УДК 551.46.08

ПРОФИЛОГРАФЫ СКОРОСТИ ЗВУКА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ ДЛЯ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

А.Н. Греков, Н.А. Греков, Е.Н. Сычев

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: ngrekov@nm.ru

В статье выполнен анализ профилографов скорости звука (SVP), созданных мировыми производителями океанографических приборов. Особое внимание уделено измерительному каналу скорости звука, техническим и метрологическим характеристикам. Предложен алгоритм использования таких приборов для определения плотности морской воды. С этой целью авторами разработано уравнение, позволяющее по результатам измерений температуры, давления и скорости звука рассчитать плотность водной среды. Уравнение с СКО = 0,004 кг/м^3 воспроизводит плотность морской воды в океанографической области измеряемых параметров. Приведены графики сравнения расчетной плотности морской воды с данными TEOS-10.

Ключевые слова: морская вода, скорость звука, SVP, плотность морской воды, уравнение состояния.

Введение. В настоящее время в океанологии общепринятым методом определении плотности морской воды является косвенный метод расчета плотности по уравнению вида ρ(T, P, S), где ρ, T, P, S – плотность, температура, давление и соленость морской воды соответственно. Однако, представляется вполне оправданным и полезным внедрение в практику морских исследований уравнения плотности морской воды в новой форме ρ(T, P, c), предложенной авторами в работе [1]. Здесь c – скорость звука в морской воде. Важно отметить, что, во-первых, в уравнении плотности такого вида все независимые параметры являются прямо измеряемыми in situ и, во-вторых, все проблемы по метрологическому обеспечению измерений этих параметров давно и успешно решены. Возможность использования скорости звука в качестве независимого параметра вместо солености настоятельно диктует либо дооборудование традиционных CTD-зондов дополнительным измерительным каналом скорости звука, либо перенос центра тяжести массовых океанографических измерений на другой вид приборов, а именно на SVP. В данной работе выполнен анализ существующих SVP и предложен алгоритм их использования для определения плотности морской воды.

SVP. В мире известно несколько производителей зондов (профилографов) скорости звука. Используются такие зонды для получения значений скорости звука в водной среде в зависимости от глубины. Кроме того профилографы оснащены датчиком температуры, что позволяет иметь синхронный профиль температуры. Одним из ведущих производителей профилографов скорости звука в воде является английская компания Valeport. Большинство выпущенных приборов этой компании рассчитаны для работы до глубин 6000 м. Часть профилографов может работать автономно от внутреннего источника питания, при этом измеренная информация записывается во внутреннюю память. Все профилографы снабжаются однотипными датчиками скорости звука с диапазоном измерения 1400–1600 м/с. В зависимости от длины измерительной базы, которая формируется за счет высокостабильных стержней из карбонового композитного материала, можно получить различные разрешение и точность по скорости звука. Технические и метрологические данные датчиков скорости звука при частоте излучения пьезокерамики 2,5 МГц (компания Valeport Limited), а также датчиков температуры и давления для различных диапазонов глубины приведены в табл. 1.

Все выше названные профилографы скорости звука объединены в серию MIDAS и могут включаться в различные измерительные комплексы для работы, как в режиме зондирования, так и установки на различные буйковые станции. Отметим оригинальный профилограф скорости звука компании Valeport, который может работать на ходу судна при скорости зондирования до 5 м/с и, по утверждению разработчиков, с высокими метрологическими характеристиками, соизмеримыми с приборами серии MIDAS. Хороших результатов по разработке SVP, работающих на ходу судна, достигла также компания Lockheed Martin Corporation [2]. Профилографы XSV этой компании позволяют получить профиль скорости звука до глубины 460 м при скорости судна 30 узлов. Однако погрешность определения скорости звука несколько выше и составляет ±0,25 м/с, а по температуре ±0,1°С.

Таблица 1. Технические и метрологические характеристики датчиков

Датчики с, Р и Т	Чувствительность	Диапазон	Погрешность
с (25 мм)	±0,01 м/с	1400 ÷ 1600 м/с	±0,085 м/с
с (50 мм)	±0,006 м/с	1400 ÷ 1600 м/с	±0,054 м/с
с (100 мм)	±0,003 м/с	1400 ÷ 1600 м/с	±0,027 м/с
Р	0,01%	от 0 до 100, 500, 1000 или 6000 дбар	±0,05% (10 ÷ 40°С)
Т	0,001°С	-5 ÷ +35°С	±0,01°С

Из российских разработчиков профилографов отметим АО "Концерн "Океанприбор", выпускающий прибор МГ-543ЭМ, работающий до глубин 0–350 м. Погрешность измерения канала скорости звука 0,24 м/с, что значительно уступает западным образцам.

Институт природно-технических систем (ИПТС) разработал свой SVP под названием ИСЗ-1. Технические характеристики прибора представлены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики зонда ИСЗ-1

Измеряемые и расчетные параметры	Диапазон измерения	Случайная погрешность	Погрешность
Скорость звука, м/с	1375 ÷ 1900	0,001	± 0,02
Температура воды, °С	-2 ÷ +35	0,001	± 0,01
Гидростатическое давление, кПа	0 ÷ 20000	2	± 20

Конструкция датчика скорости звука прибора ИСЗ-1 выполнена так, что ее измерительная база не зависит от внешнего давления и исключает дополнительную градуировку по давлению, что улучшает динамические характеристики. Прибор может работать до глубин 6000 м при замене датчика давления.

Методику поверки и калибровки измерителей скорости звука в водной среде разработало ФГУП "ВНИИФТРИ" Госстандарт России Р50.2.019-2001. Предлагается для градуировки использовать вторичный эталон со средним квадратическим отклонением не более 0,05 м/с при доверительной вероятности Р – 0,99, а для отдельных профилемеров использовать Государственный первичный эталон с неопределенностью 0,005 м/с.

Уравнение плотности. В работе [1] авторами было разработано уравнение состояния морской воды нового вида ρ (Т, Р, с) в котором плотность морской воды представлена в виде явной функции от таких параметров состояния морской воды, как температура, давление и скорость звука. Это уравнение является действующим в широком диапазоне параметров и предназначено для использования в технических целях в промышленных и морских технологиях. Однако, точность уравнения, разработанного в [1] является недостаточной для научного использования в морских исследованиях. В связи с этим авторами для океанографического диапазона параметров (см. табл. 3) было разработано уравнение состояния, которое может быть пригодно для использования в научных исследованиях.

Таблица 3. Океанографический диапазон параметров (согласно TEOS-10)

Диапазон давления $P_м$, дбар	Диапазон температуры T, °C	Диапазон абсолютной солености S_A, г/кг
0 ÷ 500	-6 ÷ 40	0 ÷ 42
500 ÷ 6500	-6 ÷ 40	$S_{A,min}$ (увеличивается линейно от 0 до 30 г/кг при увеличении давления $P_м$) ÷ 42
6500 ÷ 8000	-6 ÷ 10	30 ÷ 42

Для построения уравнения состояния указанного вида авторами был использован массив исходных данных по плотности, температуре, морскому (гидростатическому) давлению и скорости звука в количестве 369 741-й точки. Данные принадлежат к океанографическому диапазону параметров и расположены в узлах достаточно плотной трехмерной прямоугольной сетки независимых параметров: с шагом 0,25 МПа в диапазоне морских давлений от 0 до 80 МПа, с шагом 1°C в диапазоне температур от -6°C до $T_{max}(P_м)$ и с шагом 1‰ в диапазоне соленостей от $S_{min}(P_м)$ до 42‰. Для приготовления массива исходных данных была использована международная система TEOS-10 [3].

Разработанное авторами уравнение состояния для интерполяции плотности морской воды было принято в следующей полиномиальной форме

$$\gamma = \sum_i \sum_j \sum_k b_{ijk} \tau^i \pi^j \omega^k , \qquad (1)$$

где $\gamma = (\rho - \rho_0)/\rho^*$; $\tau = (T - T_0)/T^*$; $\pi = (P_{абс} - P_0)/P^*$; $\omega = (c - c_0)/c^*$; ρ_0 = 990 кг/м^3; ρ^* = 100 кг/м^3; T_0 = -10°C; T^* = 50°C; P_0 = 0,101325 МПа; P^* = 120 МПа; c_0 = 1300 м/с; c^* = 500 м/с.

Для уравнения (1) использована индексная матрица, приведенная в табл. 4.

Таблица 4. Индексная матрица уравнения (1)

k =	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6
j =	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	0	1	2	0	1	0
i = 0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
i = 1	+	+	+	+	–	+	+	+	+	–	+	+	+	+	–	+	+	–	+	+	–	+	+	–
i = 2	+	+	+	+	–	+	+	+	–	–	+	+	+	–	–	+	+	–	+	–	–	+	–	–
i = 3	+	+	+	–	–	+	+	+	–	–	+	+	–	–	–	+	–	–	+	–	–	–	–	–
i = 4	+	+	–	–	–	+	+	–	–	–	+	+	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–
i = 5	+	–	–	–	–	+	+	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
i = 6	+	–	–	–	–	+	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Здесь знак «+» означает, что данная комбинация индексов использована, а знак «–» означает, что данная комбинация индексов пропущена. Всего в данной индексной матрице использовано 80 комбинаций. Таким образом, уравнение (1) содержит всего 80 ненулевых коэффициентов. Коэффициенты b_{ijk} уравнения (1) были рассчитаны авторами по методу наименьших квадратов, и совместно с индексами приведены в табл. 5.

Таблица 5. Индексы и коэффициенты уравнения (1)

N	i	j	k	b_{ijk}	N	i	j	k	b_{ijk}
1	0	0	0	-0.213856838544936	41	0	0	2	-5.56929314681279
2	1	0	0	-1.77334893746215	42	1	0	2	19.8783095614506
3	2	0	0	5.15726472619408	43	2	0	2	136.02301234808
4	3	0	0	5.99690263979397	44	3	0	2	-30.9035002063163
5	4	0	0	-9.01238199271295	45	4	0	2	89.3567355245863
6	5	0	0	7.73035206306309	46	5	0	2	22.0912101559807
7	6	0	0	-0.621400147155542	47	6	0	2	-3.758305772565
8	0	1	0	-0.486290538253869	48	0	1	2	-3.06925755677761
9	1	1	0	2.67529483647669	49	1	1	2	26.5006726386554
10	2	1	0	12.9738677272812	50	2	1	2	-5.0750562682483
11	3	1	0	-23.0476293942066	51	3	1	2	25.6842109915261
12	4	1	0	12.3799462982824	52	4	1	2	21.4337501797249

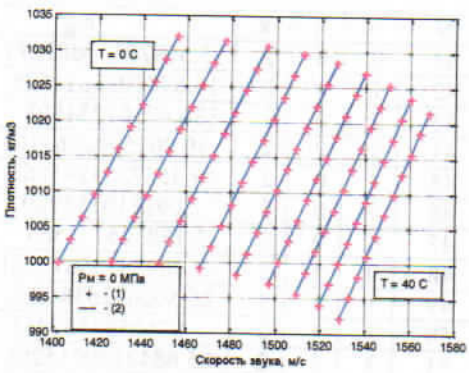
13	0	2	0	1.13217285164006	53	0	2	2	89.3711225359694
14	1	2	0	14.4767474516639	54	1	2	2	179.03231095403
15	2	2	0	-9.91214042192252	55	2	2	2	29.6896861060273
16	3	2	0	7.52090547104515	56	0	3	2	149.292472370944
17	0	3	0	7.59078827545747	57	1	3	2	21.2794481195528
18	1	3	0	7.46811667240725	58	0	4	2	9.16962682641492
19	2	3	0	1.47367253098222	59	0	0	3	37.1485234918419
20	0	4	0	6.88112852845951	60	1	0	3	63.2206166123006
21	0	0	1	3.54215823107227	61	2	0	3	-122.075155893009
22	1	0	1	-2.80400587197816	62	3	0	3	-119.059836828465
23	2	0	1	-54.3262329477287	63	4	0	3	-71.2667472227439
24	3	0	1	3.55586900397077	64	0	1	3	92.5735515332502
25	4	0	1	7.6082248130313	65	1	1	3	196.763518295444
26	5	0	1	-34.6738599856549	66	2	1	3	-12.0786373341756
27	6	0	1	4.7580455768854	67	0	2	3	-76.3990366335968
28	0	1	1	-0.363085951354304	68	0	0	4	-177.535584426195
29	1	1	1	-34.1472516827273	69	1	0	4	-370.566231798439
30	2	1	1	-13.6213017892602	70	2	0	4	198.669218065181
31	3	1	1	45.5200993139421	71	3	0	4	106.612776104338
32	4	1	1	-48.1325483199734	72	0	1	4	-380.945379755296
33	5	1	1	3.1831204986958	73	1	1	4	-438.752548680805
34	0	2	1	-22.9361717467816	74	0	2	4	-216.697106049441
35	1	2	1	-71.8907126464858	75	0	0	5	406.824426709084
36	2	2	1	-18.1647731570777	76	1	0	5	369.395846726842
37	3	2	1	-17.0072288820399	77	2	0	5	-160.663542070947
38	0	3	1	-61.706570436196	78	0	1	5	513.765310107623
39	1	3	1	-56.5691251439299	79	1	1	5	78.232753725502
40	0	4	1	-30.4340974224546	–	0	0	6	-335.8995889265

Среднее квадратическое отклонение (СКО) по всему массиву исходных данных для уравнения (1) составляет 0,004 кг/м^3, что соответствует точности данных TEOS-10 [3]. Гистограмма расчетных отклонений, приведенная в табл. 6, подтверждает нормальный закон распределения отклонений. Количество точек, в которых отклонения превышают величину в 3σ, является незначительным и составляет немногим более одного процента (1,1787%), причем почти все эти точки сосредоточены в области практически маловероятных сочетаний входных параметров.

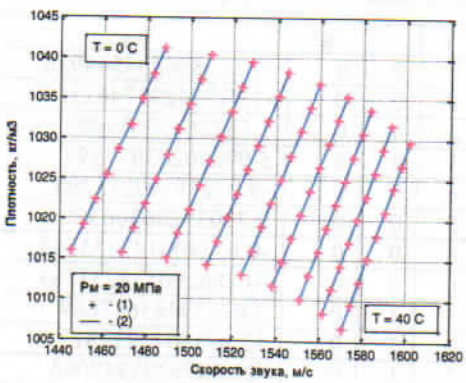
Таблица 6. Гистограмма отклонений расчетной плотности морской воды

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<-0.016	<-0.012	<-0.008	<-0.004	<0	<0.004	<0.008	<0.012	<0.016	<+∞	Всего:
0.2826	0.3259	1.8405	9.7168	37.3156	38.3406	10.2144	1.3934	0.3327	0.2375	100%

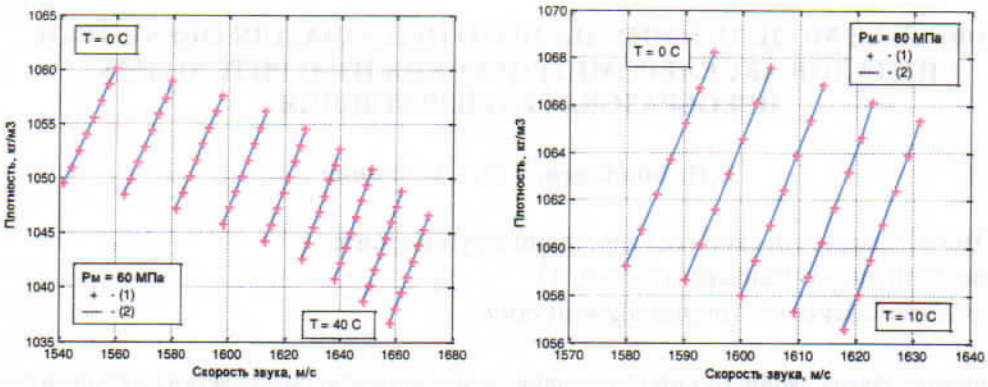
Ниже на рис. 1, а – 1, г показано сравнение между значениями плотности, полученными по уравнению TEOS-10 и по уравнению авторов данной работы.



а)



б)



в) г)

Рис. 1. Сравнение данных по плотности морской воды при различных значениях входных параметров: (1) – TEOS-10; (2) – уравнение авторов

Уравнение (1) может быть использовано для определения плотности морской воды по данным измерений SVP непосредственно в условиях морских исследований. При этом плотность воды определяется путем прямого однократного расчета по уравнению (1). Предлагаемый алгоритм определения плотности требует минимальных затрат как вычислительных ресурсов, так и расчетного времени.

Заключение. В работе описаны характеристики SVP. Получено уравнение для интерполяции плотности морской воды в зависимости от измеряемых in situ параметров среды – температуры, гидростатического давления и скорости звука в океанографическом диапазоне параметров. Уравнение авторов может быть использовано в научных целях для расчета плотности водной среды в составе программного обеспечения SVP различных производителей. Разработанное авторами уравнение для плотности морской воды в океанографическом диапазоне параметров может быть рекомендовано для включения в состав международной системы TEOS-10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н.* Новое уравнение для расчета плотности морской воды по измерениям скорости звука // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2017. Вып. 7 (27). С. 12–18.

2. *Expendable* Bathythermograph Expendable Sound Velocimeter (XBT/XSV): [Электронный ресурс]. URL: http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/ms2/documents/ocean/20050054_XBT_XSV_reader_page.pdf. (дата обращения: 01.07.2017).

3. *IOC*, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp.: [Электронный ресурс]. URL: http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Manual.pdf. (дата обращения: 01.07.2017).

SOUND VELOCITY PROFILERS AND THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE DENSITY OF WATER FOR THE OCEANOGRAPHIC RANGE

A.N. Grekov, N.A. Grekov, E.N. Sychov

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

This article gives an analysis of sound speed profilers created by world manufacturers of oceanographic instruments. Particular attention is paid to the measuring channel of sound speed, technical and metrological characteristics. An algorithm is proposed for using such devices to determine the density of sea water. For this the authors developed an equation that makes it possible to calculate the density of the aqueous medium from the measurements of temperature, pressure, and sound velocity. The equation reproduces the density of sea water in the oceanographic region of the measured parameters with high accuracy (RMS = 0,004 kg / m^3). The graphs of comparison of the calculated density of sea water with the data of TEOS-10 are given.

Keywords: sea water, sound velocity, SVP, seawater density, equation of state.