

## РАЗВИТИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ *IN SITU*

А.Н. Греков, Н.А. Греков, Е.Н. Сычев, К.А. Кузьмин

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: [ngrekov1@yandex.ru](mailto:ngrekov1@yandex.ru)

На основе проведенного анализа существующих акустических методов и приборов разработан макет автоматизированного прибора для выполнения совместных измерений *in situ* двух параметров: скорости звука и затухания ультразвука. Прибор создан на базе существующих профилографов скорости звука. Предложено заменить применяемые в измерителях скорости звука ИСЗ-1 конвертеры TDC-GP22 на более совершенные современные модифицированные конвертеры TDC-GP30, что позволяет значительно повысить точность измерения амплитуды отраженного акустического сигнала. Разработаны программы обработки сигналов, получаемых с первичного акустического преобразователя. Макет прибора прошел предварительные испытания.

**Ключевые слова:** акустические измерители, скорость звука, уравнения, затухание ультразвука, датчики, преобразователи, природные воды, программное обеспечение, схема.

Поступила в редакцию: 22.05.2019. После доработки: 17.06.2019.

**Введение.** Большая изменчивость физико-химических и биологических характеристик внутренних водоемов и шельфовых зон морей ставит задачу оперативного контроля динамики исследуемых процессов и совершенствования систем экологического мониторинга. Создание акустических систем, работающих *in situ*, а также развитие их методического обеспечения являются приоритетными направлениями в развитии морского приборостроения.

Для того, чтобы акустические измерители скорости и затухания ультразвука были востребованы при океанографических исследованиях, они должны быть надежными, не затратными в производстве и эксплуатации, иметь достаточно простую процедуру калибровки и необходимый набор методик по применению, включая уравнения и модели.

Известно, что преимущество акустического метода измерения скорости и поглощения ультразвука заключается в том, что прозрачность жидкости не имеет значения в отличии от оптического метода, где исследуются лишь оптически прозрачные жидкости.

Для маловязких жидкостей, к которым относится и морская вода, верхний диапазон частот акустических волн в котором проводят исследования скоро-

сти звука  $C$  и коэффициента затухания  $\alpha$  в настоящее время достигает  $1 \cdot 10^{10}$  Гц. Технически для получения таких частот используются тонкие пьезоэлектрические и пьезополупроводниковые пленки [1]. Однако, в реальных условиях для исследования воды использовать частоты выше  $1 \cdot 10^9$  Гц затруднительно, т.к. измерения необходимо проводить на расстояниях сотен микрон и работать с волнами с большой интенсивностью.

Несмотря на то, что скорость и затухание ультразвука детально исследованы для дистиллированной воды, и получены экспериментальные результаты по зависимости затухания ультразвука от частоты и температуры, аналогичных данных о морской воде для различных морей и океанов, особенно шельфовых зон, совершенно недостаточно.

Теоретические расчеты скорости распространения и поглощения ультразвука в природных жидкостях, основанные на молекулярной теории, еще не обоснованы, поскольку на сегодняшний день строгая теория отсутствует [2–14].

Однако исследователи продолжают накапливать экспериментальный материал по скорости распространения и затуханию ультразвука и, таким образом, пытаются определить границы применимости эмпирически установленных

закономерностей и использовать их для практических целей. Разрабатываются новые методы расчета акустических свойств природных вод, и устанавливается их связь с термодинамическими характеристиками, что в ряде случаев имеет некоторые преимущества по сравнению с традиционными моделями проведения измерений, например, посредством анализа водной среды по пробам, отобранному батометрами.

Для создания автоматизированных приборов, измеряющих поглощение ультразвука в природных водах и работающих *in situ*, необходимо оценить возможности достигнутых технологий. Широко известность при проведении океанографических работ получили измерители скорости звука, анализ которых приведен в работе [15]. Однако, в дальнейшем такие приборы можно дополнить измерителем поглощения ультразвука без существенных финансовых затрат.

**Основная часть.** Рассмотрим измерители скорости звука в воде, разработанные и созданные различными производителями. Все эти приборы после дооснащения их современными микросхе-

мами и программными средствами, включая методики их использования, можно будет использовать также и для измерения затухания акустического сигнала в воде.

Одним из ведущих производителей профилографов скорости звука (SVP) в воде является английская компания Valeport (Великобритания). Все профилографы этой компании снабжаются однотипными датчиками скорости звука с диапазоном измерения 1400–1600 м/с. Измерение скорости звука основано на времяпролетном методе измерений. Каждое измерение скорости звука выполняется с помощью одного акустического импульса, проходящего стабильную измерительную базу. В зависимости от длины измерительной базы, которая формируется за счет высокостабильных стержней из карбонового композитного материала, можно получить различные разрешения и точность по скорости звука. Технические и метрологические данные датчиков скорости звука при частоте излучения пьезокерамики 2,5 МГц (компания Valeport Limited) приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Технические и метрологические характеристики датчиков

Датчик скорости звука, мм	Чувствительность, м/с	Диапазон, м/с	Стабильность сигнала, м/с	Точность калибровки, м/с	Общая погрешность, м/с	Частота, Гц
25	0,001	1400÷1600	±0,01	±0,085	±0,095	22
50	0,001	1400÷1600	±0,006	±0,054	±0,06	16
100	0,001	1400÷1600	±0,003	±0,027	±0,03	11

Профилографы скорости звука фирмы Valeport объединены в серию MIDAS и могут включаться в состав как зондирующих, так и буйковых измерительных комплексов.

Все измерительные каналы скорости звука приборов фирмы Valeport из-за конструктивных особенностей первичного преобразователя имеют недостаток, связанный с зависимостью измерительной базы от давления.

Институт природно-технических систем (ИПТС) разработал свой SVP ИСЗ-1 [16]. Его технические характеристики представлены в табл. 2.

Рассмотрим технические возможности измерительного канала скорости звука прибора ИСЗ-1:

- частота опроса измерительного канала 18 Гц;
- длина измерительной базы датчика скорости звука 6 см;
- погрешность измерения скорости звука в статическом режиме 0,02 м/с;
- частота излучаемых радиоимпульсов 2 МГц.

Пространственный масштаб датчика скорости звука определяется измерительной базой и диаметром пьезокерамики, в нашем случае  $l = 6$  см,  $d = 1$  см.

**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 его 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 установке соответствующего датчика давления.

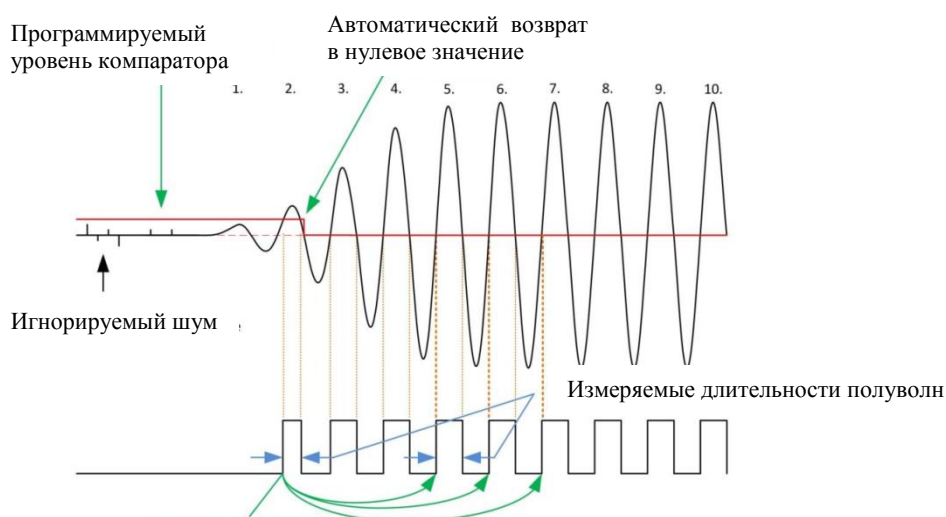
Градуировка канала скорости звука проводится в лабораторных условиях с использованием уравнения для скорости звука в морской воде [17]. Дель Гроссо также опубликовал уравнение для скорости звука в дистиллированной воде, вместе с Mader [18]. Дистиллированная вода имеет явное преимущество перед морской водой в том, что необходимо контролировать меньше параметров, а именно давление и температура. Поэтому при фиксированном давлении (т.е. атмосферном, в лабораторных условиях) достаточно просто точно контролировать дистиллированную вод с точки зрения температуры. Таким образом, авто-

ры [19] оценивают, что уравнение Дель Гроссо и Мадера имеет показатель точности, равный  $\pm 0,015$  м/с; это значительно лучше, чем в уравнениях морской воды.

Известно, что существующие измерители скорости звука работают на частотах в несколько МГц [15]. Разработанный нами прибор ИСЗ-1 работает на частоте 2,0 МГц.

Первая попытка определения затухания ультразвука была предпринята на действующем приборе ИСЗ-1, где установлен конвертер TDC-GP22. В этом конвертере для определения затухания сигнала используется режим работы First Wave Mode [20].

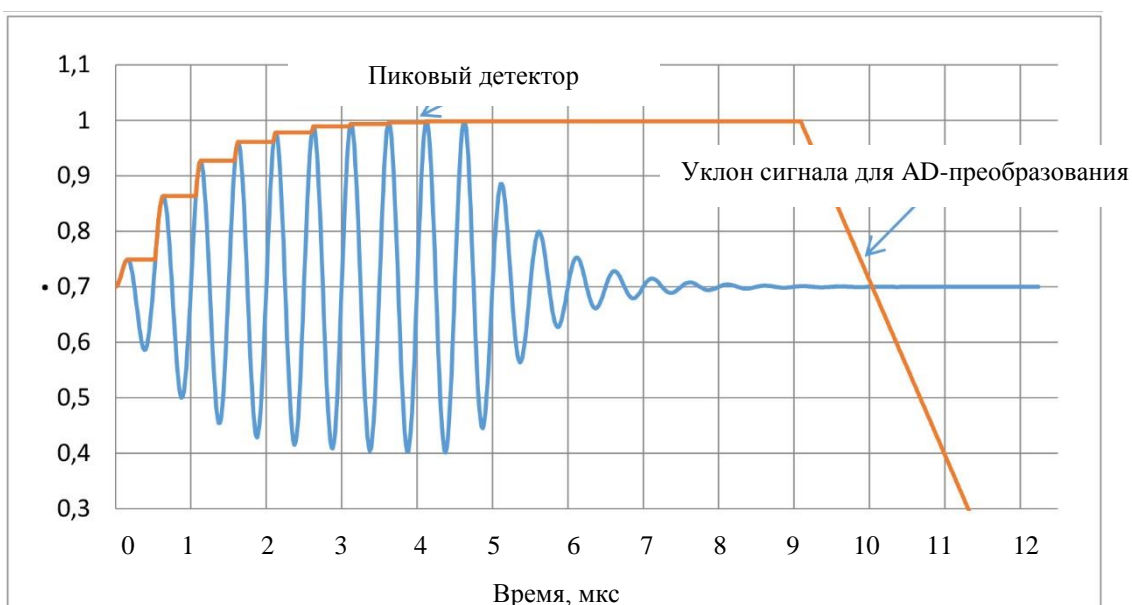
Измеренное затухание в этом режиме является дополнительным результатом при реализации метода пересечения нуля (Zero-Crossing Detection) [21], который используется для улучшения точности и уменьшения влияния шумов при определении временных интервалов.



**Рис. 1.** Приемный сигнал, уровень порога компаратора и импульсы, поступающие во время-цифровой преобразователь конвертора

На рис. 1 графически рассмотрен этот режим работы. После излучения сигнала в среду приёмное устройство конвертера устанавливает порог срабатывания компаратора на программируемый уровень (от 0 до 35 мВ с шагом 1 мВ). После того как уровень полуволны приёмного сигнала достигает установленного порога конвертер производит измерение интервала времени между

нарастающим и задним фронтом этой первой полуволны и сразу же сбрасывает порог компаратора на нулевой уровень. Затем конвертер производит измерение полуволны одного из следующих трёх периодов сигнала. Это значение используется в качестве эталона. Отношение между первой полуволной и эталонной (находится в диапазоне от 0 до 1) пересчитывается в затухание ультразвука.



**Рис. 2.** Схема измерения амплитуды акустического сигнала

Реальные попытки использовать режим конвертера First Wave Mode не дали удовлетворительных результатов из-за большой погрешности при определении затухания. Ошибка определения амплитуды достигала 20%, что не приемлемо для наших исследований.

В отличие от TDC-GP22 в TDC-GP30 введена новая функция измерения амплитуды приемного сигнала, значительно повышающая точность ее определения [22]. На рис. 2 представлена схема измерения амплитуды сигнала.

Алгоритм измерения амплитуды работает следующим образом. После принятия отраженного сигнала пиковым детектором фиксируются пиковая амплитуда. Затем после окончания действия пакета импульсов приемного сигнала с помощью аналого-цифрового преобразователя с учетом наклона импульса определяется время его разряда в границах амплитуды от максимальной до установления уровня, в нашем случае 0,7.

По результатам измерения времени вычисляют амплитуду акустического сигнала по следующим формулам:

$$V_{Up}[mV] = AMC_{Gradient} [mV/ns] * AM_{Up}[ns] - AMC_{Offset}[mV],$$

$$V_{Down}[mV] = AMC_{Gradient} [mV/ns] * AM_{Down}[ns] - AMC_{Offset}[mV],$$

где

$$V_{CAL} (typ) = V_{REF}/2 = 350 \text{ mV}, V_{REF} = \text{internal reference},$$

$$AMC_{Gradient} [mV/ns] = V_{CAL}[mV] / (AMC_H[ns] - AMC_L[ns]),$$

$$AMC_{Offset}[mV] = (2 * AMC_L[ns] - AMC_H[ns]) * AMC_{Gradient} [mV/ns].$$

Использование конвертора TDC-GP30 для определения амплитуды затухающего сигнала вполне удовлетворяет разработчиков. Основной вклад в погрешность определения коэффициента затухания вносит первичный преобразователь, в нашем случае датчик скорости звука. Как уже отмечалось, все датчики скорости звука SVP приборов однотипные и работают по принципу измерения разности времени между зондирующим и отраженным сигналом на образцовой базе.

Использование зондирующего сигнала и отраженного акустического сигнала для определения коэффициента затухания связано с некоторыми трудностями. Отраженный сигнал частично поглощается отражателем. Рассмотрим более подробно этот вопрос, считая, что датчик находится в морской воде.

Коэффициент отражения на границе двух сред определяется известным соотношением:

$$k = \frac{z_b - z_0}{z_b + z_0}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент отражения;  $z_b$  – удельное акустическое сопротивление воды;  $z_0$  – акустическое сопротивление отражателя.

В свою очередь

$$z_b = \rho_b c_b, \quad (2)$$

где  $\rho_b$  – плотность воды;  $c_b$  – скорость звука в воде.

Аналогично

$$z_0 = \rho_0 c_0, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  и  $c_0$  – плотность и скорость звука в отражателе.

По нашим оценкам для датчика скорости звука, где отражатель выполнен из нержавеющей стали или титана при температуре 20°C коэффициент отражения составляет около  $k = 0,93$ . Но, величина  $z_b$  зависит от температуры, давления и количества солей. Следовательно, и коэффициент  $k$  является переменной величиной и зависит от этих параметров.

Параметр  $z_b$  можно вычислить по показаниям измерения скорости звука,

температуры и давления, используя выражения для определения плотности дисциллированной и морской воды [23].

При измерении коэффициента затухания необходимо знать начальную амплитуду  $U_H$  и амплитуду отраженного сигнала  $U_0$  при известном расстоянии, и

далее, используя формулу  $\alpha = \frac{1}{L} \ln \frac{U_H}{U_0}$ ,

рассчитывают коэффициент затухания  $\alpha$ . Вопрос определения коэффициента затухания  $\alpha$  для импортных приборов, где в датчике скорости звука используется только один отражатель, мы в этой работе не рассматриваем.

Датчик скорости звука ИСЗ-1 в отличие от зарубежных приборов имеет два отражателя, поэтому определить амплитуду  $U_0$  не составляет трудностей. Разность амплитуды сигналов между приемными сигналами от двух отражателей и будет характеризовать величину коэффициента затухания ультразвука в среде на длине базы между двумя отражателями.

Но учитывая то, что первый отражатель имеет полупрозрачную конструкцию, коэффициент его отражения учитывается при градуировке прибора.

**Описание работы программы.** Рассмотрим схему разработанной программы для определения скорости и затухания ультразвука для конвертора TDC-GP30, установленного в макете прибора (рис. 3). При включении питания прибора главный микроконтроллер осуществляет ряд настроек, включающих в себя настройки интерфейсов с бортовым устройством и с микросхемой ультразвукового преобразователя, после чего входит в автономный режим работы. В любой момент прибор может получить команду от бортового устройства, которая переводит его в один из режимов работы: телеметрический, автономный, работы с памятью или работы с настройками. В телеметрическом и автономном режиме осуществляется рабочий цикл, в ходе которого осуществляется настройка и запуск первичных ультразвуковых преобразований, чтение промежуточного результата, дополнительная настройка,

основанная на промежуточных результатах, и чтение окончательного результата; в зависимости от режима результат сохраняется во внутреннюю память прибора или передаётся бортовому устройству. В режиме работы с памятью прибора главный микроконтроллер может получать команды чтения или форматирования памяти и выполнять соответ-

ствующие им необходимые действия. В режиме настроек главный микроконтроллер получает команду записи и следующий за ней пакет данных и записывает их в свою энергонезависимую память или получает команду чтения и передаёт хранящееся в энергонезависимой памяти содержимое области настроек.

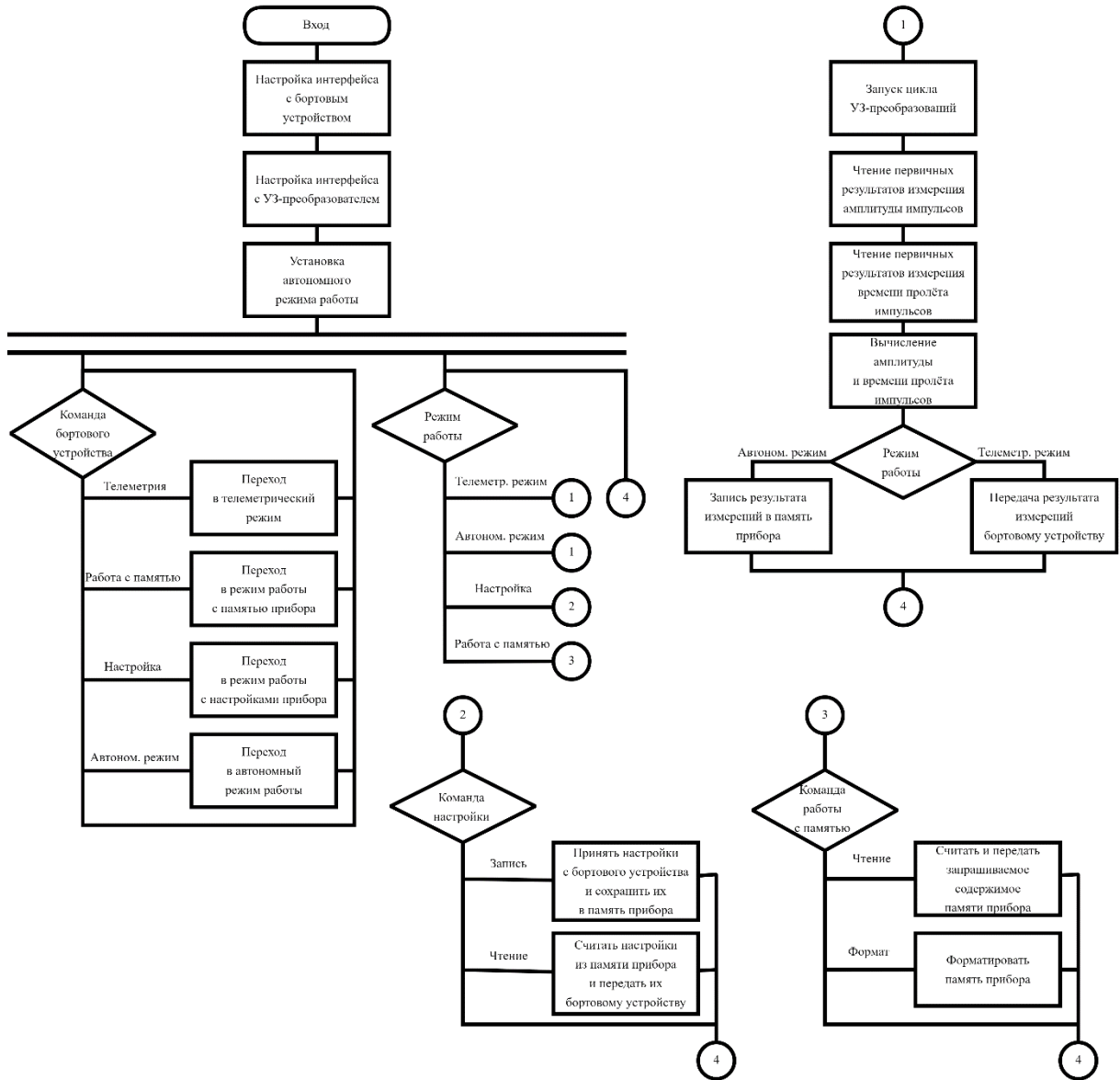


Рис. 3. Схема программы расчета времени и амплитуды ультразвукового сигнала

**Заключение.** Предложено оснастить измерители скорости звука дополнительным каналом для определения поглощения звука в воде, что позволит расширить получаемый прибором набор первичной информации, исследовать природу аномалий морской воды с их количественной и качественной оценкой.

Преимуществом предложенного модифицированного прибора с двумя акустическими измерительными каналами является то, что на базе существующих SVP профилографов без особых конструктивных изменений, можно получить измеритель с новыми функциональными возможностями.

В качестве дальнейшего развития модифицированного прибора предлагается расширить рабочий диапазон частот до 10 МГц и дополнить его еще одним измерительным каналом для контроля рассеяния ультразвука, что позволит исследовать составляющие затухания и отдельно выделить поглощение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou, Qifa, Sienting Lau, Dawei Wu, and K. Kirk Shung. "Piezoelectric films for high frequency ultrasonic transducers in biomedical applications." *Progress in materials science* 56, no. 2 (2011): 139–174.
2. Fisher F.H., Simmons V.P. Sound absorption in sea water // *J. Acoust. Soc. Am.* **62**, 558–564 (1977).
3. Mellen R.H., Simmons V.P., Browning D.G. Sound absorption in sea water: A third chemical relaxation // *J. Acoust. Soc. Am.* **65**, 923–925 (1979).
4. Fisher F.H., Simmons V.P. Sound absorption by a third chemical reaction // *J. Acoust. Soc. Am.* **65**, 1327–1329 (1979).
5. Kibblewhite A.C., Hampton L.D. A review of deep ocean sound attenuation data at very low frequencies // *J. Acoust. Soc. Am.* **67**, 147–157 (1980).
6. Pinkerton M.M. A pulse method for the measurement of ultrasonic Absorption in liquids: results for water // *Nature.* **160**, 128 (1947).
7. Leonard R.W. The attenuation of ultrasonic waves in water // *J. Acoust. Soc. Am.* **20**, 224 (1948).
8. Liebermann L. The origin of sound absorption in water and in sea water // *J. Acoust. Soc. Am.* **20**, 868 (1948).
9. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions // *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 896–907 (1982).
10. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption // *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 1879–1890 (1982).
11. Browning D.G., Mellen R.H. Attenuation of low-frequency sound in the sea: Recent results, in *Progress in Underwater Acoustics*, edited by H.M. Merklinger (Plenum, New York, 1987). P. 403–410.
12. Skretting A., Leroy C.C. Sound Attenuation between 200 Hz and 10 kHz // *J. Acoust. Soc. Am.* **49**, 276–282 (1970)
13. Mellen R.H., Browning D.G. Variability of Low-Frequency Sound Absorption in the Ocean: pH Dependence // *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 704–706 (1977).
14. Garrison G.R., Early E.W., Wen T. Additional Sound Absorption Measurements in near-Freezing Sea Water // *J. Acoust. Soc. Am.* **59**, 1278–1283 (1976).
15. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Использование профилографов скорости звука для определения плотности воды // *Современные проблемы термогидро-механики океана (СПТО-2017): материалы Первой МНТК по термогидро-механике океана (Москва, 28–30 ноября 2017 г.)*. М.: ИО РАН, 2017. С. 46–49.
16. Греков А.Н., Греков Н.А., Шишкин Ю.Е. Исследование характеристик профилографа скорости звука и коррекция результатов измерения // *Системы контроля окружающей среды*. 2017. Вып. 10 (30). С. 24–30.

17. *IOC, SCOR and I A PSO, 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 p., available at: <http://www.TEOS-10.org>*

18. *Del Grosso V.A., Mader C.W. Speed of sound in pure water // J. Acoust. Soc. Amer. 1972. Vol. 52. N 5. P. 1442–1446.*

19. *Исследование зависимости скорости звука от давления в дистиллированной воде / В.А. Белогольский, С.С. Секоян, Л.М. Саморукова [и др.] // Измерительная техника. 1999. № 4. С. 66–69.*

20. *Ultrasonic-Flow-Converter Data Sheet TDC-GP22 March 13th 2014 Document-No: DB\_GP22\_en V0.9 Universal 2-Channel Time-to-Digital Converters Dedicated to Ultrasonic Heat & Water Meters (Available at [https://ams.com/documents/20143/36005/TDC-GP22\\_DS000323\\_1-00.pdf/aa6c41ca-](https://ams.com/documents/20143/36005/TDC-GP22_DS000323_1-00.pdf/aa6c41ca-1312-60ec-f6a8-82c90da3f856)*

*1312-60ec-f6a8-82c90da3f856) (дата обращения: 03.06.2019).*

21. *Jobst S., Rudolf B. A Comparison of Correlation and Zero-Crossing Based Techniques in Ultrasonic Measurements // In Proceedings of “Applied Research Conference 2014”, Ingolstadt, 2014. P. 362–267.*

22. *Ultrasonic-Flow-Converter Data Sheet TDC-GP30 June 27th, 2019 Document-No: DB\_GP30Y\_Vol1\_en V0.3 System-Integrated Solution for Ultrasonic Flow Meters Volume 1: General Data and Frontend Description (Available at [https://ams.com/documents/20143/36005/TDC-GP30\\_DS000391\\_3-00.pdf/f96f8c8b-87e5-ac8d-a26c-65756fd240fa](https://ams.com/documents/20143/36005/TDC-GP30_DS000391_3-00.pdf/f96f8c8b-87e5-ac8d-a26c-65756fd240fa)) (дата обращения: 03.06.2019).*

23. *Grekov A.N., Grekov N.A., Sychov E.N. New Equations for Sea Water Density Calculation Based on Measurements of the Sound Speed // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2019. 20 (3). P. 143–151. <https://doi.org/10.17587/mau.20.143-151>*

## **DEVELOPMENT OF IN SITU ACOUSTIC INSTRUMENTS FOR THE AQUATIC ENVIRONMENT STUDY**

**A.N. Grekov, N.A. Grekov, E.N. Sychov, K.A. Kuzmin**

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

Based on the analysis of existing acoustic methods and instruments, a prototype of an automated instrument has been developed to perform joint measurements in situ of two parameters: sound speed and ultrasound attenuation. The device is based on existing sound velocity profilers. It was proposed to replace the TDC-GP22 converters used in the sound speed meter ISZ-1 with more advanced modern modified converters TDC-GP30, which can significantly improve the accuracy of measuring the amplitude of the reflected acoustic signal. The programs for processing signals from the primary acoustic transducer have been developed. The model of the device passed preliminary tests.

**Keywords:** acoustic meters, sound speed, equations, ultrasound attenuation, sensors, transducers, natural waters, codes, scheme.