersburg: Nauka, 2004, pp. 41-43.
9. *Mikushin I.I., Seravin G.N.* Avtonomnyy izmeritel'nyy zond gidrofizicheskikh parametrov [Autonomous measuring probe of hydrophysical parameters], *Materialy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki (GA-2008)»* [The proceedings of the conference "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics (GA-2008)"]. St. Petersburg: Nauka, 2008, pp. 257-260.
10. *Mikushin I.I., Seravin G.N.* Metody i sredstva izmereniya skorosti zvuka v more [Methods and means for measuring the speed of sound in the sea]. St. Petersburg: Sudostroenie, 2012, 224 p.
11. *Lobanov V.N., Mikushin I.I., Seravin G.N.* Pryamye impul'snye metody izmereniya skorosti zvuka v zhidkosti [Direct pulse methods of measurement of speed of the sound in the liquid], *Izvestiya TRTU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 9 (122), pp. 239-243.
12. *Zhilina N.A., Polkanov K.I., Romanov V.Yu., Vasil'ev S.A., Smelov D.A.* Izmeritel' skorosti zvuka v morskoy vode [Measuring equipment of the speed of sound in sea water], *Navigatsiya i gidrografiya* [Navigation and Hydrography], 2005, No. 20-21, pp. 97-101.
13. *Mikushin I.I.* Metrologicheskoe obespechenie izmereniya skorosti zvuka v vode dlya VMF [Metrological support of measuring the speed of sound in water for the Navy], *Materialy konferentsii «Metrologiya gidroakusticheskikh izmereniy»* [Proceedings of conference "Metrology of hydroacoustic measurements"]. Mendeleevo: FGUP «VNIIFTRI», 2013, pp. 106-111.
14. *De Witz G.H.* Determination of ocean sound velocity profiles. Patent 3388372 USA. Publ. 11.06.68.
15. *Brown E.H., Farmer D.M.* The echometer-an acoustic ocean sound speed profiler – Int. Geosci. Sens. Symp. San Fransisko, Calif.31 fugust-2 sept. 1983, Vol. 2, pp. FA6 3/1-FA6 3/6.
16. *Brown E.H., Farmer D.M., Gilheany J.J., Woodward W.E.* The Echometer: An acoustic sound speed profiler, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 1984, Vol. GE-22, No. 6, pp. 641-647.
17. *Leroy C.C., Parhiot F.* Depth-pressure relationships in the oceans and seas, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1998, Vol. 103, No. 3, pp. 1346-1352.
18. *Shaar Edwin W.* ASW of the Naval Officer – Oceanographer, *USNIP*, 1978, Vol. 104, No. 2, pp. 43-49.
19. *Chace A.B., Galdorisi C.V.* Tactical ASW and Acoustic Forecasting, *USNIP*, 1978, III, Vol. 104, No. 3, pp. 146-147.
20. Available at: <http://www/sippican.com>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.В. Малый.

Серавин Георгий Николаевич – Военный учебно-научный центр ВМФ «Военно-морская академия»; e-mail: srwn37@mail.ru; 196244, г. Санкт-Петербург, Витебский пр., 29, корп. 1, кв. 40; тел.: +78123789673; д.т.н.; с.н.с.

Микушин Игорь Иванович – e-mail: namik0875@mail.ru; 196603, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Саперная, 38, корп. 2, кв. 18; тел.: +78124506714; к.т.н.; докторант.

Cerawin George Nikolaevich – Military Training and Research Center of the Navy “Naval Academy”; e-mail: srwn37@mail.ru; 196244, Russia, St. Petersburg, Vitebskiy pr., 29-1-40; phone +78123789673; dr. of eng. sc.; senior researcher.

Mikushin Igor Ivanovich – e-mail: namik0875@mail.ru; 196244, Russia, St. Petersburg, Pushkin, st. Sapernaya, 38-2-18; phone: +78124506714; cand. of eng, sc.