

ВОЗМОЖНОСТИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ВОД IN SITU

А.Н. Греков, Н.А. Греков

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

Учитывая новый подход к термодинамике морской воды, предлагается проведение прямых измерений плотности и температуры in situ. Рассмотрены возможности вибрационных, гидростатических и акустических плотномеров. Предложена конструкция нового акустического измерителя плотности и приведен алгоритм его работы.

Разработанные и созданные классические автоматизированные CTD-системы для измерения важнейших физико-химических характеристик морской воды, видимо, исчерпали свои возможности.

Дело в том, что океанографическая наука выдвигает новые требования в познании морской воды. Это изучение глубинных вод более 2000 м и шельфовых зон океанов и морей, где солевой состав значительно отличается от классически принятого состава морской воды, который был определен для 135 проб, собранных в разных районах океанов в слое от поверхности до 100 м [1].

Созданные автоматизированные CTD-системы измеряют температуру, электропроводность и давление. По электропроводности с учетом коррекции по температуре и давлению, используя уравнение состояния морской воды (МУС-80) определяют практическую соленость, т.е. практическая соленость зависит только от проводимости [2].

Однако на термодинамические свойства морской воды непосредственное влияние оказывает масса растворенных в ней различных веществ и эта масса на единицу объема определяется как абсолютная соленость.

Преимущества определения абсолютной солености достаточно полно отражены в документе МОК Юнеско от 27 апреля 2009 г. в пункте 4.3.2.1.

МОК рекомендовала использовать новый подход к термодинамике морской воды и на практике начать внедрять "Термодинамическое уравнение состояния морской воды-2010" – сокращенно ТУС-10. В

ТУС-10 вместо практической солености используется абсолютная соленость [3].

С точки зрения автоматизации измерений возникает вопрос, как измерить абсолютную соленость, используя современные достижения в области приборостроения.

На практике для измерения абсолютной солености разработано много методов, истоки которых начинаются с 1818 г. Не перечисляя все методы измерения, сделаем ссылку на эти методы, которые опубликованы в работах [4]. Эти методы не пригодны для прямых измерений солености *in situ*. Наиболее перспективными методами в океанографии для удовлетворения требования ТУС-10, является проведение прямых измерений плотности и температуры *in situ* и затем, если в этом возникнет необходимость, вычисляют соленость по этим двум параметрам.

Поэтому в данной работе рассмотрим методы измерения плотности, пригодные для *in situ*.

Вибрационный плотномер [5] часто используют для непрерывных измерений плотности и состоит из трубчатого резонатора, внутри которого протекает исследуемая вода. Материал трубок должен обладать малым внутренним затуханием и большим модулем упругости. Для прецизионных измерений можно использовать кварцевое стекло.

Квадрат угловой резонансной частоты поперечных колебаний трубки описывается уравнением

$$\omega^2 = \frac{rEJ}{ml^3}, \quad (1)$$

где r – постоянная, которая зависит от условий закрепления трубки; E – модуль упругости материала трубки; J – момент инерции поперечного сечения трубки; m и l – масса и длина трубки.

С учетом массы жидкости, находящейся внутри трубки, уравнение можно преобразовать к виду

$$\omega^2 = \frac{k}{m + \rho V}, \quad (2)$$

где ρ и V – плотность и объем жидкости; k – постоянная системы, определяемая при градуировке измерителя.

Из уравнения (2) легко получить значение плотности жидкости

$$\rho = \left(\frac{k}{\omega^2} - m \right) / V. \quad (3)$$

Экспериментальные исследования показали, что частота колебаний трубчатых резонаторов не зависит от давления и вязкости протекающей жидкости, а зависит только от массы жидкости, находящейся внутри резонатора. Однако изменение температуры окружающей среды и контролируемой жидкости вызывает появление дополнительной погрешности, связанной с изменением геометрических размеров датчика, его модуля упругости и плотности материала стенок. Все эти параметры датчика необходимо контролировать и вносить соответствующие поправки при измерении плотности.

О. Kratky, Н. Leopold and Н. Stabinger [6] использовали этот метод для создания плотномера с цифровым индикатором в 1969 г. Этот прибор позволил достичь точность $\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$.

Klaus Kremling [7] изучил применимость этого прибора в океанографии. Для этого было взято 9 проб в диапазоне солености от 9 до 39 ‰ при шести значениях температуры от 0 до 25 °С и сравнивались с уравнением, полученным R.A. Cox, M.J. McCartney и F. Culkin [8] методом гидростатического баланса. Значения плотности, полученные двумя методами, хорошо согласуются между собой в пределах абсолютной ошибки, равной $0,008 \sigma_t$.

Известен метод гидростатического баланса [9], который имеет несколько разновидностей и заключается в том, что жидкости с различными плотностями ρ_0 и ρ_1 , находящиеся в перевернутых сосудах, в которых давление ниже атмосферного, будут находиться на различных высотах h_0 и h_1 . Имея образцовую плотность ρ_0 , по разности высот h_1 и h_2 определяют плотность неизвестной жидкости. Однако этот метод, как и метод с использованием плавучести, базирующейся на принципе Архимеда, используют в основном в лабораторных условиях.

Радиоизотопные методы [10] для измерения плотности жидкости используют ослабление проникающей радиации гамма-лучей через анализируемую жидкость. Погрешность этого метода достигает 1–2 %. Кроме этого аппаратная реализация очень громоздка. Поэтому применять радиоизотопные методы для измерения плотности *in situ* на нынешнем этапе проблематично.

Рассмотрим перспективный метод для измерения плотности воды с использованием акустического сигнала. Этот метод можно использовать в открытом море и при больших вибрациях и давлениях.

Известно, что удельное акустическое сопротивление безграничной среды определяется как произведение плотности на величину скорости распространения звука в среде

$$Z = \pm \rho c. \quad (4)$$

Пусть плоская волна падает нормально на плоскую границу $x = 0$ (рисунок 1) между двумя однородными средами с плотностями ρ_1 и ρ_2 , скоростями звука c_1 и c_2 , волновым сопротивлением Z_1 и Z_2 , амплитудами давления: A_H – излучения, A_T – прохождение, A_R – отражение.

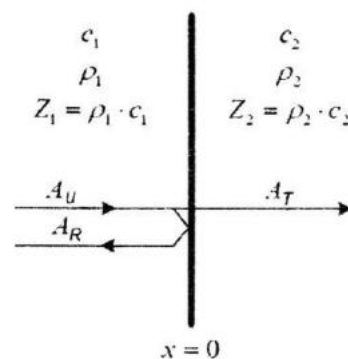


Рисунок 1 – Схема отражения и передачи акустического сигнала на границе двух сред

Рассмотрим формулу Френеля для коэффициента отражения R

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (5)$$

и коэффициента прохождения T

$$T = \frac{2 \rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{2 z_2}{z_2 + z_1}. \quad (6)$$

Эти уравнения можно использовать для определения плотности воды, если известны остальные переменные.

Например, для простого метода измерения плотности используя буферный материал с известной скоростью c_1 и плотностью ρ_1 , который отделяет акустический преобразователь и исследуемую среду с известной скоростью c_2 , можно определить плотность воды ρ_2 :

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 c_1 (1 + R)}{c_2 (1 + R)}. \quad (7)$$

Используя относительное волновое сопротивление

$$W = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \quad (8)$$

Коэффициенты отражения и прохождения через относительное волновое сопротивление определяются как

$$R = \frac{W - 1}{W + 1}, \quad T = \frac{2W}{W + 1} \quad (9)$$

Амплитуда излученного давления звука A_H (рис. 1) разлагается на амплитуду давления отражения A_R и прохождения A_T , тогда R можно определить как

$$R = \frac{A_R}{A_H} \quad (10)$$

и величину T определяем как

$$T = \frac{A_T}{A_H} \quad (11)$$

На таком принципе разработан и создан ультразвуковой измеритель скорости звука и акустического импеданса [11], по которому рассчитывается плотность. Этим прибором проводились измерения на озере Merseburg-Ost, расположенном в Центральной Германии [12].

В результате прямых измерений плотности *in situ* были получены интересные результаты, которые отличались от результатов, полученных CTD-зондами. Поэтому

измерения плотности *in situ* ультразвуковыми методами перспективны для исследования структуры плотности в естественных водных средах.

Авторами статьи разработана конструкция акустического преобразователя плотности воды и алгоритм его работы (рисунок 2). Акустический преобразователь изготавливается из стабильного материала с малым коэффициентом теплового расширения. Конструктивно он состоит из монолитного прямоугольника, на одну из сторон которого приклеивается пьезопреобразователь. Преобразователь загерметизирован от попадания морской воды. Противоположная от преобразователя плоскость прямоугольника соприкасается с воздухом с волновым сопротивлением Z_B , что позволяет выполнить условие $Z_B \ll Z_1$. Преобразователь имеет прямоугольный паз, через который протекает вода, удельное сопротивление и скорость звука, которой необходимо определить. На пьезопреобразователь от микроконтроллера подается электрический импульс, где преобразуется в акустический сигнал. Этот же пьезопреобразователь является приемником отраженных от стенок акустических сигналов, которые после преобразования попадают на входы АЦП и ВЦП микроконтроллера.



Рисунок 2 – Схема устройства преобразователя и пути прохождения акустических импульсов

l_1 – расстояние между пьезопреобразователем и стенкой паза; l_2 – расстояние между противоположными стенками паза; l_3 – расстояние между стенкой паза и границей стенки, которая соприкасается с воздухом; Z_1 и c_1 – волновое

сопротивление и скорость звука стабильного материала; A_H – амплитуда излучения; A_{r1} , A_{r2} , A_{r3} , A_{r4} – амплитуды отражения от различных стенок; Z_2 и c_2 – волновое сопротивление и скорость звука измеряемой воды; ρ – плотность определяемой воды.

Алгоритм работы преобразователя.

Вначале по образцовой жидкости с известными $Z_{образц}$, ρ и c определяют плотность стабильного материала ρ_1 .

$$\rho_1 = \frac{Z_{образц}}{c_1} \cdot \frac{1-R}{1+R}. \quad (12)$$

Величина R определяется из амплитуды отражения A_{r1} и A_{r4}

$$R = -\frac{A_{r1}}{A_{r4}} \cdot \frac{1}{K}, \quad (13)$$

где K – константа преобразователя.

Скорость звука стабильного материала c_1 определяется как

$$c_1 = \frac{2(l_2 + l_3)}{t_{r4} - t_{r1}}. \quad (14)$$

По вычисленным и измеренным значениям определяется

$$Z_2 = \rho_1 c_1 \frac{1+R}{1-R}. \quad (15)$$

Величину скорости звука в воде c_2 можно определить

$$c_2 = \frac{l_2}{t_{r2} - t_{r1}}. \quad (16)$$

Зная значения Z_2 и c_2 , определяем плотность воды ρ_2

$$\rho_2 = \frac{Z_2}{c_2}. \quad (17)$$

В данной статье не указано конкретное расстояние l_1 , l_2 , l_3 , они рассчитываются из свойств применяемого стабильного материала.

Предлагаемое устройство преобразования плотности в отличие от известных позволяет получить дополнительные значения A , R , C как для жидкости, так и для эталонных материалов, фактически в этом датчике реализована многоканальная параметрическая измерительная система, что в свою очередь позволяет повысить точность измерения за счет компенсации нестабильности элементов датчика в результате воздействия дестабилизирующих факторов.

Макет датчика плотности изготовлен и в настоящее время проходит лабораторные испытания.

Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект Ф25.6/078).

Л и т е р а т у р а

1. Cox R.A., Culkin F. And Riley J.P. (1967) The electrical conductivity/chlorinity relationship in natural sea water. Deep-Sea Research. 14. – P. 203–220.

2. Шкала практической солености, 1978 год, и международное уравнение состояния морской воды, 1980 год. Десятый доклад объединенной группы по океанографическим таблицам и стандартам (ОГОТС). Технические документы ЮНЕСКО по морским наукам. 36, 1981, ЮНЕСКО.

3. МОК 25 сессия ЮНЕСКО от 16–25 июня 2009 г.

4. William J. Emery, Richard E. Thomson. Data analysis methods in physical oceanography. 3 изд. 2004. – 400 p.

5. Spieweck F. and Bettin H. "Review: Solid and liquid density determination", *Technisches Messen*, 59 (6), 1992. – P. 237–244.

6. Kratky O., Leopold H. and Stabinger H. The determination of the partial specific volume of proteins by the mechanical oscillator technique. *Methods in Enzymology*. Vol. 27, 1973. – P. 98–110. Part D: Enzyme Structure.

7. Kremling Klaus. Comparison of specific gravity in natural sea water from hydrographical tables and measurements by a new density instrument. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Vol. 19, Issue 5, May 1972. – P. 377–380, INI, 381–383.

8. Cox R.A., McCartney M.J. and Culkin F. The specific gravity/salinity/temperature relationship in natural sea water. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Vol. 17, Issue 4, August 1970. – P. 679–689.

9. Spieweck F. "Sensors for measuring density and viscosity", Chapter 10 in "Sensors – A Comprehensive Survey". Edited by W. Göpel, J. Hesse, J. N. Zemel. Volume 7 Mechanical Sensors, Edited by H. H. Bau, N. F. deRooy, B. Kloeck. VCH Publishers Inc., New York, 1994, ISBN 0-89573-679-9.

10. Mason P. "Liquid and gas density measurement: Part 2 (Fluid density)", *Measurement + Control*, 25. – P. 297–302, December/January 1992/93.

11. Püttmer A. "Ultrasonic Density Sensor for Liquids", Ph.D. thesis. Shaker Verlag, Aachen, 1998, ISBN 3-8265-4614-8.

12. Limnol. Ultrasonic in situ measurements of density, adiabatic compressibility, and stability frequency. *Oceanogr.*, 47(4), 2002. – P. 1255–1260.