

## СОЛЕВАЯ ЧАСТЬ УРАВНЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА ДЛЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗОН ОКЕАНОВ

А.Н. Греков, Н.А. Греков, Е.Н. Сычев

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

Представленная работа является продолжением исследований, направленных на создание уравнения скорости звука в соленой воде для расширенных диапазонов значений солёности и температуры. Получено новое уравнение, которое может быть использовано для расчета скорости звука в пресных и соленых водах с концентрацией солей от 0 до 220 г/кг.

**Ключевые слова:** скорость звука, профилограф, TEOS-10, солёность, температура, давление, изобары, изотермы.

**Введение.** В настоящее время актуальной задачей является разработка методов и средств для обеспечения океанологических исследований в аномальных зонах морей и океанов, в которых значения температуры и солёности выходят за пределы обычного океанографического диапазона.

**Основная часть.** Как известно, существование аномальных зон океанов и морей, т.е. зон в которых океанические воды имеют аномально высокие температурные и солевые характеристики, обычно связывают с наличием многочисленных глубоководных выходов (извержений) подземных термальных и/или гиперсолёных вод.

Решение проблемы обеспечения исследований в аномальных зонах, т.е. вне пределов обычных океанографических параметров возможно одним из следующих трех способов:

- 1) разработка и применение нестандартных приборов;
- 2) создание специальных методик применения стандартных приборов;
- 3) разумное сочетание первого и второго способов.

Первый способ является самым затратным из трех упомянутых, поскольку он связан с разработкой единичных экземпляров дорогостоящей узкоспециальной аппаратуры к тому же с невысо-

ким коэффициентом использования. В качестве примера решения проблемы первым способом можно назвать проведение исследований горячих (до 70°C) и гиперсолёных (до 250 г/кг) рассолов в глубоководных котловинах Красного моря [1]. В этой работе для проведения измерений использовался специально разработанный в Океанографическом институте Вудс-Холла (США) несерийный широкодиапазонный CTD-зонд. Этот зонд был оснащен нестандартными измерительными каналами, позволяющими контролировать температуру до 70°C и солёность до 500 ‰ с пределом по глубине до 6500 м.

Однако измерительный канал проводимости широкодиапазонного CTD-зонда был откалиброван в пределах обычного океанографического диапазона параметров, а значение солёности вычислялось по проводимости с использованием уравнения состояния стандартной морской воды. В итоге авторы [1] не смогли гарантировать точность результатов измерений при высоких температурах и солёностях. Тем не менее даже такие результаты измерений полезны для понимания процессов, происходящих в вертикальных структурах океанов.

В отличие от первого, второй способ обеспечения исследований в аномальных зонах океанов является наименее затрат-



ным и поэтому более предпочтительным. Следовательно, возрастает актуальность задач по разработке таких методик, которые допустили бы применение стандартной широко используемой измерительной аппаратуры при проведении исследований в аномальных зонах.

В целях решения указанной проблемы авторы данной работы предлагают применять широко распространенные и массово выпускаемые профилографы скорости звука (*SVP*-приборы). В работе [2] приведены преимущества *SVP*-зондов при работах в аномальных зонах океанов. Использование *SVP*-приборов для проведения исследований в аномальных зонах океанов становится возможным при наличии такого уравнения скорости звука соленой воды, которое действует в широких диапазонах изменения независимых параметров – *S*, *T* и *P*. Однако все, разработанные к настоящему времени, уравнения скорости звука не удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Уравнение скорости звука для соленой воды (*c*), предложенное авторами, представляет собой сумму двух частей: пресноводной (*c<sub>пв</sub>*) и солевой (*c<sub>св</sub>*). Преимущество такого подхода заключается в том, что задача по разработке такого

уравнения может решаться последовательно в два этапа.

На первом этапе для диапазона температур 0 – 300°C и давлений 0,1 – 120 МПа авторами была разработана пресноводная часть уравнения скорости звука. Это уравнение включает 40 коэффициентов, среднее квадратичное отклонение (СКО) не превышает 0,079 м/с [3]. В работе [3] также давались рекомендации, что в качестве солевой части уравнения можно временно использовать имеющиеся солевые части уравнения TEOS-10 или ЮНЕСКО.

С целью исследования возможности использования в дальнейшем в качестве солевой части скорости звука уравнения TEOS-10 нами был выполнен расчет и анализ изобар скорости звука и изобар солевой части скорости звука для этого уравнения.

Изобары скорости звука для температур ниже 40°C имеют аналогичный с изобарами при *T* = 20°C характер (рис. 1, а). Однако при температурах выше 40°C характер изобар скорости звука постепенно изменяется (рис. 1, б).

При этом знак кривизны изобар меняется на противоположный и изобары скорости звука начинают резко расти с увеличением всех трех параметров: давления, температуры и солёности.

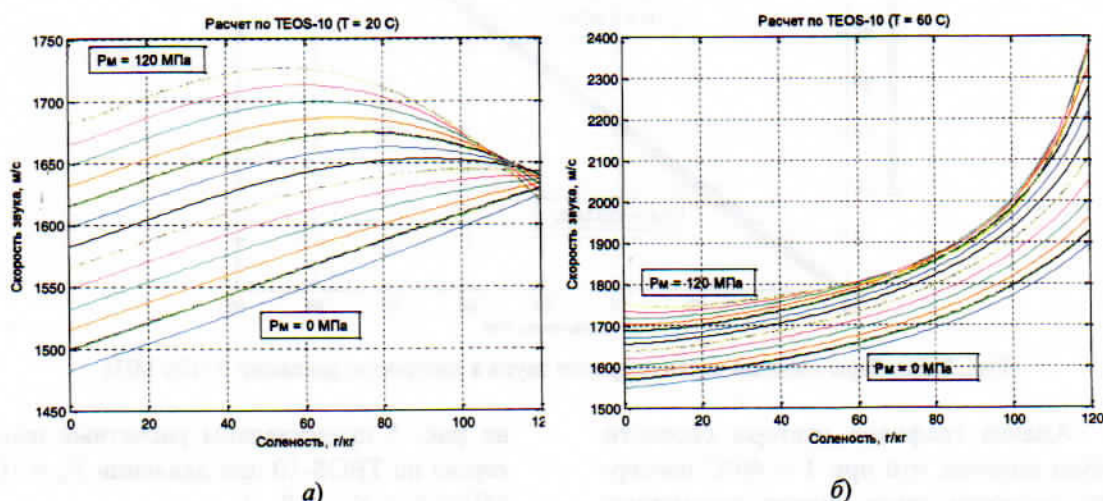


Рис. 1. Графики изобар скорости звука, рассчитанные по уравнению TEOS-10 для: а)  $T = 20\text{ C}$ ; б)  $T = 60\text{ C}$



На основании анализа поведения изобар скорости звука, можно считать, что область применимости солевой части уравнения TEOS-10 должна быть ограничена той областью значений независимых параметров, в которой изобары скорости звука имеют прямолинейный характер, что соответствует прямо пропорциональной зависимости скорости звука от значения солёности.

Вычитанием из значений скорости звука в соленой воде ( $c$ ) соответствующих значений пресноводной части скорости звука ( $c_{пв}$ ) можно выделить солевую часть скорости звука ( $c_{св}$ )

$$c_{св}(P, T, S) = c(P, T, S) - c_{пв}(P, T). \quad (1)$$

Расчетные (по TEOS-10) изобары солевой части скорости звука стягиваются в узкий пучок линий, что означает практическую независимость солевой части скорости звука от давления (рис. 2). В итоге солевая часть скорости звука может быть представлена в виде упрощенной функции только от двух параметров: температуры и солёности.

В общем случае характер поведения изобар скорости звука создает хорошие предпосылки для построения интерполяционного уравнения следующего вида

$$c(P, T, S) = c_{пв}(P, T) + c_{св}(P, T, S), \quad (2)$$

где  $c_{пв}(P, T)$  – пресноводная часть скорости звука;  $c_{св}(P, T, S)$  – солевая часть скорости звука, которая в силу прямолинейности изобар скорости звука может быть представлена в виде

$$c_{св}(P, T, S) = B(P, T) * F(S). \quad (3)$$

Поскольку в диапазоне температур 0 – 40°C солевая часть практически не зависит от давления (рис. 2), то уравнение (3) может быть записано в виде

$$c_{св}(T, S) = B(T) * F(S), \quad (4)$$

тогда уравнение (2) примет вид

$$c = c_{пв}(P, T) + c_{св}(T, S) \quad (5)$$

или окончательно

$$c(P, T, S) = c_{пв}(P, T) + \sum_0^1 b(T)_i * (S/S_0)^i. \quad (6)$$

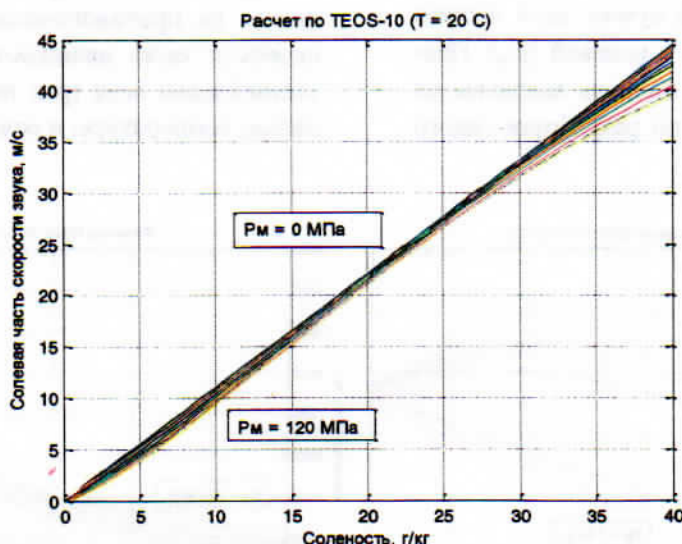


Рис. 2. Изобары солевой части скорости звука в диапазоне давлений 0–120 МПа

Анализ графиков изотерм скорости звука показал, что при  $T > 40^\circ\text{C}$  изотермы скорости звука имеют чрезмерное завышение расчетных значений скорости звука. Эта тенденция прослеживается по всему диапазону давлений. Для примера,

на рис. 3 представлены расчетные изотермы по TEOS-10 при давлении  $P_m = 10$  МПа ( $P_m = P_{абс} - P_{атм}$ ).

Из рис. 3 следует, что в пределах заявленной области применимости международного уравнения TEOS-10, расчет-

ные значения скорости звука при  $P_m = 10$  МПа на изотермах сначала растут до явно неприемлемых фиктивных уровней (до 20000 м/с), а затем резко переходят в область комплексных величин. Такое поведение свидетельствует об ограни-

ченности методики расчета солевой части, положенной в основу TEOS-10, которая базируется на международных формулах для свойств морской воды от 2008 г. [4].

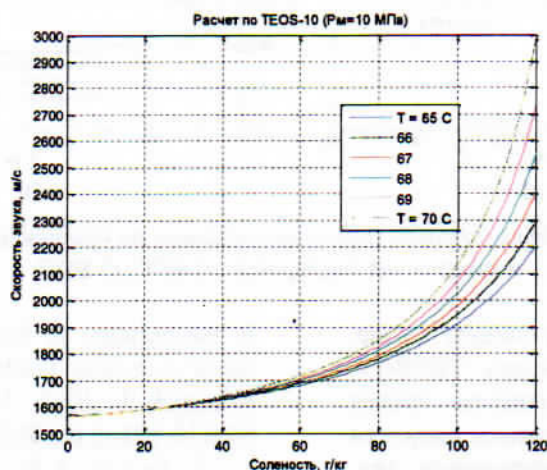


Рис. 3. График изотерм скорости звука в диапазоне солености 0–120 г/кг

Изложенный подход к построению уравнения позволил получить оценки скорости звука солевых растворов вне исследованных диапазонов. В качестве солевой части скорости звука предлагается использовать зависимость  $\Delta c(S,T)$ , выделенную нами из уравнения  $c(S,T)$ , полученного в работе [5].

Рекомендуемая нами солевая часть для уравнения скорости звука  $\Delta c(S,T)$  имеет вид

$$\Delta c(S,T) = \sum_{k=0}^1 \sum_{m=1}^3 d_{km} (\ln(T))^k S^m, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где  $d_{km}$ :

$k$	$m$	$d_{km}$
0	1	2,0105
0	2	-0,0048
0	3	1E-5
1	1	-0,3322
1	2	0,0017
1	3	-5E-6

Суммируя пресноводную и солевую части скорости звука, в итоге получим уравнение скорости звука для соленой воды

$$c(S,T,P) = c_{пч}(T,P) + \Delta c(S,T), \text{ м/с}, \quad (8)$$

где для вычисления пресноводной части скорости звука используется уравнение

$$c_{пч}(T,P) = \sum_{j=0}^4 \sum_{i=0}^7 b_{ij} T^i P^j, \text{ м/с}, \quad (9)$$

полученное авторами в работе [3].

Ниже приводятся графики результатов расчета скорости звука в соленой воде, полученные по уравнению (8), в сравнении с результатами расчета по уравнению TEOS-10.

На рис. 4 представлены сравнительные графики изобар скорости звука, полученные по уравнениям авторов статьи и TEOS-10 для фиксированных значений температур 40°C (рис. 4, а) и 80°C (рис. 4, б). Все графики изобар скорости звука для температур ниже 40°C имеют вид, схожий по характеру с рис. 4, а.

Из рис. 4, а и 4, б следует, что конфигурация изобар скорости звука, рассчитанных по уравнению TEOS-10 при соленостях и температурах, превышающих 40 ‰ и 40°C, соответственно, является физически не обоснованной. В противоположность этому конфигурация изобар скорости звука, рассчитанных по уравнению авторов статьи, имеет физический смысл, что подтверждается экспериментально.



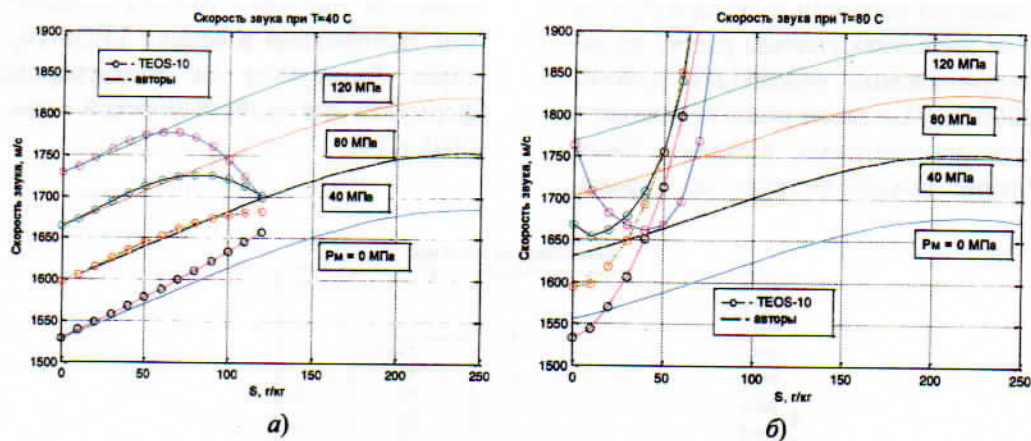


Рис. 4. Изобары скорости звука, рассчитанные по уравнениям TEOS-10 и авторов для температур: а) 40°C; б) 80°C

Из анализа графиков следует также, что в отличие от уравнения TEOS-10, предлагаемое нами уравнение может быть использовано для оценки скорости звука в высокоминерализованных термальных водах, которые существуют в аномальных зонах океанов и морей.

**Заключение.** Уравнение TEOS-10 можно использовать для расчета скорости звука при температурах и соленостях, не превышающих 40°C и 40‰, соответственно.

Разработанное авторами статьи уравнение (8) для скорости звука можно использовать:

- для пресных вод в диапазоне температур 0 – 300°C и давлений 0,1 – 120 МПа с СКО, не превышающим 0,079 м/с;
- для соленых вод в диапазоне температур 0 – 60°C, давлений 0,1 – 120 МПа и солености до 220‰.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Swift S.A., Bower A.S., Schmitt R.W. Vertical, horizontal, and temporal changes

in temperature in the Atlantis II and Discovery hot brine pools, Red Sea // Deep-Sea Research I. 2012. Vol. 64. P. 118–128. (doi:10.1016/j.dsr.2012.02.006).

2. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Методы и средства определения солености шельфовых зон океанов и морей // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2015. Вып. 2 (22). С. 29–34.

3. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Уравнение скорости звука для аномальных зон океанов и морей // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2016. Вып. 4 (24). С. 27–31.

4. International Association for the Properties of Water and Steam, Release on the IAPWS formulation for the thermodynamic properties of seawater, www.iapws.org, (2008) (дата обращения: 12.09.2016).

5. Al-Nassar Y.N. [et al.] Functional dependence of ultrasonic speed in water on salinity and temperature // NDT. net. 2006. Vol. 11. №. 6. P. 1–5.

#### THE SALINE PART OF THE EQUATION FOR SPEED OF SOUND FOR ANOMALOUS ZONES OF OCEANS

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

Institute of natural and technical systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

This work is a continuation of research, which are aimed on creating the equation for the sound speed in salt water for extended range of salinity and temperature. A new equation was elaborated that can be used for calculation of the speed of sound in fresh and salt waters with salt concentration from 0 to 220 g/kg.

**Keywords:** speed of sound, profiler, TEOS-10, salinity, temperature, pressure, isobars, isotherms.