

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОФИЛОГРАФОВ СКОРОСТИ ЗВУКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ

Греков А.Н.¹, Греков Н.А.¹, Сычев Е.Н.¹

¹ *Институт природно-технических систем, РФ,
г. Севастополь, ул. Ленина, 28, oceanmhi@ya.ru*

Paper presents an analysis of sound speed profilers created both by abroad world manufactures of oceanographic instruments and by Russian manufactures. The method is proposed for using these complicated underwater devices to determine the density of sea water.

Профилографы скорости звука (SVP) широко используются в практике океанографических исследований для получения значений скорости звука (с) в водной среде в зависимости от глубины или гидростатического давления (Р). Такие профилографы, как правило, оснащаются датчиками температуры (Т) для измерения профиля температуры. Одним из ведущих производителей профилографов скорости звука в воде до глубин 6000 м (около 6000 дбар) является английская компания Valeport. Все профилографы этой компании 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.

Таблица 1. Технические и метрологические характеристики датчиков

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

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 [1]. 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 $\pm 0,25$ м/с, а по температуре $\pm 0,1$ °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	$\pm 0,02$
Температура воды, °С	-2 ÷ +35	0,001	$\pm 0,01$
Гидростатическое давление, дбар	0 ÷ 2000	0,2	± 2

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 $P = 0,99$, а для отдельных профиломеров использовать Государственный первичный эталон с неопределенностью 0,005 м/с.

В настоящее время в океанологии общепринятым методом определения плотности морской воды является косвенный метод расчета плотности по уравнению вида $\rho(T, P, S)$, где ρ , T , P , S – плотность, температура, гидростатическое давление и абсолютная соленость морской воды соответственно. Однако, представляется вполне оправданным и полезным внедрение в практику морских исследований уравнения плотности морской воды в новой форме $\rho(T, P, c)$, предложенной авторами в работе [2]. 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 рассмотренные в данной работе профилографы скорости звука (SVP).

В работе [2] авторами было разработано уравнение состояния морской воды нового вида $\rho(T, P, c)$, 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 [2], является недостаточной для научного использования в морских исследованиях. В связи с этим авторами в работе [3] специально для океанографического диапазона параметров (см. табл. 3) было разработано другое уравнение состояния, которое может быть пригодно для использования в научных исследованиях.

Таблица 3. Океанографический диапазон параметров (согласно [4])

Диапазон P , дбар	Диапазон T , °C	Диапазон S , г/кг
0 ÷ 500	-6 ÷ 40	0 ÷ 42
500 ÷ 6500	-6 ÷ 40	$S_{\min} \div 42$ (S_{\min} увеличивается линейно от 0 до 30 г/кг при увеличении P)
6500 ÷ 8000	-6 ÷ 10	30 ÷ 42

Для построения этого уравнения состояния авторами был сгенерирован детальный, в количестве 369741 точек, массив исходных данных по

плотности, температуре, давлению и скорости звука. Данные принадлежат к океанографическому диапазону параметров и расположены в узлах достаточно плотной трехмерной прямоугольной сетки независимых параметров: с шагом 25 дбар в диапазоне давлений от 0 до 8000 дбар, с шагом 1°C в диапазоне температур от -6°C до $T_{\max}(P)$ и с шагом 1 г/кг в диапазоне соленостей от $S_{\min}(P)$ до 42 г/кг. Для приготовления массива исходных данных была использована международная система TEOS-10 [4].

Разработанное авторами уравнение состояния для интерполяции плотности морской воды в океанографическом диапазоне параметров было принято в полиномиальной форме и включает в себя 80 коэффициентов [3]. Среднее квадратическое отклонение (СКО) по всему массиву исходных данных для уравнения [3] составляет 0,004 кг/м³, что соответствует точности данных TEOS-10 [4].

При внесении уравнения авторов [3] в состав программного обеспечения SVP различных производителей последние могут быть использованы для определения (профилирования) плотности водной среды как в научных, так и в технических целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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).
2. 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.
3. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Профилографы скорости звука и алгоритм определения плотности воды для океанографического диапазона // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2017. Вып. 8 (28). С. 11–15.
4. IUC, 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).