

**МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ
ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ
ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА**

Бабий В.И., Толстошеев А.П.
Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Проблемы обеспечения экологической безопасности, освоения шельфовой зоны Мирового океана, прикладной гидроакустики, фундаментальных океанографических исследований тесно связаны с мониторингом окружающей водной среды, и, как следствие, с получением достоверной информации о пространственно-временной изменчивости первичных гидрофизических параметров, одним из основных среди которых является скорость распространения звука.

Общие требования к гидроакустическим измерителям скорости звука. В настоящее время в известной степени решены некоторые вопросы прикладной гидроакустики, например, прогнозирование дальности действия и эффективности работы гидроакустических систем. Наряду с этим решение многих задач мониторинга водной среды ограничивается практическим отсутствием методов и средств измерения скорости звука, обеспечивающих высокие метрологические и эксплуатационные характеристики, соизмеримые с характеристиками современных измерителей других гидрофизических параметров — температуры, давления, электропроводности (солёности). Главным образом это относится к задаче исследования мелкомасштабных процессов в океане, которые имеют временной диапазон от 10^{-1} до 10^4 с и пространственные масштабы от 10^{-3} до

10^2 м. Как показано в [1], для получения достоверной информации об изменчивости поля скорости звука в таких масштабах необходимо, чтобы средство измерения имело следующие основные показатели назначения:

- диапазон измерения от 1400 до 1600 м·с⁻¹;
- систематическая составляющая погрешности измерения $\tilde{\Delta}_s \leq 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$;
- среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей погрешности $\tilde{\sigma}[\tilde{\Delta}] \leq 0,01 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$;
- время осреднения $\tau \leq 0,1 \text{ с}$;
- характерный геометрический размер первичного преобразователя $L \leq 0,1 \text{ м}$.

Приведенные метрологические характеристики и характеристики пространственно-временного осреднения средств измерения скорости звука должны сохраняться в условиях воздействия таких влияющих факторов, как изменения температуры окружающей среды, гидростатического давления, биологическое обрастание в течение межповерочного интервала, длительность которого должна быть не менее 12 месяцев.

Создание высокоточных средств и методов измерения скорости звука в воде в значительной степени осложняется отсутствием единой поверочной схемы, что приводит к неоднозначности оценок характеристик измерителей. Поэтому разработка собственно измерительной аппаратуры должна сопровождаться разработкой и обоснованием методов и средств её поверки.

Средства измерения скорости звука. Анализ средств измерения скорости звука в воде прямым методом показывает, что наиболее перспективными для реализации измерителя скорости звука (ИСЗ) в системах экологического мониторинга морской среды являются фазовый, импульсно-циклический, час-

точно-временной и времяпролётный методы.

Частотно-временной метод, впервые применённый в расходомерии, является развитием импульсно-циклического метода. Анализ результатов разработки частотно-временных ИСЗ показывает, что при перспективности самого метода построение измерителей на его основе не позволяет получить требуемые характеристики, поскольку в частотно-временных ИСЗ, также как в фазовых и импульсно-циклических, преобразование скорости звука в выходной информативный параметр происходит с внесением дополнительных временных задержек. Предлагаемые методы компенсации влияния этих задержек, например, путём их измерения и последующего учёта, представляются неэффективными в условиях эксплуатации ИСЗ при воздействии таких влияющих факторов, как биологическое обрастание, воздействие изменений температуры окружающей среды и гидростатического давления.

Рассмотрим главные источники дополнительной погрешности прямых измерений скорости звука в воде.

Независимо от метода измерения, ИСЗ содержит первичный (акустический) и вторичный (электронный) преобразователи. Входным параметром вторичного преобразователя является, в общем случае, интервал времени τ (С), модулированный скоростью звука. Выражение для τ (С) имеет вид:

$$\begin{aligned} \tau(C) &= \frac{L}{C} + t_r + t_{ис} + t_{сп} + t_y + \frac{1}{2f} = \\ &= \frac{L}{C} + t_d, \end{aligned} \quad (1)$$

где L – длина измерительной базы первичного измерительного преобразователя;

C – измеряемая скорость звука;

t_r – время задержки при формировании импульса возбуждения акустического преобразователя (АП);

$t_{ис}$ – время преобразования электрического импульса возбуждения АП в акустический зондирующий сигнал;

$t_{сп}$ – время преобразования акустического сигнала, принятого АП, в электрический сигнал;

t_y – постоянная времени усилителя приёмного канала вторичного преобразователя (групповое время запаздывания);

f – частота акустического сигнала;

t_d – суммарная дополнительная временная задержка.

На основании анализа характеристик ИСЗ могут быть приняты следующие количественные оценки параметров формулы (1) при температуре среды 16°C : $t_r \leq 5,5 \cdot 10^{-9}$ с; $t_{ис} \leq 12 \cdot 10^{-9}$ с;

$$\frac{1}{2f} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ с (для } f = 10^6 \text{ Гц); } t_{ис} \approx t_{сп} \approx$$

$$\approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ с. Таким образом, } t_d \approx 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Наличие дополнительной задержки t_d приводит к нелинейности характеристики преобразования ИСЗ, а изменение Δt_d этого времени, обусловленное воздействием влияющих факторов, – к погрешности преобразования. Анализ данных, приведенных в ряде работ, позволяет принять $\Delta t_d \approx 1,5 \cdot 10^{-9}$ с, что при длине измерительной базы $L = 0,07$ м приводит к дополнительной погрешности измерения скорости звука $\Delta C \approx 0,25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Это значение обусловлено, в основном, влиянием изменений температуры, питающих напряжений и нестабильности характеристик элементов ИСЗ во времени.

Измеритель скорости звука. Для решения задач экологического мониторинга и гидрофизических исследований в МГИ НАНУ был разработан ИСЗ, свободный от указанных выше недостатков. Акустический канал измерителя выполнен по двухбазовой схеме, а структура построения электронного канала, реализованного на основе частотно-временного метода, позволяет осуществлять преобразование входного

информативного параметра τ (С) практически без внесения дополнительных погрешностей, обусловленных воздействием влияющих факторов. Это достигается тем, что оба отражённых сигнала проходят по одному и тому же электронно-акустическому приёмному тракту.

Схема работы первичного измерительного преобразователя ПИП приведена на рисунке 1.

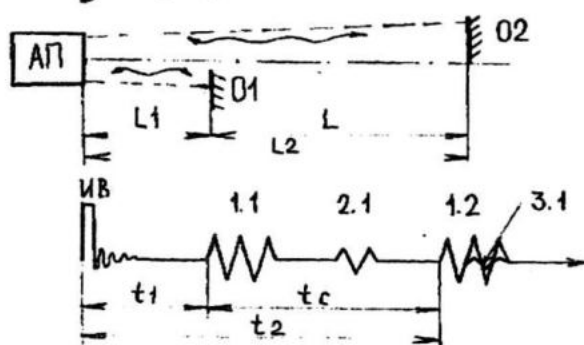


Рисунок 1. Схема и временные диаграммы работы двухбазового первичного измерительного преобразователя ПИП

В таком преобразователе при возбуждении импульсом ИВ акустического преобразователя АП в среду излучается акустический сигнал и, распространяясь, достигает первого 1 и второго 2 отражателей, эхо-сигналы от которых принимаются АП и преобразуются в электрические сигналы 1.1 и 1.2 соответственно. При этом, с учётом (1), очевидны следующие соотношения:

$$t_1 = \frac{L_1}{C} + t_r + t_{ис} + t_{сп} + \frac{1}{2f} = \frac{L_1}{C} + t_d; \quad (2)$$

$$t_2 = \frac{L_2}{C} + t_r + t_{ис} + t_{сп} + \frac{1}{2f} = \frac{L_2}{C} + t_d; \quad (3)$$

$$L = L_2 - L_1; \quad (4)$$

$$t_c = t_2 - t_1 = \frac{L}{C}. \quad (5)$$

Таким образом, двухбазовый первичный преобразователь и одноканальный электронно-акустический приёмный тракт теоретически позволяют осуществить преобразование скорости звука в среде в информативный интер-

вал времени без дополнительных задержек. Очевидно также, что такой преобразователь позволяет снизить влияние составляющей погрешности, обусловленной биологическим обрабатыванием элементов конструкции ПИП.

Термостабилизация длины измерительной базы ПИП осуществляется стойками, выполненными из ситалла типа СО115М, температурный коэффициент расширения которого $\alpha \sim 1 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$. При этом составляющая дополнительной погрешности, обусловленная влиянием на длину измерительной базы изменений температуры в рабочих условиях применения ИСЗ, не превышает $5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Из приведенных соотношений следует, что частота выходного сигнала генератора ГУН, а, следовательно, и выходной код ИСЗ, являются линейными функциями скорости звука в среде и не зависят от дополнительных неинформативных задержек в электронно-акустическом канале измерителя.

Быстродействие ИСЗ определяется главным образом временем измерения выходного информативного параметра, в качестве которого в зависимости от требований к динамическим характеристикам измерителя может использоваться частота выходного сигнала генератора ГУН или напряжение, управляющее этой частотой. В последнем случае динамические характеристики ИСЗ определяются используемым аналого-цифровым преобразователем, время измерения которого при современной элементной базе составляет несколько миллисекунд.

С целью повышения достоверности оценок характеристик измерителя была разработана методика определительных испытаний и метрологической поверки ИСЗ [2,3]. Погрешность методики в заданном диапазоне измерения скорости звука не превышает $4 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Результаты лабораторных и натурных исследований ИСЗ. В соответствии с предложенной структурой построения измерителя в МГИ НАН Украины были разработаны и изготовлены около двадцати опытных образцов ИСЗ, реализующих рассмотренную выше структуру построения и предназначенных в основном для эксплуатации в составе гидрофизических измерительных комплексов, в том числе в составе комплексов ОЛТ (МГИ 4103) - шесть, "ИСТОК-6" (МГИ 4104) - три, ОЛК (МГИ 1301) - два ИСЗ. Все опытные образцы ИСЗ прошли лабораторные (определяющие) и натурные испытания, некоторые результаты которых приводятся ниже.

С целью получения объективных оценок работоспособности ИСЗ исследовались основные характеристики опытных образцов измерителей. Программа лабораторных исследований включала в себя оценивание для каждого ИСЗ следующих показателей назначения:

- номинальная функция преобразования;
- систематическая составляющая основной погрешности $\tilde{\Delta}_s$;
- СКО случайной составляющей основной погрешности $\tilde{\sigma}[\Delta]$;
- дополнительная погрешность, обусловленная воздействием влияющих факторов;
- цена единицы наименьшего разряда выходного кода μc ;
- временная характеристика.

Номинальная функция преобразования ИСЗ, оценки систематической составляющей основной погрешности $\tilde{\Delta}_s$, СКО случайной составляющей основной погрешности $\tilde{\sigma}[\Delta]$ и цена единицы наименьшего разряда выходного кода определялись по методике поверки МИ-904, разработанной в МГИ АН Украины. В соответствии с этой методикой значения скорости звука, прини-

маемые в качестве образцовых, воспроизводились путём изменения температуры калибровочной жидкости и рассчитывались по формуле Дель Гроссо для дистиллированной воды. Температура воды измерялась платиновым термометром сопротивлений типа ПТС-10. Инструментальная составляющая СКО косвенного измерения скорости звука оценивается по формуле:

$$\sigma_H = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial T} \sigma_t\right)^2 + \sigma_\Phi^2}, \quad (6)$$

где $\frac{\partial C}{\partial T} \leq 5 \frac{m \cdot c^{-1}}{^\circ C}$ - частная производная скорости звука по температуре;
 σ_t - СКО результатов измерения температуры. Для термометра типа ПТС-10 $\sigma_t \leq 0,005 \text{ } ^\circ C$;

σ_Φ - СКО результатов расчёта скорости звука по формуле Дель Гроссо для дистиллированной воды, $\sigma_\Phi \leq 0,03 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Подставив приведенные значения параметров в формулу (6), получим $\sigma_H \leq 0,06 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Систематическая составляющая погрешности ИСЗ оценивалась по формуле:

$$\tilde{\Delta}_s \leq K \cdot \tilde{\sigma}[\Delta_s], \quad (7)$$

где K - коэффициент, зависящий от вида закона распределения погрешности и выбранного значения вероятности. Полагая, что этот закон нормальный, для вероятности 0,95 значение K принято равным 2;

$\tilde{\sigma}[\Delta_s]$ - оценка СКО систематической составляющей погрешности по диапазону, значение которой рассчитывается по формуле:

$$\tilde{\sigma}[\Delta_s] = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left\{ \frac{\Delta_{c_j}}{3} \right\}^2 \cdot \frac{1}{m-1} + \sigma_H^2}, \quad (8)$$

где Δ_{c_j} – среднее значение погрешности составляющей погрешности ИСЗ в j -той точке диапазона:

$$\Delta_{c_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{c_{j,i}}, \quad (9)$$

где n – количество отсчётов в каждой точке диапазона;

$\Delta_{c_{j,i}}$ – отклонение показаний ИСЗ в каждой точке диапазона.

Рассчитанные на основании этих данных по методу наименьших квадратов номинальные функции преобразования имеют вид:

$$C = C_0 + C_1 \cdot N, \quad (10)$$

где C – измеренное значение скорости звука;

C_0, C_1 – коэффициенты функции преобразования ИСЗ;

N – выходной код ИСЗ.

СКО случайной составляющей основной погрешности $\tilde{\sigma}[\Delta]$ оценивалось по следующей методике.

Первичный акустический преобразователь ИСЗ помещался в среду, в которой путём глубокого термостатирования и интенсивного перемешивания обеспечивалось относительное постоянство скорости звука в течение времени проведения испытаний. Измеренные значения скорости звука фиксировались и по полученным данным рассчитывалось значение $\tilde{\sigma}[\Delta]$ согласно формуле:

$$\tilde{\sigma}[\Delta] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(C_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \right)^2}, \quad (11)$$

где n – количество отсчётов;

C_i – значение скорости звука в i -том отсчёте.

Дополнительные погрешности измерения ИСЗ, обусловленные воздействием влияющих факторов, оценивались отдельно для первичного и вторичного преобразователей.

Основная составляющая дополнительной погрешности измерения скорости звука, вносимая первичным преобразователем, обусловлена нестабильно-

стью длины измерительной базы при воздействии изменений температуры окружающей среды. Количественная оценка этой составляющей определялась при испытаниях разработанного в Морском гидрофизическом институте образцового средства измерения скорости звука МГИ 4603, конструкция первичного преобразователя которого аналогична конструкции преобразователя ПАП испытуемого ИСЗ. Результаты испытаний показывают, что составляющая дополнительной погрешности измерения ИСЗ, обусловленная воздействием изменений температуры окружающей среды на длину измерительной базы первичного преобразователя, определяется главным образом температурным расширением материала базы – ситалла СО115М ($\alpha \leq 1,5 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$) и может быть достаточно просто учтена путём введения соответствующей поправки.

Изменчивость характеристик ИСЗ во времени оценивалась путём сравнения характеристик преобразования ИСЗ, полученных при первичной аттестации, с характеристиками преобразования, полученными после эксплуатации измерителей в течение различных интервалов времени (от 1 месяца до 7 лет). На рисунке 2 для ИСЗ зав. № 006 приведены графики отклонений характеристики преобразования измерителя, полученной при поверках, от значений скорости звука, принимаемых в качестве образцовых.

Лабораторным испытаниям подвергались все опытные образцы ИСЗ. При этом были получены результаты, аналогичные приведенным выше.

Таким образом, в результате лабораторных испытаний установлено следующее:

– номинальная характеристика преобразования опытных образцов ИСЗ представляет собой полином первой степени;

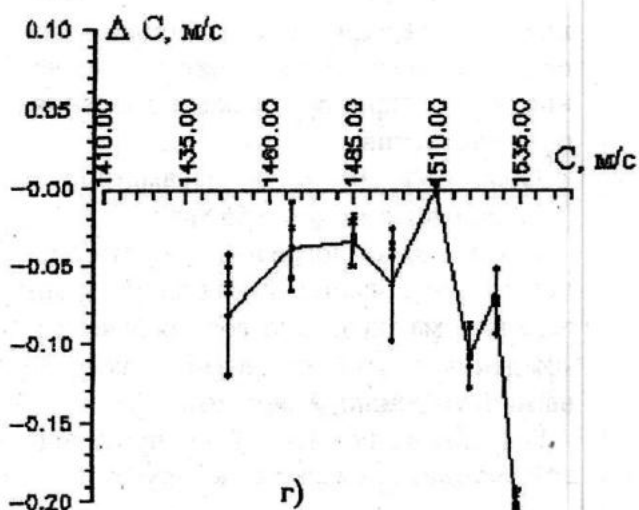
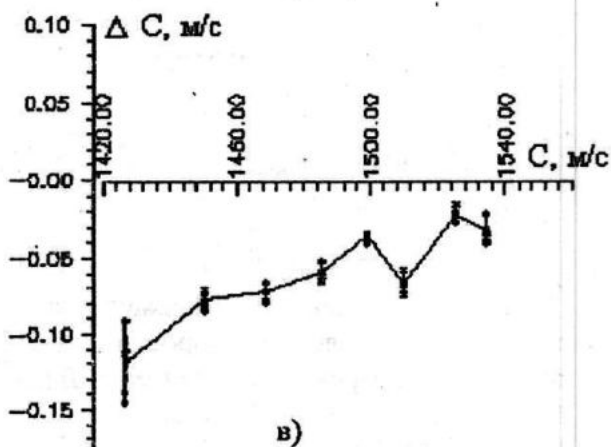
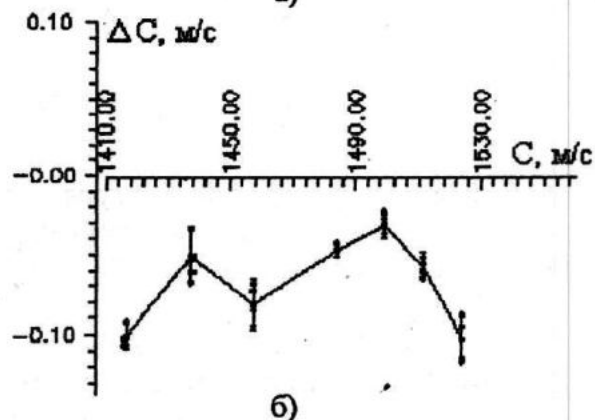
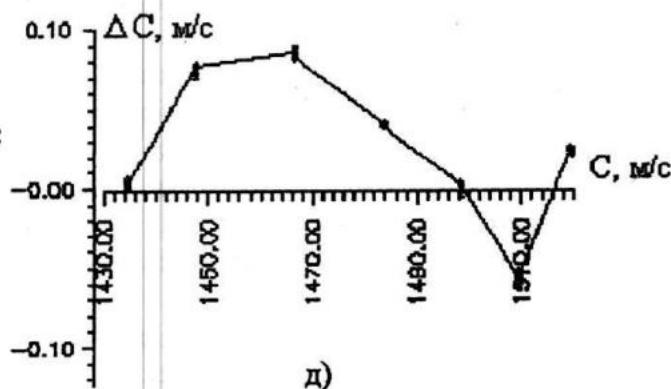
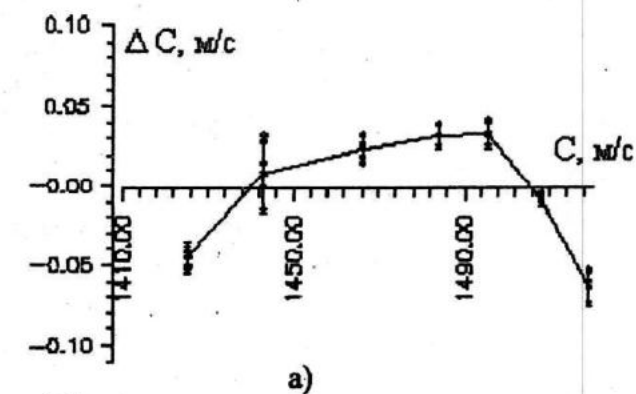


Рисунок 2. Результаты исследования изменчивости во времени характеристики преобразования ИСЗ №006:

а) 08.01.85г.; б) 24.01.86г.; в) 10.04.86г.; г) 08.12.86г.; д) 26.04.88г.

– оценка СКО систематической составляющей основной погрешности $\tilde{\Delta}_s \leq 0,05 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$;

– СКО случайной составляющей основной погрешности $\tilde{\sigma}[\Delta] \leq 0,01 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$;

– дополнительная погрешность, обусловленная воздействием влияющих факторов, не превышает $0,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$;

– цена единицы наименьшего разряда выходного кода $\mu\text{с} \leq 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$;

– оценка СКО систематической составляющей погрешности, обусловленной нестабильностью характеристики преобразования ИСЗ во времени, не превышает $0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ за три года.

Натурные испытания опытных образцов ИСЗ проводились с целью оценки работоспособности ИСЗ в рабочих условиях применения. Ввиду отсутствия стандартных требований к проведению таких испытаний была разработана методика, по которой оценивались следующие показатели:

– сопоставимость результатов прямых измерений скорости звука с помощью ИСЗ с результатами косвенных измерений;

– повторяемость характеристик различных экземпляров ИСЗ в рабочих условиях применения;

– вариация выходного информативного параметра ИСЗ в рабочих условиях применения.

Достоверность результатов прямых измерений скорости звука полученных с помощью опытных образцов ИСЗ оценивалась путём сравнения с результатами косвенных измерений, проводимых в соизмеримом пространственно-временном масштабе. Испытания проводились в составе гидрофизических зондирующих комплексов типа ОЛТ и ИСТОК-6, которые наряду с каналом измерения скорости звука содержат каналы измерения температуры, электропроводности (солёности) и давления. Результаты косвенного измерения скорости звука определялись по формуле Дель Гроссо для морской воды и формуле Фоффонова – Милларда. Погрешность такой методики испытаний включает в себя следующие составляющие:

– погрешности измерения температуры, солёности и давления;

– погрешность, обусловленную разными пространственно-временными масштабами осреднения измерительных каналов;

– погрешность формулы косвенного определения скорости звука;

– погрешность прямого измерения скорости звука.

Погрешности измерительных каналов комплексов ОЛТ и ИСТОК-6 оцениваются следующими значениями:

– погрешность канала измерения температуры $\Delta T \leq 0,03^\circ\text{C}$;

– погрешность канала измерения солёности $\Delta S \leq 0,05\text{‰}$;

– погрешность канала измерения давления $\Delta P \leq 0,03 \text{ МПа}$;

– погрешность канала измерения скорости звука $\Delta C \leq 0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

При расчёте необходимо также учитывать динамические погрешности, обусловленные в основном сдвигами во времени интервалов измерения температуры τ_T и скорости звука τ_C .

$$\Delta T_{\text{дин}} \leq \frac{\partial T}{\partial H} \cdot V_3 \cdot \tau_T, \quad (13)$$

$$\Delta C_{\text{дин}} \leq \frac{\partial C}{\partial H} \cdot V_3 \cdot \tau_C, \quad (14)$$

где $\frac{\partial T}{\partial H}, \frac{\partial C}{\partial H}$ – частные производные по глубине температуры и скорости звука, соответственно;

V_3 – скорость зондирования.

Для районов океана, в которых проводились испытания, $\frac{\partial T}{\partial H} \leq 0,8 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$;

$\frac{\partial C}{\partial H} \leq 3 \text{ с}^{-1}$. Учитывая, что для комплексов ОЛТ и ИСТОК-6 $\tau_T = 0,04 \text{ с}$;

$\tau_C = 0,0625 \text{ с}$, а скорость зондирования при испытаниях составляла приблизительно $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, из формул (13) и (14) получим:

$$\Delta T_{\text{дин}} \leq 0,016^\circ\text{C}; \quad \Delta C_{\text{дин}} \leq 0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}.$$

Погрешность методики сопоставления результатов прямых и косвенных измерений скорости звука в натуральных условиях определим по формуле:

$$\Delta C_M = \frac{\partial C}{\partial T} (\Delta T + \Delta T_{\text{дин}}) + \frac{\partial C}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial C}{\partial P} \Delta P + \Delta C + \Delta C_{\text{дин}} + \Delta_\Phi, \quad (15)$$

где Δ_Φ – погрешность формулы косвенного определения скорости звука, значение которой для формулы Дель Гроссо не превышает $0,06 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

$$\frac{\partial C}{\partial T}, \frac{\partial C}{\partial S}, \frac{\partial C}{\partial P} \text{ – частные производные, характеризующие зависимости скорости звука от температуры, солёности и гидростатического давления, соответственно;}$$

Подставив значения параметров в (15), получим: $\Delta C_M \leq 0,55 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Такая оценка погрешности методики испытаний является предельной и определяет максимально возможные расхождения между прямыми и косвенными измерениями скорости звука.

Результаты испытаний по приведенной методике показаны на рисунке 3.

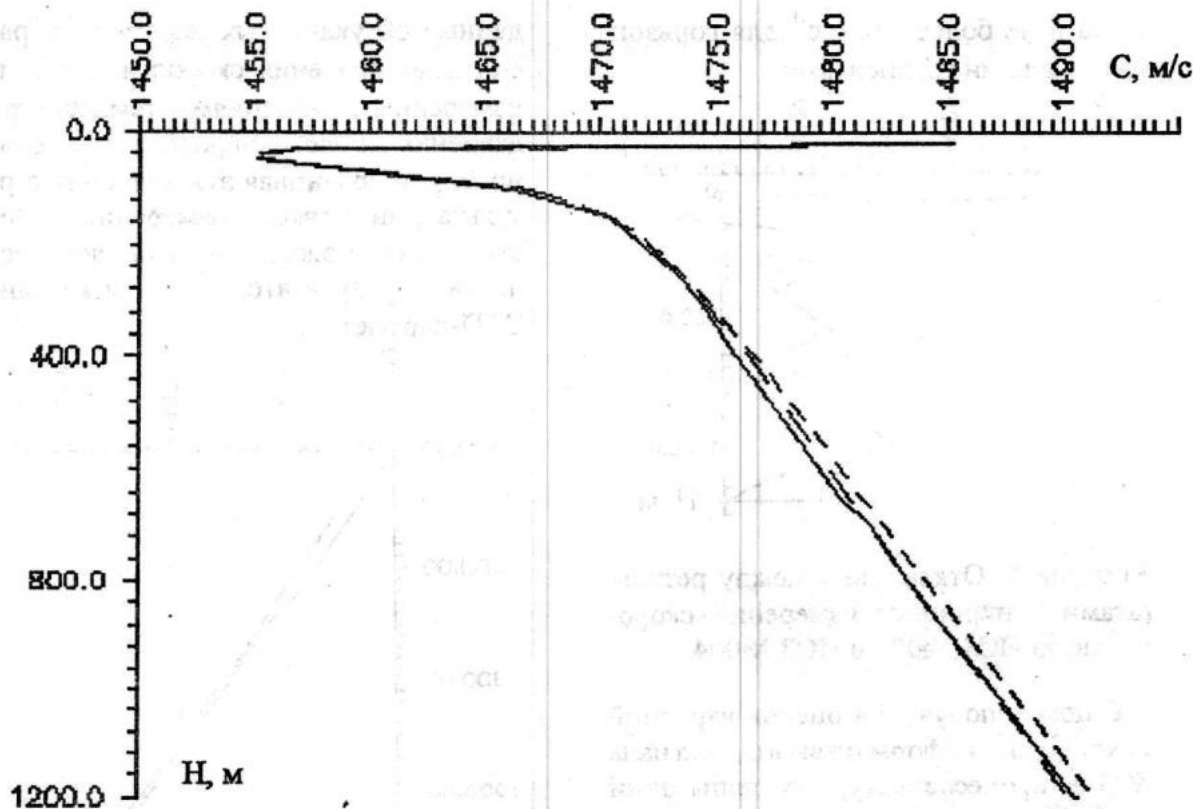


Рисунок 3. Результаты прямых и косвенных измерений скорости звука, полученные при зондировании гидрофизическим измерительным комплексом ИСТОК-6:
 — ИСЗ №004; - - - Дель Гроссо; - · - · - Фофонов - Миллард

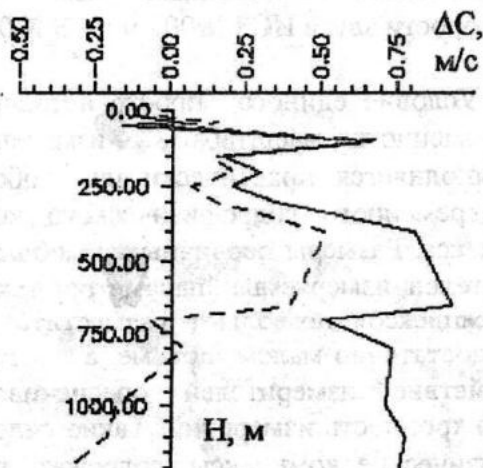


Рисунок 4. Отклонения результатов прямых измерений скорости звука (ИСЗ №004) от косвенных, рассчитанных по формулам Дель Гроссо (—) и Фофопова - Милларда (- - -)

По полученным данным были рассчитаны расхождения между результатами прямых и косвенных измерений

скорости звука. Из результатов расчёта, представленных в виде графика на рисунке 4, следует, что расхождения между прямо измеренными и рассчитанными значениями скорости звука с учётом погрешности метода не более $1,0 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при расчёте по формуле Дель Гроссо и не превышают погрешности метода при расчёте по формуле Фофопова-Милларда.

Исследование повторяемости характеристик опытных образцов ИСЗ проводилось путём одновременного зондирования двумя измерителями ИСЗ №003 и ИСЗ №004 в составе измерительного комплекса ИСТОК-6. Различия между показаниями измерителей, рассчитанные по результатам зондирования и приведенные на рисунке 5, не превышают $0,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ для слоя с максимальным градиентом скорости

звука и не более $0,05 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ для горизонтов с малыми градиентами.

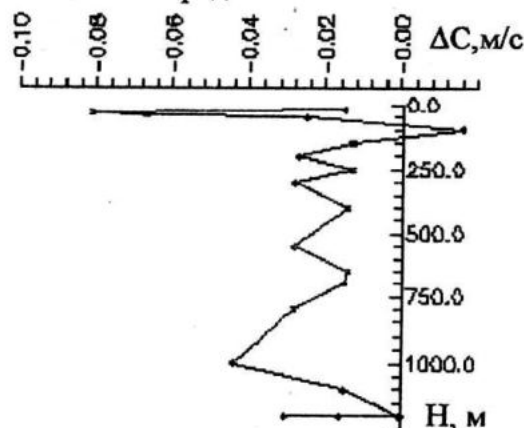


Рисунок 5. Отклонения между результатами синхронных измерений скорости звука ИСЗ №003 и ИСЗ №004

С целью получения оценок вариаций выходного информативного сигнала ИСЗ в процессе натуральных испытаний проводились измерения скорости звука при зондированиях «вниз» и «вверх». Для уменьшения погрешности, обусловленной пространственно-временной изменчивостью поля скорости звука, анализировались данные измерений, полученные на горизонтах с малыми градиентами. Такие условия испытаний, учитывая, что интервал времени между зондированиями «вниз» и «вверх» не превышал 15 мин., позволяют рассматривать поле скорости звука «замороженным» в пространственно-временном масштабе проводимого эксперимента. Результаты испытаний, приведенные на рисунке 6, показывают, что вариация измеренных значений скорости звука не более $0,3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Полученные результаты позволяют использовать ИСЗ с целью оперативного контроля работоспособности STD-измерителей. Поскольку, скорость звука функционально связана с температурой, давлением и электропроводностью (солёностью), то при наличии достоверной информации о скорости звука, получаемой путём прямых измерений в том же пространственно-временном масштабе, что и

данные об указанных параметрах, рассчитывая значения скорости звука по измеренным значениям температуры, давления и электропроводности (солёности) и сравнивая эти значения с результатами прямых измерений скорости звука можно оценить достоверность результатов измерений STD-параметров.

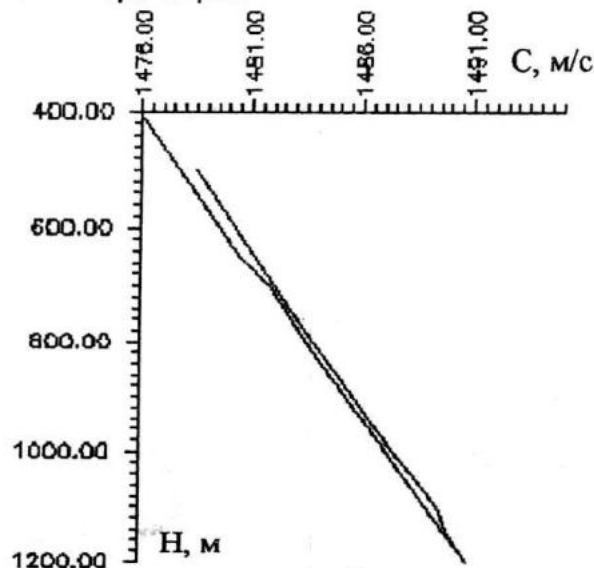


Рисунок 6. Отклонения между результатами синхронных измерений скорости звука ИСЗ №003 и ИСЗ №004

Условие единого пространственно-временного масштаба измерений выполняется практически для любого современного гидрофизического комплекса. Размеры первичных преобразователей измеряемых параметров таких комплексов позволяют разместить их в достаточно малом объёме, а быстроедействие измерителей обеспечивает синхронность измерений. Такие гидрофизические комплексы, содержат, как правило, бортовую ЭВМ, поэтому расчёт значений скорости звука по STD-параметрам в реальном масштабе времени выполняется достаточно просто. Кроме того использование процессора в составе комплекса позволяет реализовать автоматический контроль качества информации по установленным критериям. Алгоритм такого способа контроля приведен в [4]. Там же

оценивается погрешность контроля, величина которой, очевидно, не может быть менее рассчитанной по формуле (15), а в режимах зондирования в слоях со значительными градиентами параметров возрастает до $1.0 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ по скорости звука. Тем не менее, опыт эксплуатации гидрофизических измерительных комплексов, в которых был реализован такой способ контроля, показал, что такое использование ИСЗ позволило существенно повысить достоверность измерений гидрологических параметров.

Приведенные результаты испытаний позволяют сделать вывод о том, что опытные образцы разработанного в МГИ НАНУ гидроакустического измерителя скорости звука обладают высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками, существенно превышающими характеристики известных измерителей, основные параметры которых приведены, например, в [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане.—Л.: Гидрометеиздат, 1983.—200с.
2. А.с. 1374059 СССР, МКИ G 01 H 5/00. Способ градуировки измерителя скорости распространения ультразвука/А.С.Светличный, А.П.Толстошеев, В.В.Холкин (СССР).—Опубл. в Б.И. 1988. — №6.
3. Светличный А.С., Толстошеев А.П., Холкин В.В. Метрологическая аттестация гидрологических средств измерения скорости звука// Судостроительная промышленность.—1988.—Вып.6.—С.50—5.
4. А.с. 1467428 СССР, МКИ G 01 N 1/24. Термогалинозонд/ В.И.Забурдаев, Е.Г.Нечёсин, Н.Г.Тамахин, А.П.Толстошеев, В.В.Холкин (СССР).—Опубл. в Б.И. 1989.—№11.
5. Комляков В.А. Гидроакустические измерители скорости звука// Судостроение.—1994.—№11—12.—С.21—25.