

При оперативном решении этих вопросов Россия может получить шанс первыми в мире решить задачу масштабного мониторинга водных биоресурсов. Внедрение предлагаемой системы АРГД несомненно позволит поставить мониторинг состояния запасов водных биоресурсов на совершенно новый качественный уровень.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Report of the Study Group on Collection of Acoustic Data from Fishing Vessels, ICES CM 2006/FTC: 02, March 2006, 14 pp.
2. *Кадильников Ю.В.* Вероятностно-статистическая теория рыболовных систем и технической доступности для них водных биологических ресурсов. – Калининград: АтлантНИРО, 2001.
3. *Дегтев А.И., Ивантер Д.Е.* Автоматизированная система количественной оценки рыбных запасов гидроакустическим методом // Рыбное хозяйство, 2002. №4.

Долгов Александр Николаевич

Конструкторское бюро морской электроники «Вектор»

E-mail: dolgov@vector.ttn.ru

347913, Ростовская обл., г. Таганрог, Россия, ул. Менделеева, 6

Тел.: (8634)333-900

Гончаров Сергей Михайлович

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии

E-mail: sgonch@vniro.ru

107440, Россия, Москва, ул. Верхняя Красносельская, 17, тел.: (495) 264-93-29

Кудрявцев Валерий Иванович

E-mail: vkudry@vniro.ru

Dolgov Aleksander Nikolaevich

Vector Marine Electronics

E-mail: dolgov@vector.ttn.ru

6, Mendeleeva Str., Taganrog, 347913, Russia, Ph.: (8634)333-900

Goncharov Sergei Vichailovich

Russian Federal Research Institute of Fisheries & Okeanography

E-mail: sgonch@vniro.ru

17, V.Krasnoselskaya, Moscow, 107440, Russia, Ph.:(495)264-93-29

Kudrjajtsev Valery Ivanovich

E-mail: vkudry@vniro.ru

УДК 551.463.22

В.И. Бабий

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ

Рассмотрены абсолютная и относительная дифракционные погрешности измерителей скорости звука в жидкостях. Показано, что в режиме постоянной длины звуковой волны могут быть введены дифракционные поправки во всем диа-

пазоне измерения скорости звука по независимым данным в реперной точке при температуре дистиллированной воды максимальной плотности.

Дифракционная погрешность; длина звуковой волны; дифракционный поправки.

V. I. Babiy

DIFFRACTION EFFECTS AT SOUND VELOCITY MEASUREMENT IN LIQUIDS

Absolute and relative diffraction inaccuracy of the meters of the sound velocity in liquid are considered. The mode of the constant length of the sound wave is used. Diffraction corrections can be carried in all range of the change of the sound velocities on independent data in reper point at the temperature of the distilled water of maximum density.

Diffraction inaccuracy; length of the sound wave; diffraction corrections.

Вся история разработки средств измерения есть борьба за повышение их инструментальной точности. При этом безусловное предпочтение отдается прямым методам перед косвенными измерениями. Проблема повышения точности прямых измерений скорости звука C в воде (в жидкостях) согласно физическому определению, при кажущейся простоте исходных соотношений: $C = l/\tau$ или $C = \lambda \cdot f$, где l – путь, проходимый звуковой волной за интервал времени τ , λ – длина плоской звуковой волны, f – частота звука, на практике связана с преодолением значительных трудностей. Магистральный путь ее решения состоит в выявлении метрологически слабых звеньев измерительной цепи, в частности, формировании в некоторой области жидкой среды плосковолнового звукового поля и корректном учете дифракционных и краевых эффектов, а также эффектов взаимодействия зондирующего акустического излучения со средой, включая диссипативные и нелинейные эффекты.

Анализ систематических погрешностей и результатов метрологических аттестаций показал, что общепринятые математические модели [1-3] неадекватны существующим гидроакустическим измерителям скорости звука (ГИСЗ) и не обеспечивают реализацию их потенциальных возможностей. Главный недостаток этих моделей состоит в отсутствии учета дифракционных погрешностей, которые наряду с другими эффектами являются источником наиболее трудно устранимой систематической погрешности. Слабо контролируемое явление дифракции звука заключается в отличии структуры реального звукового поля от идеального плосковолнового поля из-за конечности волновых размеров преобразователей. Этот вид погрешности стараются принимать во внимание в эталонах и установках высшей точности, воспроизводящих единицу скорости звука в воде [4, 5], однако, в образцовых и рабочих средствах измерения дифракционными погрешностями пренебрегают. Эффект дифракции в ГИСЗ может быть причиной расхождения между многочисленными эмпирическими формулами скорости звука разных авторов, особенно при низких температурах T и больших гидростатических давлениях P , результатами измерений C прямыми и косвенными методами, а также несоответствия результатов калибровок ГИСЗ по дистиллированной и стандартной морской воде, в других жидкостях. Поэтому учет дифракционных эффектов в прецизионных ГИСЗ является вопросом первостепенной важности, а математическая модель ГИСЗ обязательно должна содержать поправку на дифракцию. Тогда для ГИСЗ

(импульсно-циклических, время-пролетных, фазовых, автогенераторных и др.) функция преобразования имеет вид [5 – 8] :

$$Y = \frac{L}{C + \Delta C_n} + \Delta \tau , \quad (1)$$

где $Y = \tau$ – интервал времени для время-пролетных ГИСЗ, или период колебаний в импульсно-циклических ГИСЗ (информативный параметр); L – действующая геометрическая длина акустического пути; $\Delta \tau$ – паразитная временная задержка (или эквивалентный сдвиг фазы) сигнала в электроакустическом тракте; ΔC_n – абсолютная дифракционная погрешность. Заметим, что в общепринятых математических моделях ГИСЗ [1 – 3] поправка на дифракцию отсутствует, т.е. в выражении (1) $\Delta C_n = 0$. Как видно из (1), дифракция вызывает систематическую погрешность ГИСЗ. Абсолютная дифракционная погрешность ΔC_n обусловлена отличием реальной звуковой волны от плоской из-за конечных размеров базы и ультразвуковых преобразователей. Дифракция возникает также и на отражателях звука, особенно когда с целью уменьшения уровня вторичных отражений их делают выпуклыми, формируя, таким образом, расходящуюся сферическую отраженную волну [9]. Иногда дифракция на таких отражателях может быть сопоставима или даже превышать дифракцию на ультразвуковом преобразователе. Поэтому дифракция в ГИСЗ это совокупный эффект, который в общем случае описывается громоздкими выражениями при многочисленных предположениях и допущениях. В некоторых быстродействующих системах измерения скорости звука для введения дифракционных поправок в реальном масштабе времени используют матричную запись в процессоре численных значений параметров компенсации систематических составляющих дифракционной погрешности [10].

Абсолютная дифракционная погрешность $\Delta C_n(C)$, возникающая при измерении адиабатической скорости звука C в жидкости прямым аппаратным методом, определяется выражением

$$\Delta C_n(C) = C_n - C ,$$

где C_n – исправленный результат измерения без поправки на дифракцию; C – истинная (действительная) скорость звука. Сложность оценки $\Delta C_n(C)$ состоит в том, что она зависит от неизвестной (искомой) переменной C .

Относительная дифракционная погрешность есть $D(C) = \Delta C_n(C)/C$. Поскольку $\Delta C_n(C) \ll C$, то $D(C) \ll 1$. При длине звуковой волны в среде $\lambda = \text{const}$ и при постоянных геометрических размерах датчика S , когда его **волновые размеры неизменны**, получим $D(C) = \text{const}$ независимо от C и от моделей дифракции в любых слабо поглощающих звук жидкостях независимо от их химического состава и параметров термодинамического состояния. Другими словами, результаты градуировок таких ГИСЗ в дистиллированной воде в режиме $\lambda = \text{const}$ будут полностью приложимы к измерениям скорости звука с такой же погрешностью и в других жидкостях при разных T и P , в том числе и в морской воде [5 – 8]. Тогда восстановленные значения скорости звука C_v определяются выражениями:

$$C_v = C_n - \Delta C_n(C) = C_n - D \cdot C \approx C_n - D_1 \cdot C_n = (1 - D_1) \cdot C_n = D_2 \cdot C_n = D_2 \cdot \lambda \cdot f, \quad (2)$$

где $D_1 = D - D^2 + D^3 - D^4 + \dots$, $D_2 = 1 - D_1$, $C_n = \lambda \cdot f$.

Эта приближенная формула реализует метод последовательных приближений и позволяет для конкретного ГИСЗ выразить $\Delta C_n(C)$ с заданной погрешностью через D_1 и измеренную скорость звука C_n вместо неизвестной истинной C . Как видим, возможно введение либо переменной аддитивной дифракционной поправ-

ки $D_1 C_n$, зависящей от C_n , либо адекватной постоянной мультипликативной – коэффициента D_2 .

Из выражения (2) следует, что для данного режима произведение $D_2 \cdot \lambda = \text{const}$ есть инвариант, а следовательно, как в идеальном измерителе, $C_v = D_2 \cdot \lambda \cdot f$ прямо пропорциональна частоте f . Здесь λ может быть выражена в длинах световых волн, а частота f измерена с наивысшей точностью, т.е. на уровне первичных эталонов. Поэтому предел повышению точности абсолютных измерений скорости звука в режиме $\lambda = \text{const}$ согласно (2) ставит дифракционная погрешность.

Таким образом при измерениях C в режиме $\lambda = \text{const}$ задача учета дифракции состоит в оценке величины D и введении поправок на дифракцию согласно (2). На практике оценку D можно получить измеряя C_n в дистиллированной воде в реперной точке (T_m, P_0) , где адиабатическая скорость звука $C_{ад}$ равна изотермической скорости звука C_m , которая рассчитывается по плотности и изотермической сжимаемости, например из ГСССД. В настоящее время C_m определена независимо **неакустическим** способом в реперной точке с относительной погрешностью менее 10^{-6} [3,11,12]. В реперной точке $T_m = 3,98152$ °С по МТШ-90 плотность воды максимальна $\rho_m(T_m, P_0) = 999,97562$ кг/м³, а изотермическая сжимаемость $\beta_{\text{изо}}(T_m, P_0) = 4,94873 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹, что дает оценку скорости звука $C_m = C_{\text{изо}}(T_m, P_0) = (\rho_m \cdot \beta_{\text{изо}})^{-0,5} = 1421,5378$ м/с.

Далее находим в реперной точке абсолютную дифракционную погрешность $\Delta C_p(C_m) = C_n(T_m, P_0) - C_m$, а затем и относительную погрешность $D = \Delta C_p(C_m) / C_m$, по которой согласно (2) с заданным приближением вычисляем D_1 или D_2 и проводим измерения C_v , вводя поправку на дифракцию по формуле (2). Результирующая погрешность измерений C будет $\Delta C(C) = C_v - C$. В реперной точке имеем $C_{ад} = C_m$ и по определению $\Delta C(C) = 0$ (с неопределенностью знания C_m). По мере уточнения значения C_m , и соответственно D , возможна согласно (2) простая последующая коррекция полученных ранее результатов абсолютных измерений скорости звука.

В виде примера на рис.1 приведены результаты расчета дифракционных погрешностей для приближенной модели дифракции вида [13]:

$$\Delta C_p(T,P) / C(T,P) = 0,0315 (\lambda/r)^2,$$

где r – эффективный радиус ультразвукового преобразователя.

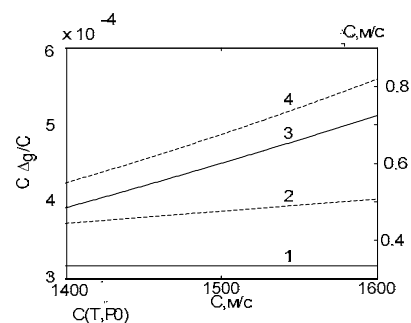


Рис.1. Зависимости от скорости звука C относительных (сплошные линии) и абсолютных (штриховые линии) дифракционных погрешностей для разных режимов: 1,2 – при $\lambda = \text{const}$; 3,4 – при $f = \text{const}$

Графики 1,2 построены для параметра $(\lambda/r) = 0,1$, а графики 3,4 построены для $(\lambda/r) = 0,125$, рассчитанные для ГИСЗ МГИ 4603 [5,14,15]. Как видно на рис.1, при $\lambda = \text{const}$ относительная дифракционная погрешность D (график 1), определенная в реперной точке $C_{\text{изо}}(T_m, P_0)$, обозначенной стрелкой на оси абсцисс, сохраняется постоянной во всем диапазоне скорости звука. Это можно отнести к положительным свойствам, характерным для квазиидеальных измерителей. В отличие от этого в обычных измерителях при $f = \text{const}$ относительная дифракционная погрешность (график 3) зависит от C квадратично, а абсолют-

ная дифракционная погрешность (график 4) – кубично [8]. Как видно на графике 4, при $f = \text{const}$ дифракционная погрешность ΔC_n изменяется приблизительно на 0.25 м/с во всем диапазоне изменения C . Эта оценка экспериментально подтверждается в работе [5]. Режим $\lambda = \text{const}$ реализуется различными способами, например, методом автогенерации или программно-алгоритмически, посредством изменения частоты возбуждения широкополосного ультразвукового излучателя по выражению $f = C_n / \lambda$, где C_n – прямо или косвенно измеряемая скорость звука.

Достоинство режима $\lambda = \text{const}$ состоит в независимости экспериментальных оценок относительной дифракционной погрешности от математических моделей дифракции. Это обстоятельство можно использовать для верификации моделей дифракции.

Сочетание режима $\lambda = \text{const}$ с дифференциальным методом измерения C является эффективным способом уменьшения и учета наиболее трудно устранимой систематической составляющей дифракционной погрешности. Применение конфокальных или полуконфокальных осесимметричных открытых акустических резонаторов также весьма существенно снижает дифракционную погрешность.

Таким образом, используя предложенные выше принципы и методы, становится возможным на порядок и более повысить точность воспроизведения исходного размера единицы скорости звука в жидкостях в широком диапазоне температур и при большом гидростатическом давлении. Следовательно, создается принципиальная основа для существенного повышения инструментальной точности гидроакустических средств измерения скорости звука в морской среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сервин Г.Н.* Измерение скорости звука в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 136 с.
2. *Комляков В.А.* Корабельные средства измерения скорости звука и моделирования акустических полей в океане. – СПб.: Наука, 2003. – 357 с.
3. *Бабий В.И.* Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. – Л., Гидрометеиздат, 1983. – 200 с.
4. *Белогольский В.А., Саморукова Л.М.* О методических погрешностях при высокоточных измерениях скорости звука в жидких средах // Научно-техническая конференция «Проблемы метрологии гидрофизических измерений ПМГИ-2006». Материалы конференции. Ч.2. – М.: ФГУП ВНИИФТРИ, 2006. – С. 129 – 137.
5. *Бабий В.И.* Математическая модель гидрофизических измерителей скорости звука и метод их метрологической аттестации // « Системы контроля окружающей среды ». Сб. науч. тр. / НАН Украины, МГИ. – Севастополь, 2002. – С. 119 – 127.
6. *Бабий В.И.* Измерение скорости звука в морской среде // Акустика океана. / Доклады IX школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XII сессией Российского Акустич. общества. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 409 – 413.
7. *Бабий В.И.* Аппаратурный и алгоритмический методы уменьшения дифракционных погрешностей гидрофизических измерителей скорости звука // «Системы контроля окружающей среды. Мониторинг и модели». Ч.2. / Сб. науч. тр./НАН Украины, МГИ. – Севастополь, 2003. – С. 14 – 15.
8. *Бабий В.И.* Алгоритмический метод повышения точности корабельных гидроакустических измерителей скорости звука // Судостроение, № 4, 2003. – С. 46 – 49.

9. Гидроакустика за 20 лет. Пер. с англ./ Под ред. Ю.Ф.Тарасюка. – Л.: Судостроение, 1975. – 172 с.
10. *Кажис Р.-Й.* Ультразвуковые информационно-измерительные системы. – Вильнюс: Мокслас, 1986. – 216 с.
11. *Бабий В.И.* Метрология скорости звука в морской воде // X Всесоюзная акустическая конференция. Доклады. Секция П. – М., 1983. – С. 42 – 45.
12. *Шерстянkin П.П., Тарасюк Ю.Ф., Колотило Л.Г., Иванов В.Г., Куимова Л.Н., Бабий В.И.* Скорость звука в воде вблизи температуры максимальной плотности // Доклады РАН, 2005, том 405, №1. – С. 42 – 45.
13. *Краснушкин П.Е.* О дифракционных эффектах при измерениях скорости и поглощения ультразвука // ДАН СССР, 1968, т. 181, № 6. – С. 1361 – 1364.
14. Отчет о НИР «Разработать образцовое средство измерения скорости распространения звука в морской воде» (заключительный). Шифр темы 0.08.06.16 «Образец», проект «Приборостроение». № гос.регистрации 0187.0018097. – Севастополь, 1988. – 56 с.
15. *Бабий В.И., Толстошеев А.П.* Рабочие средства измерения скорости звука в морской среде / Препринт.– Севастополь: Изд. МГИ НАН Украины «ЭКОСИ-Гидрофизика», 1999. – 36 с.

Бабий Владлен Иванович

Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины

E-mail: MarBab@yandex.ru

990111, Украина, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2, тел.: (0692)53-46-89

Babiy Vladlen Ivanovich

Marine Hydrophysical Institute of Ukraine National Academy of Science

E-mail: MarBab@yandex.ru

2, Kapitanskay St., Sevastopol, Ukraina, 990111, Ph.: (0692)53-46-89