

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ЗВУКА *IN SITU*

A.H. Греков

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

*В статье представлен анализ методов измерения скорости звука для приборов *in situ*. Приведена структурная схема разработанного измерителя скорости звука. Подробно рассмотрены временные соотношения в датчике скорости звука. Даны рекомендации по улучшению конструкции первичного преобразователя.*

Характеристическим параметром воды, как и любой жидкости, является её удельный объем. Напрямую эта величина может быть получена из уравнения изотермического коэффициента объёмного сжатия:

$$k_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = -\left(\frac{\partial \ln V}{\partial p} \right)_T, \quad (1)$$

где p – давление.

Прямые методы измерения k_T относительно неточны или крайне трудоёмки, поэтому не применимы для приборов *in situ*. По этой причине большее внимание уделяется адиабатическому коэффициенту объёмного сжатия:

$$k_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S = -\left(\frac{\partial \ln V}{\partial p} \right)_S. \quad (2)$$

Из последнего уравнения легко можно найти k_T по известным термодинамическим соотношениям [1]. Сам же коэффициент k_S вычисляется из уравнения Ньютона-Лапласа:

$$k_S = \frac{1}{\rho c^2}, \quad (3)$$

где ρ – плотность среды; c – скорость звука в ней.

Скорость звука в уравнении Ньютона-Лапласа (3) является фазовой скоростью волны, т.е. скоростью, с которой распространяется фаза любой одной частотной составляющей звукового сигнала. Если угловая частота ω , а волновое число k , то фазовая скорость:

$$c = \frac{\omega}{k}. \quad (4)$$

Одним из методов измерения c может быть определение длины волны $\lambda = 2\pi/k$ на частоте $v = \omega/2\pi$. Другой метод заключается в получении величины скорости звука из временного интервала t , который необходим для преодоления коротким импульсом расстояния x . Это время зависит от групповой скорости амплитудно-модулированных сигналов:

$$c_g = d\omega/dk. \quad (5)$$

Как показано в [2]:

$$\frac{1}{c_g} = \frac{1}{c} + \frac{v}{c^2} \frac{dc}{dv}. \quad (6)$$

Из представленного соотношения следует, что групповая скорость c_g в среде эквивалентна фазовой скорости c только при отсутствии дисперсии, т.е. при $dc/dv = 0$. Для жидкостей, в которых присутствует релаксация, эти скорости не будут равны. В некоторых случаях различия между фазовой и групповой скоростями превышают точность используемого измерителя скорости, поэтому они должны быть включены в количественные оценки групповой скорости.

Вначале дадим краткую оценку косвенному методу, где скорость звука вычисляется по трем измеренным параметрам: температуре, солености и давлению. На практике используется несколько уравнений для вычисления значения скорости звука в так называемых «Ner-tunian» водах [3] для исключения внутренних морей с экстремально высокой соленостью. Это уравнения: NRL II, по-

лученное из уравнений Del Grosso и Mader [4, 5], и уравнение UNESCO [6], полученное из уравнений Millero и Kubinski [7] и Chen и Millero [8]. Третья серия ранних систематических измерений была проведена Wilson [9]. К сожалению, было обнаружено, что некоторые его измерения проводились при ошибочно определенных соленостях или температурах, а его измеритель скорости звука был ненадежным при высоких давлениях. Оставшиеся два основных набора данных существенно отличаются как в методах измерения, так и по содержанию. В работе [10] была предпринята попытка разработать универсальное уравнение для расчета скорости звука в морях и океанах. Однако соотношение, полученное в представленной работе, является лишь результатом обобщения всех известных на данный момент наборов данных, и заявленное отклонение расчетных данных по этому соотношению составляет $\pm 0,2$ м/с, что является неудовлетворительным. Поэтому для исследователей, которых удовлетворяет данная погрешность, мы рекомендуем использовать именно последнее соотношение, особенно для закрытых морей (таких как Черное и Балтийское море).

Хорошие характеристики измерения скорости звука дает метод непрерывной волны. Скорость звука с использованием этого метода может быть определена двумя способами. В первом из них измерительная ячейка между парой преобразователей или между преобразователем и отражателем является резонатором [11]. В таких измерителях определяют передаточную функцию среды, а из неё вычисляют скорость звука. Данный тип приборов хорошо зарекомендовал себя в лабораторных установках для определения скорости звука в малых объемах вещества. Достигнутая точность резонаторных методов 10^{-7} , однако низкое быстродействие и сложность делают измерители основанные на данном методе непригодными для измерений *in situ*.

Во втором способе для определения скорости звука используется взаимодействие непрерывных акустических волн с оптическими волнами [12]. Точность измерения, достигнутая данными методами, составляет 10^{-6} [13]. Недостатками данных методов являются сложность аппаратуры и неприменимость способа для непрозрачных жидкостей.

Наиболее распространенным является импульсный метод измерения скорости звука. Данный метод в свою очередь подразделяется на два: узкополосный и широкополосный импульсные методы. В первом случае в качестве излучаемого сигнала используется амплитудно-модулированный гармонический сигнал. Строго говоря, его частотная характеристика не будет выглядеть как острый пик на фиксированной частоте, а будет иметь боковые лепестки.

При несущей частоте 10 МГц величина t_p для данного метода лежит в пределах от одной до десятков мкс [14]. Данный метод нашел широкое применение в системах измерения скорости звука в исследуемой жидкости путем сравнения с эталонной скоростью звука [15].

В широкополосных импульсных методах в качестве сигнала используются импульсы длительность менее мкс при несущей частоте 10 МГц. Обычно в таких измерителях определение скорости звука заключается в точном измерении времени Δt , необходимого для прохождения сигналом расстояния Δx . Для широкимпульсных методов групповая скорость:

$$c_g = \Delta x / \Delta t . \quad (7)$$

Существует несколько способов измерения времени Δt импульсными методами. Это импульсно-циклический метод, корреляционный метод и метод прямого измерения времени распространения. В системах с импульсно-циклическим методом измерения скорости звука достигнута точность 10^{-7} [16]. Однако в таких измерителях для получения информации о времени распространения

нения необходимо многократное повторение процедуры передачи и приема акустического сигнала, что уменьшает быстродействие системы. Лучшим быстродействием обладает корреляционный метод, и достигнутая точность измерения таким методом составляет 10^{-6} [17]. Все рассмотренные способы измерения скорости звука, за исключением импульсных, не нашли применения в реально выпускаемых ведущими мировыми производителями приборах *in situ* из-за недостатков, отмеченных выше. Поэтому мы остановились на импульсном методе прямого измерения времени прохождения акустического сигнала, т.к. этот

способ обладает хорошим быстродействием, удовлетворительной точностью и простотой реализации.

Была разработана структурно-функциональная схема устройства, реализующего данный метод, которая представлена на рис. 1. Контроллер управляет время-цифровым преобразователем, который производит измерение времени распространения акустического сигнала, и коммутатором, кроме того производит опрос дополнительных измерительных каналов (температуры и давления) и передает первичную информацию по протоколу связи или записывает в энергонезависимую память.



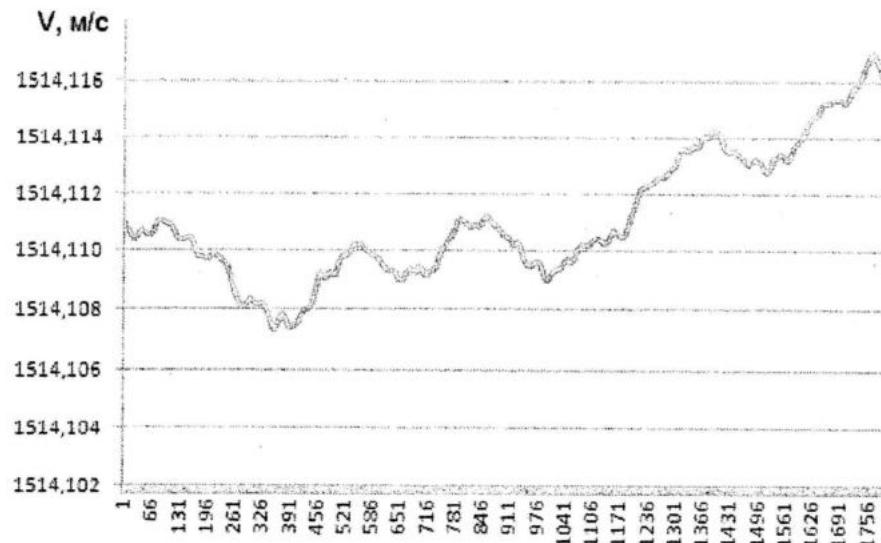
Рис. 1. Структурно-функциональная схема измерителя скорости звука

После выбора соответствующих элементов известных фирм была разработана принципиальная электрическая схема измерителя, разработано программное обеспечение к нему и собран макет прибора, на котором проведены предварительные испытания. В качестве датчика мы использовали разработанный в МГИ двухбазовый акустический преобразователь [18].

При длине акустической базы 0,071 м и разрешении по времени 90 пс (которым обладают время-цифровые преобразователи фирмы ACAM) мы получаем разрешение по скорости звука 0,0016 м/с. Полученное значение на порядок превышает теоретический предел

по точности для измерителей скорости звука.

В результате предварительных испытаний расчетная точность составила 0,01 м/с, а разрешение – 0,0016 м/с. Пример записи при испытаниях представлен на рис. 2. При необходимости разрешение может быть улучшено до значений 0,0008 м/с и 0,0004 м/с (режим удвоенного и учетверенного разрешения время-цифрового преобразователя), но при этом значительно увеличивается время осреднения. Частота опроса датчика 16 Гц. Низкочастотный дрейф сигнала вызван изменением температуры в термостате.



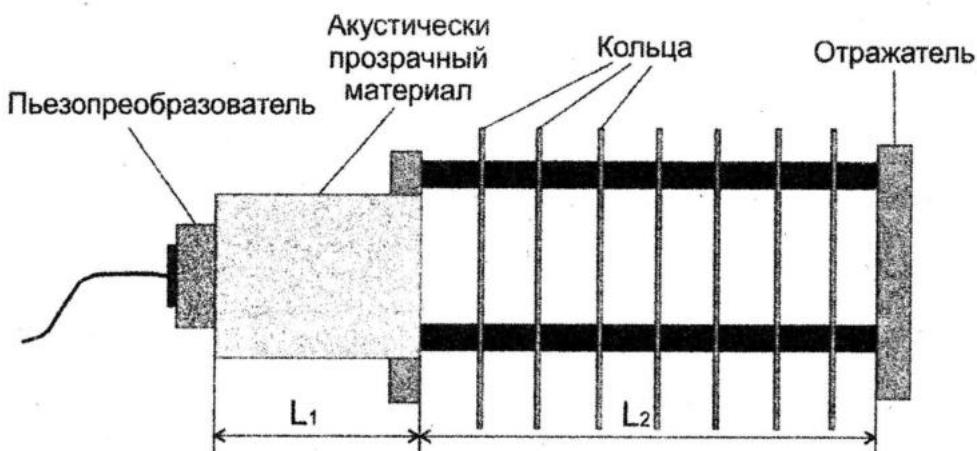
Р и с. 2. Пример записи при предварительных испытаниях

После анализа работы первичного преобразователя было предложено модернизировать датчик скорости звука. Во-первых, исключить первый отражатель, используя границу между исследуемой жидкостью и акустически прозрачным материалом (рис. 3). Рассмотрим подробно работу модифицированного первичного преобразователя. Для такого преобразователя время при-

хода отраженного от границы раздела акустического сигнала будет равняться

$$t_1 = \tau_{\text{пер}} + 2\tau_{L1} + \tau_{\text{прием}}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{пер}}$ – задержка преобразования электрического сигнала в акустический; τ_{L1} – время распространения акустического сигнала на базе $L1$; $\tau_{\text{прием}}$ – задержка преобразования акустического сигнала в электрический.



Р и с. 3. Общий вид модифицированного первичного преобразователя

Для акустического сигнала прошедшего через измеряемую среду с продольной скоростью потока V :

$$t_2 = \tau_{\text{пер}} + 2\tau_{L1} + \tau_{\text{прием}} + \frac{L2}{c+V} + \frac{L2}{c-V}. \quad (9)$$

Найдем из уравнений (9) и (10) скорость звука:

$$c = \frac{L2 + \sqrt{L2^2 + (t_2 - t_1)^2 V^2}}{t_2 - t_1}. \quad (10)$$

Следовательно, нет необходимости устанавливать первый отражатель, достаточно наличие акустически прозрачной вставки длиной $L1$. Длина вставки $L1$ зависит от величины доброкачественности для конкретного преобразователя.

Из полученного соотношения (10) следует, что точность измерения скорости звука напрямую зависит от наличия продольной скорости потока V . Так, например, скорость океанических течений может достигать 2 м/с, что приводит к ошибке по скорости звука 2,5 мм/с, при свободном падении зондирующих приборов средняя скорость достигает 5 м/с, тогда ошибка по скорости звука – 1,7 см/с. Для исключения этой ошибки предлагается дополнить преобразователь кольцами на длине L_2 , которые будут препятствовать попаданию скорости потока в измерительный канал при зондировании и измерениях при больших скоростях течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Douheret G., Davis M.I., Reis J.C.R. and Blandamer M.J. 2001 Isentropic compressibilities – experimental origin and the quest for their rigorous estimation in thermodynamically ideal liquid mixtures *ChemPhysChem* 2 148–61.
2. Kaatze U., Eggers F., Lautscham K., Ultrasonic velocity measurements in liquids with high resolution – techniques, selected applications and perspectives, *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008) 062001, doi:10.1088/0957-0233/19/6/062001.
3. Leroy C.C. “Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in seawater,” *J. Acoust. Soc. Am.* 46, 216–226 (1968).
4. Weissler A. and Del Grosso V.A. “Sound speed in pure water and seawater,” *J. Acoust. Soc. Am.* 47, 947–949, 1970.
5. Del Grosso V.A. and Mader C.W. “Speed of sound in sea-water samples,” *J. Acoust. Soc. Am.* 52, 961–974, 1972.
6. Fofonoff N.P. and Millard R.C., Jr. “Algorithm for computation of fundamental properties of seawater,” UNESCO Technical Papers in Marine Science No. 44, 1983.
7. Millero F.J. and Kubinski T. “Speed of sound in seawater as a function of temperature and salinity at 1 atm,” *J. Acoust. Soc. Am.* 57, 312–319, 1975.
8. Chen C.-T. and Millero F.J. “Sound speed in seawater at high pressures,” *J. Acoust. Soc. Am.* 62, 1129–1135, 1977.
9. Wilson W.D. “Equations for the computation of the speed of sound in sea water,” Naval Ordnance Report 6906, US Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Maryland, 1962.
10. Claude C., Leroy et al. A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 2774 (2008).
11. Lautscham K., Wente F., Schrader W. and Kaatze U. 2000. High resolution and small volume automatic ultrasonic velocimeter for liquids *Meas. Sci. Technol.* 11 1432–1439.
12. Montrose C.J., Solovyev V.A. and Litovitz T.A. 1967. Brillouin Scattering and relaxation in liquids *J. Acoust. Soc. Am.* 43 117–30.
13. Loheider S., Vogler G., Petscherizin I., Soltwisch M. and Quittmann D. 1990. Brillouin scattering on the glass former GeSBr₂ *J. Chem. Phys.* 93 5436–47.
14. Cedrone N.P. and Curran D.R. 1954. Electronic pulse methods for measuring the velocity of sound in liquids and solids *J. Acoust. Soc. Am.* 26 963–6.
15. Carstensen E.L. 1954. Measurement of dispersion of velocity of sound in liquids *J. Acoust. Soc. Am.* 26 858–61.
16. Forgacs R.L. 1960. Improvements in the sing-around technique for ultrasonic velocity measurements *J. Acoust. Soc. Am.* 32 1697–8.
17. Hosoda M., Takagi K., Ogawa H., Nomura H. and Sakai K. 2005. Rapid and precise measurement system for ultrasonic velocity by pulse correlation method designed for chemical analysis *Japan. J. Appl. Phys.* 44 3268–71.
18. Толстошев А.П. Разработка и исследование характеристик рабочего средства измерения скорости распространения ультразвука для систем контроля морской среды: дис. ... кандидата технических наук: 05.11.13 / Толстошев Алексей Петрович. – Севастополь, 2000.