

О МЕТРОЛОГИИ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЖИДКОСТИ

© 2017 г. **В. И. Бабий**

*Морской гидрофизический институт РАН
299011 Севастополь, ул. Капитанская 2
e-mail: marbab@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.04.2015 г.

Рассмотрена децентрализация эталонной базы при измерениях скорости звука в жидкостях путем выражения скорости звука в долях скорости распространения света в вакууме. Предложен метод учета дифракционных эффектов посредством выполнения измерений скорости звука в режиме постоянства длины звуковой волны и привязки абсолютных значений скорости звука к расчетным термодинамическим значениям, которые получены неакустическим методом в условиях, когда адиабатическая сжимаемость равна изотермической. Сделаны оценки погрешности воспроизведения единицы скорости звука в воде предложенным методом.

Ключевые слова: морская среда, скорость звука, скорость света в вакууме, измерение, погрешность, дифракция, эталон, децентрализация.

DOI: 10.7868/S0320791917030030

ВВЕДЕНИЕ

С античных времен метрология развивалась как учение о мерах. “Точная наука немыслима без меры” (Д.И. Менделеев). “Каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерять” (У. Кельвин). Эти высказывания актуальны и поныне. Метрология — это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности [1]. Проблема повышения качества и точности измерений никогда не теряет своей актуальности. Она существует постоянно. Точность является важнейшим показателем качества измерений и определяется преимущественно инструментальной погрешностью средств измерений. Поэтому вся история развития средств измерений есть борьба за повышение инструментальной точности. Цель любых измерений — уменьшение априорной неопределенности, т.е. уточнение значения измеряемой величины. Измерение — это универсальная познавательная процедура, осуществляемая на эмпирическом уровне научного исследования объектов материального мира. Практически все сведения о гидрофизических полях океана, их структуре и пространственно-временной изменчивости получены в результате натурных измерений. При этом безусловное предпочтение отдается прямым методам перед косвенными измерениями. Поле скорости звука — одно из важнейших гидрофизических полей океана, имеющее большое научное и прикладное значение. Скорость звука является связующим звеном гидрофизики и гидроакустики [2].

Это первичная акустическая характеристика морской среды, лежащая в основе решения прямых и обратных задач акустики океана, и один из немногих комплексных гидрофизических параметров, характеризующих ее термодинамическое состояние, который в перспективе можно измерять прямым методом с очень высокой точностью, достоверностью (валидностью) и высоким пространственно-временным разрешением [3–8].

Измерение — это основной познавательный процесс науки и техники. Любое измерение есть обращение причинно-следственных связей из настоящего в прошлое. Приведем одно из определений многогранного термина “измерение”, отражающее его суть. Измерение физической величины — это совокупность операций по применению технического средства, хранящего или воспроизводящего единицу этой физической величины (меру), обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей, получения значения этой величины с известной погрешностью (неопределенностью) в установленный срок и в форме, наиболее удобной для дальнейшего использования [1]. Терминологию и погрешности (неопределенности) средств измерений законодательно регламентируют официальные документы: рекомендации РМГ 29-2013 (дата введения 01.01.2015 г.), федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015 г.).

В метрологии принято различать два вида измерений: технические и метрологические. Техни-

ческим измерениям в океанологии соответствуют натурные измерения, т.е. определение гидрофизических характеристик морской среды в естественных условиях (*in situ*) посредством рабочих средств измерений (РСИ), а метрологическим — определение метрологических характеристик РСИ посредством эталонных средств измерений (ЭСИ), которые с высшей точностью воспроизводят, хранят и передают РСИ размер единицы физической величины, обеспечивая единство измерений. Привязка к эталонам (метрологическая прослеживаемость) — это непрерывная цепочка калибровок и сравнений (сличений) РСИ с ЭСИ. Причем метрологические измерения, как правило, выполняют в нормальных лабораторных условиях (*in vitro*) в статическом режиме в условиях локального термодинамического равновесия в ограниченном объеме образцов однородной градуировочной жидкости. В то же время технические измерения выполняют в натуральных условиях исключительно в динамическом режиме в неограниченной случайно-неоднородной морской среде под воздействием многочисленных внешних влияющих факторов. При метрологических измерениях, благодаря централизованной иерархической структуре средств измерений, отраженной в поверочных схемах, именно погрешности ЭСИ лимитируют точность РСИ. Погрешности (неопределенности) средств измерений в некотором диапазоне принято характеризовать с заданной вероятностью двумя основными показателями: неисключенной систематической погрешностью (НСП) и случайной средней квадратической погрешностью (СКП). Их отношение обычно составляет несколько единиц, а иногда и более.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Единство измерений и достижение требуемой точности определяется преимущественно состоянием эталонной базы [1]. Уровень эталонной базы — показатель уровня науки и производства страны. Вопрос о метрологическом обеспечении отечественных разработок и эксплуатации гидроакустических измерителей скорости звука (ГИСЗ) был всегда актуален и продолжает стоять на повестке дня. За рубежом среди семи важнейших проблем гидроакустики, сформулированных во второй половине прошлого века, проблема измерения скорости звука в океане была названа первой.

В настоящее время ФГУП ВНИИФТРИ разработан государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012. Его характеристики: воспроизведение единицы скорости ультразвука в жидких средах с НСП = ± 0.04 м/с и СКО = 0.005 м/с в диапазоне значений от 800 до 2000 м/с при температурах в диапазоне от -4 до 50°C , избыточных давлениях в диапазоне от 0 до 60 МПа. В этом первичном эталоне эффект

дифракции и изменение эффективной длины фиксированной акустической базы в зависимости от температуры и давления (дополнительную погрешность) и соответствующие поправки определяют расчетным путем [9, 10].

Сопоставимые погрешности имеют таблицы стандартных справочных данных ГСССД 190-2000, содержащие значения скорости звука в дистиллированной воде, и составленные на их основе таблицы и алгоритмы расчета скорости звука в морской воде ГСССД 202-02.

Была также разработана новая государственная поверочная схема для средств измерений скорости звука в жидких средах в диапазоне от 800 до 2000 м/с: ГОСТ Р 8.870-2014 ГСИ (дата введения 01.01.2016 г.). Она содержит первичный и вторичный эталоны, а также эталоны 1-го и 2-го разряда. Согласно этой поверочной схеме, высокоточные рабочие ГИСЗ при непосредственной передаче размера единицы скорости звука от *первичного* эталона могут иметь пределы погрешности результата измерений $\Delta = \pm 0.1$ м/с. При передаче размера единицы скорости звука рабочим ГИСЗ от *вторичного* эталона их абсолютная инструментальная погрешность не может быть меньше значений погрешности эталона 1-го разряда, т.е. $\Delta = \pm (0.25...0.5)$ м/с. В настоящее время такую инструментальную погрешность имеют современные корабельные ГИСЗ [4–8].

Однако с расширением круга решаемых задач наряду с развитием и совершенствованием гидроакустических аппаратурных комплексов и их программно-алгоритмического обеспечения все больше возрастает роль оперативного знания более тонких характеристик морской среды, в том числе и поля скорости звука. Подтверждением этому служит непрерывное совершенствование и улучшение метрологических характеристик зарубежных средств измерения скорости звука в воде.

Повышение точности рабочих ГИСЗ до уровня первичных эталонов необходимо также при решении гидрофизических задач, в частности при комплексном измерении параметров термодинамического состояния жидкостей, включая морскую среду.

Все это свидетельствует об актуальности и необходимости дальнейшего совершенствования эталонной базы измерения скорости звука, поиска новых путей повышения ее точности как основы развития гидроакустических средств измерения прямым методом скорости звука в жидкостях, в частности в морской среде [4, 11]. Эта перспективная эталонная база измерения скорости звука в жидкостях должна обеспечивать высокое качество и *единство измерений* при проведении как фундаментальных, так и прикладных исследований и работ.

ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ ЭСИ

Проблема повышения точности прямых измерений скорости звука C в воде (жидкостях) включает множество аспектов. Одна из сторон этой проблемы состоит в громадном различии нынешней точности измерений *производной* физической величины — скорости звука — и погрешности первичных эталонов *основных* физических величин — длины и времени, входящих в определение скорости звука. Среди всех средств измерений физических величин наивысшую точность имеет первичный эталон времени (частоты), основанный на стабильных внутриатомных процессах. В 1967 году было принято новое определение единицы времени — секунды: это интервал времени, равный 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [12]. Так, в РФ относительная НСП воспроизведения единицы времени и частоты государственным первичным эталоном ГЭТ 1-2012 не превышает значения 5×10^{-16} и СКП $\leq 5 \times 10^{-15}$ в диапазоне интервалов времени от 1×10^{-9} до 1×10^8 с и частот от 1 Гц до 5×10^{14} Гц, что соответствует мировому уровню точности в данном виде измерений.

Согласно принятому в 1983 году на 17-й Генеральной конференции по мерам и весам международному соглашению о постоянстве скорости света в вакууме ($C_{\text{св}} = 299792458$ м/с *точно*), было установлено новое определение метра как единицы длины, равной пути, проходимому светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды. При этом возникает парадокс: в системе единиц физических величин СИ *основная* единица длины — метр — выражается через *производную* единицу — скорость, которая в свою очередь образована двумя основными единицами — метром и секундой. Как видим, новый метр опирается на эталон времени (секунду) и фундаментальную физическую константу — скорость света в вакууме. В результате этого стало возможным создание *единого* первичного эталона времени, частоты и длины (пространства—времени), где погрешность первичного эталона длины приближается к погрешности эталона частоты. Так, государственный первичный эталон единицы длины (метра) РФ ГЭТ 2-2010 имеет следующие метрологические характеристики относительной погрешности: НСП = 2.2×10^{-12} , СКП = 5.6×10^{-12} . Эталон обеспечивает с указанной погрешностью в диапазоне 1×10^{-3} —1.0 м передачу размера единицы длины от “волнового” метра к его материальным носителям (концевым мерам, измерителям линейных перемещений и т.п.), т.е. вещественным мерам длины. Следовательно, имеется принципиальная возможность непосредственной передачи с соизмеримыми погрешностями размера основных физических вели-

чин — времени и длины — первичному эталону скорости звука. Такая непосредственная передача размера единицы длины осуществляется, например, в ГИСЗ с переменной акустической базой и лазерным измерителем перемещений [6, 13]. Для современного уровня точности первичных эталонов длины и времени предел относительной погрешности воспроизведения *производной* единицы — скорости звука — согласно размерности ограничивается преимущественно эталоном длины и составляет $\sim 10^{-12}$. Однако в этих установках сохраняется основной недостаток — переменная дифракционная погрешность, зависящая от измеряемой физической величины — скорости звука.

Природа физической величины определяет способ ее воспроизведения. Поскольку скорость света в вакууме принята универсальной мировой физической константой, то вполне естественно положить ее как меру размера *единицы скорости*, определив 1 м/с как $1/299792458$ долю скорости света в вакууме (*точно*) [4]. И тогда можно, в частности, выражать скорость распространения звука C в единицах скорости распространения света в вакууме, согласно общему уравнению измерений: $C = nC_{\text{св}}$, где n — безразмерное число единиц. Например, при $C = 1500$ м/с получим порядок числа $n = C/C_{\text{св}} \approx 5 \times 10^{-6}$.

Принято различать *единицы* физических величин и *шкалы* физических величин. Линейная шкала физической величины — скорости — имеет две реперные точки: ноль и скорость света в вакууме, где $0 \leq n \leq 1$. Аналогичное построение имеет современная международная температурная шкала МТШ-90: абсолютный ноль температуры и основная реперная точка — температура тройной точки воды (ТТВ), 273.16 К *точно*, а единица температуры — градус Кельвина (или Цельсия) есть $1/273.16$ доля термодинамической температуры ТТВ. Обе шкалы линейны и начало шкал есть ноль. При этом шкала скорости имеет верхний предел — скорость света в вакууме, а шкала температур (исходя из скорости света в вакууме) имеет верхний предел $\sim 10^{12}$ К.

С другой стороны, воспроизведение единиц времени, температуры и скорости фактически сводится к использованию принятого в метрологии понятия так называемых *стандартных образцов*, исполняющих роль *мер* физических величин [1]. Действительно, полноценными носителями единиц этих физических величин, по сути, являются реальные материальные объекты: атомы цезия, электромагнитное поле в физическом вакууме, сверхчистая дистиллированная вода заданного изотопного состава. Их индивидуальные стабильные физические свойства на внутриатомном и молекулярном уровнях используют для воспроизведения, хранения и передачи единиц указанных физических величин: времени, длины, скорости и

температуры, выделив и воплотив их в соответствующих средствах измерений. Такой подход приложим к первичному эталону времени—частоты, электромагнитному излучению в техническом вакууме, к воде в сосуде, где воспроизводится температура ТТВ, и другим мерам.

Изложенное выше полностью относится и к измерению скорости распространения в веществе различного рода излучений по отношению к легко воспроизводимой идеальной естественной мере скорости, не имеющей неоднородностей, поглощения и частотной дисперсии — скорости света в вакууме, где нет зависимости от температуры и давления, действующих на сосуд с вакуумом. Основные требования к эталонам: воспроизводимость, неизменность, сличаемость, неуничтожимость (сохраняемость), стабильность, простота и надежность, физическая реализуемость единицы величины в соответствии с ее определением. Всем этим требованиям отвечает идеальный эталон скорости — скорость света в вакууме.

При измерении скорости света (показателя преломления) в жидкостях и газах возможна прямая передача “волнового” размера единицы скорости (1 м/с) минуя материальные носители, например, интерференционным методом [13]. Это означает переход на качественно новый уровень — децентрализацию эталонной базы для обеспечения единства измерений скорости [14]. При этом можно априорно гарантировать заданную точность и достоверность воспроизведения единицы скорости путем дифференциальных измерений скорости распространения излучения в исследуемой среде и скорости света в вакууме, в том числе при синхронных измерениях скорости звука и скорости света в жидкостях, например, в морской среде [13, 15]. Если принять это предложение как альтернативу существующим эталонам, то с метрологической точки зрения нет принципиальных препятствий для совершенствования гидроакустических измерителей скорости звука в жидкостях и полной децентрализации их эталонной базы, так как в любом месте довольно просто создать технический вакуум в локальном объеме и когерентный луч света в нем. Такой естественный неуничтожимый “вечный” эталон не подвержен физическому старению, деградации, влиянию внешних условий, географическому местонахождению, в том числе и в космосе.

Поскольку скорость звука является производной физической единицей, образованной из двух основных единиц международной системы СИ — метра и секунды, то на практике все рабочие ГИСЗ обязательно содержат встроенные меры длины и времени (частоты). Роль этих встроенных мер обычно выполняют измерительная акустическая база (концевая мера) датчика скорости звука или лазерный измеритель длины, и

кварцевый генератор или, например, рубидиевый стандарт частоты [4–8]. Посредством таких встроенных мер каждый ГИСЗ хранит и воспроизводит с той или иной точностью единицу скорости звука и шкалу C .

Из сравнения погрешностей современных как отечественных, так и зарубежных ГИСЗ, относительная результирующая погрешность которых в настоящее время не лучше, чем $\sim 10^{-5}$ – 10^{-4} , с приведенными выше погрешностями первичных эталонов длины и времени следует, что существует колоссальный неиспользованный потенциальный резерв точности — более *шести порядков* для совершенствования перспективных средств измерения скорости звука в воде. В этой огромной несопоставимости погрешностей основных и производных единиц заключается одна из сторон проблемы точных измерений скорости звука в жидкостях и газах.

Магистральный путь ее решения состоит в выявлении метрологически “слабых” звеньев измерительной цепи, в частности, формировании в некоторой области жидкой среды квазиплоского звукового поля и корректном учете дифракционных и краевых эффектов, а также эффектов при отражении звука, взаимодействия датчика и зондирующего акустического излучения со средой, включая диссипативные и нелинейные эффекты, взаимодействия звукового поля с учетом скорости потока и шумов обтекания [16–23]. Поэтому при кажущейся простоте исходных фундаментальных соотношений $C = l/\tau$ и $C = \lambda f$, где l — путь, τ — интервал времени, λ — длина звуковой волны, f — частота звука, корректная их реализация при измерениях на практике связана с преодолением значительных трудностей. Увеличение точности измерений скорости звука в морской среде прямым методом вызывает еще и повышение требований к адекватности математических моделей реальным средствам измерений. Важно, чтобы функция преобразования правильно отражала все эффекты, возникающие при измерении, которые существенны для получения результата с заданной точностью (погрешностью или неопределенностью). Это неизбежно приводит к усложнению математических моделей ГИСЗ и увеличению в них числа параметров, которые подлежат экспериментальной оценке [3–5, 24].

ЭФФЕКТ ДИФРАКЦИИ

Анализ систематических погрешностей и результатов испытаний показал, что общепринятые математические модели [6–8] не адекватны существующим 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 наи-

более трудно устранимой систематической составляющей результирующей погрешности. Слабо контролируемое явление дифракции звука заключается в отличии неоднородной структуры реального звукового поля от поля идеальной плоской волны. Этот вид погрешности стараются принимать во внимание в эталонах и установках высшей точности, воспроизводящих единицу скорости звука в воде [10, 16–20]. Однако в рабочих средствах измерений дифракционными погрешностями обычно пренебрегают. Так, в импульсно-циклических ГИСЗ это приводит к необходимости формально вводить в модель отрицательное время задержки Δt , что физически неосуществимо. Эффект дифракции в ГИСЗ может быть причиной расхождения между многочисленными эмпирическими формулами скорости звука разных авторов, особенно при больших давлениях, результатами измерений C прямыми и косвенными методами, а также причиной несоответствия результатов калибровок ГИСЗ по дистиллированной и стандартной морской воде и по другим жидкостям. Поэтому учет дифракционных эффектов в прецизионных ГИСЗ является вопросом первостепенной важности. Следовательно, математическая модель ГИСЗ обязательно должна содержать поправку на дифракцию. Абсолютная дифракционная погрешность ΔC_n обусловлена отличием реальной звуковой волны от плоской из-за конечных размеров датчика 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 [7]. 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. Для обозримых практических оценок воспользуемся известной простой приближенной формулой относительной дифракционной погрешности [4, 24, 25]:

$$D(C) = \Delta C_n(C)/C = 0.0317(\lambda/r)^2, \quad (1)$$

где $\lambda = C/f_c$ — длина звуковой волны в жидкой среде, f_c — частота звука, r — эффективный радиус ультразвукового преобразователя.

Представим (1) в виде $\Delta C_n(C) = dC^3$, где $d = 0.0317(f_c r)^{-2}$ — индивидуальный дифракционный параметр ГИСЗ, определяемый экспериментально. Принимая во внимание хорошо выполняющиеся на практике неравенства: $\Delta t \ll \tau$, $\Delta C_n \ll C$, полагая задержку $\Delta t = \text{const}$, $d = \text{const}$ при $f_c = \text{const}$ и пренебрегая всеми другими, кроме температуры T и давления P , влияющими фактора-

ми, можно записать измерительное уравнение ГИСЗ в приближенном виде [4]:

$$C_n(T, P, \tau) \approx l_0[1 + a(T - T_0) + b(P - P_0)] \times \\ \times [1/\tau + \Delta t/\tau^2 - dl_0^2/\tau^3]. \quad (2)$$

Полином в первых квадратных скобках (мультипликативная составляющая) есть линейаризованная функция влияния двух основных внешних влияющих факторов: температуры T и гидростатического давления P , где a — температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) базы, b — барический коэффициент сжатия базы. В формуле (2) путь $l = 2mL(T, P)$, где m — число используемых переотражений звука на базе L , $L_0 = L(T_0, P_0)$ — номинальная длина измерительной базы при нормальных условиях; τ — измеряемый интервал времени распространения зондирующего сигнала на пути l . Такое разделение переменных позволяет вводить поправки на T и P в других звеньях измерительной цепи, например, в STD-зондах, оснащенных каналом измерения скорости звука [4, 5].

Функциональный ряд другой переменной во вторых квадратных скобках выражения (2) есть разложение по степеням $(1/\tau)$. Физический смысл этих слагаемых прост: первое слагаемое характеризует измеряемую величину C , второе слагаемое (квадратичный член) — поправку на временную задержку Δt , а кубический член — дифракционную поправку $\Delta C_n(C)$. Из-за относительно большой величины Δt в импульсно-циклических ГИСЗ в выражении (2) преобладает квадратичный член над кубическим, а для время-пролетных ГИСЗ — наоборот, кубический член преобладает над квадратичным из-за относительной малости Δt [4]. Поскольку квадратичный и кубический члены входят в выражение (2) с разными знаками, то они частично компенсируют друг друга, сохраняя нелинейность характеристики преобразования. Однако нестабильность Δt и d приводит (помимо нестабильности эффективной длины базы L) к появлению дрейфовой составляющей результирующей погрешности ΔC .

Из выражения (2) следует, что формальное разложение в ряд по степеням выше третьей улучшения не принесет. Этот вывод подтверждается экспериментально, например, в [4, 5, 24]. Отметим еще одну особенность разложения (2) по степеням $(1/\tau)$ — отсутствие свободного члена. Если квадратичный и кубический члены достаточно малы, то для термобаростабилизированной базы, т.е. инвариантной к T и P , уравнение (2) в пределе переходит в уравнение идеального ГИСЗ: $C_n = 2mL_0/\tau = C$, где $2mL_0 = C\tau = \text{const}$ — инвариант.

Формула (2) — это приближенное измерительное уравнение для реальных время-пролетных и импульсно-циклических гидрофизических ГИСЗ,

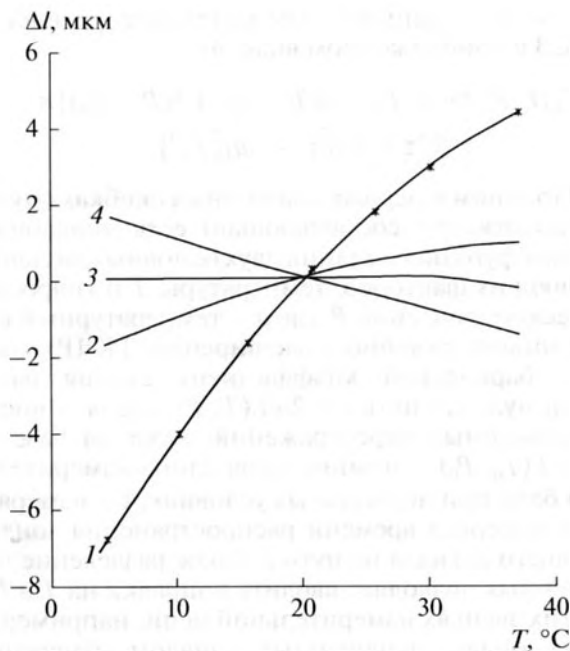


Рис. 1. Зависимость приращения эффективной длины пути Δl от температуры при разных значениях дифракционного параметра: 1 — $d = 0$; 2 — $d = 1.5 \times 10^{-10} \text{ (с/м)}^2$; 3 — $d = 2.0 \times 10^{-10} \text{ (с/м)}^2$; 4 — $d = 2.5 \times 10^{-10} \text{ (с/м)}^2$.

которое содержит всего пять постоянных параметров: a , b , d , Δt , l_0 и учитывает изменение длины базы L от T и P , эффект дифракции и влияние задержки Δt . Оно позволяет избежать процедуры итерации при введении дифракционных поправок и обеспечивает с относительной погрешностью менее 10^{-6} близость восстановленных значений C_v к действительным значениям C . Это значит, что, используя предложенную математическую модель (2) и выполнив градуировку ГИСЗ по дистиллированной воде, можно в заданном диапазоне C корректно проводить абсолютные измерения скорости звука с гарантированной точностью и в других жидкостях, в частности в морской среде.

Рассмотрим пример повышения точности время-пролетного прецизионного ГИСЗ типа МГИ 4603 [4] за счет введения поправок на дифракцию. Особенность этого измерителя состоит в практически полном исключении влияния на систематическую погрешность измерения C временных задержек сигнала Δt в едином приемном тракте. Применение материала ситалл марки СО-115М (ТКЛР $a \leq 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) в конструкции акустической базы датчика делает пренебрежимо малой дополнительную температурную погрешность. Поэтому при $P = P_0 = 101325 \text{ Па}$ в выражении (2) остается только слагаемое с дифракционной поправкой.

На рис. 1 для наглядности в терминах приращения эффективной длины акустической базы $\Delta l = l - l_0$, где $l = Ct$, $l_0 = 0.13 \text{ м}$ при $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $P = P_0$, звездочками (график 1) показаны результаты градуировки ГИСЗ в чистой дистиллированной воде по старой методике МИ 904-85 ГСИ, т.е. без учета эффекта дифракции.

Условием полной компенсации дифракционной погрешности является нахождение такого оптимального значения параметра d в (2), при котором $\Delta l = 0$ в заданном диапазоне C , T , P . Как видно, для графика 3 в диапазоне температур T от 4 до 30°C выполняется соотношение $l \approx l_0 = \text{const}$ с относительной погрешностью менее 10^{-6} . Здесь относительная погрешность $|\Delta C/C| \approx |\Delta l/l_0|$, где отклонению $\Delta l = 1 \text{ мкм}$ приблизительно соответствует погрешность $\Delta C \approx 1 \text{ см/с}$. Из-за погрешностей определения экспериментальных значений $l = Ct$, погрешностей аппроксимаций, приближенности модели дифракции и воздействия неучитываемых (латентных) влияющих факторов в действительности выполняется неравенство $|\Delta l/l_0| \leq \epsilon_l$, где ϵ_l — погрешность, получаемая в результате минимизации приращения $|\Delta l|$ при решении вариационной задачи. Это один из способов экспериментального нахождения оптимального значения дифракционного параметра d .

Графики 1–4 рис. 1 соответствуют разным значениям параметра d , указанным в подписи к рисунку. График 3 отвечает практически полной компенсации дифракционной погрешности в диапазоне C от 1420 до 1520 м/с, характерном для вод Черного моря. Как видно, в этом диапазоне относительная систематическая погрешность ГИСЗ, обусловленная дифракцией, уменьшилась от значения $\sim 10^{-4}$ до $\sim 10^{-6}$, т.е. на два порядка!

Из приведенного примера следует, что дифракционная погрешность существенна, и ее надо учитывать при прецизионных измерениях C , а модель дифракции (1) и измерительное уравнение (2) адекватны время-пролетным ГИСЗ.

Рассмотренная математическая модель (2), включающая эффект дифракции, позволила выявить специфический источник систематической погрешности и, с одной стороны, реализовать потенциальные возможности уже существующих ГИСЗ, повысив точность и достоверность результатов измерений алгоритмическим методом, а с другой стороны, по-новому подойти к разработке и проектированию перспективных гидроакустических измерителей скорости звука, их программному обеспечению и нормированию метрологических характеристик.

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

$\Delta C_{\Pi}(C) = C_{\Pi} - C$, где C_{Π} — исправленный результат измерения без поправки на дифракцию; C — истинная (действительная) скорость звука в среде. Сложность оценки $\Delta C_{\Pi}(C)$ состоит в том, что она зависит от неизвестной (искомой) переменной C .

Относительная дифракционная погрешность есть $D(C) = \Delta C_{\Pi}(C)/C$. Поскольку $\Delta C_{\Pi}(C) \ll C$, то $D(C) \ll 1$. Радикальный путь достижения инвариантности $D(C)$ состоит в выполнении условия $\lambda = \text{const}$ во всей области изменения C . При постоянной длине звуковой волны в среде и при постоянных геометрических размерах датчика его волновые размеры будут неизменны (это способ “разрубить гордиев узел”). Тогда 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, например, 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 [4, 17]. Поэтому восстановленные значения скорости звука C_{Π} определяются выражениями

$$\begin{aligned} C_{\Pi} &= C_{\Pi} - \Delta C_{\Pi}(C) = \\ &= C_{\Pi} - DC \approx C_{\Pi} - D_1 C_{\Pi} = \\ &= (1 - D_1) C_{\Pi} = D_2 C_{\Pi} = D_2 \lambda f_c, \end{aligned} \quad (3)$$

где $D_1 = D^1 - D^2 + D^3 - D^4 + \dots$; $D_2 = 1 - D_1 = D^0 - D^1 + D^2 - D^3 + D^4 - \dots$; $C_{\Pi} = \lambda f_c$; $\Delta C_{\Pi}(C) = D_1 C_{\Pi}$.

Простая формула (3) реализует метод последовательных приближений знакопеременным степенным рядом и позволяет для каждого конкретного ГИСЗ выразить $\Delta C_{\Pi}(C)$ с заданным приближением через D и измеренную скорость звука C_{Π} вместо неизвестной истинной C . Следовательно, возможно введение либо переменной аддитивной дифракционной поправки $D_1 C_{\Pi}$, зависящей от C_{Π} , либо адекватной постоянной мультипликативной поправки — коэффициента D_2 . Сравнивая выражение (3) с выражением (2), видим, что поправочные коэффициенты D_1 и D_2 аналогичны поправочным коэффициентам на длину акустической базы, что позволяет определять дифракционную поправку по приращению эффективной длины пути l (см. рис. 1). Из выражения (3) следует, что для данного режима ГИСЗ произведение $D_2 \lambda = \text{const}$ — инвариант, поэтому, как в идеальном измерителе, получим $C_{\Pi} = D_2 \lambda f_c$ прямо пропорциональным частоте f_c . Здесь λ может быть выражена в длинах световых волн, а частота f_c измерена с наивысшей точностью, т.е. на уровне первичных эталонов. Поэтому предел повышению точности абсолютных измерений скорости звука в режиме $\lambda = \text{const}$ ставит дифракционный параметр D .

МЕТОД ОЦЕНКИ ДИФРАКЦИОННОГО ПАРАМЕТРА

При измерениях C в режиме $\lambda = \text{const}$ задача учета дифракции состоит в оценке параметра D и введении поправок на дифракцию согласно (3). На практике оценку D можно получить, измеряя C_{Π} в дистиллированной воде как образцовой жидкости в реперной точке T_m, P_0 , где $(\partial \rho / \partial T) = 0$ и адиабатическая скорость звука $C_{\text{ад}}$ равна изотермической скорости звука C_m , которая рассчитывается по плотности ρ_m и изотермической сжимаемости $\beta_{\text{изо}}$, например, из таблиц ГСССД. В настоящее время C_m определена независимо *неакустическим* способом в реперной точке T_m, P_0 с относительной погрешностью менее 10^{-6} [3, 4, 26]. В реперной точке $T_m = 3.98152^\circ\text{C}$ по МТШ-90 плотность дистиллированной воды максимальна: $\rho_m(T_m, P_0) = 999.97562 \text{ кг/м}^3$, а изотермическая сжимаемость $\beta_{\text{изо}}(T_m, P_0) = 4.94873 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, что дает оценку значения изотермической скорости звука $C_m = C_{\text{изо}}(T_m, P_0) = (\rho_m \beta_{\text{изо}})^{-0.5} = 1421.5378 \text{ м/с}$. Далее находим в реперной точке абсолютную дифракционную погрешность $\Delta C_{\Pi}(C_m) = C_{\Pi}(T_m, P_0) - C_m$, а затем и относительную погрешность $D(C_m) = \Delta C_{\Pi}(C_m)/C_m$, по которой, согласно (3), с заданным приближением вычисляем D_1 или D_2 и проводим измерения C_{Π} , вводя поправку на дифракцию по формуле (3). Результирующая погрешность измерений будет $\Delta C(C) = C_{\Pi} - C$. В реперной точке имеем $C_{\text{ад}} = C_m$ и $\Delta C(C) = 0$ (с неопределенностью знания C_m). По мере уточнения значения C_m и соответственно $D(C_m)$ возможна, согласно (3), простая последующая коррекция полученных ранее результатов абсолютных измерений скорости звука.

Используя зависимость $C_m = C(T_m, P)$, можно повышением давления до $P \approx 1.84 \times 10^7 \text{ Па}$ понизить температуру T_m , например, до температуры ТТВ. При этом, с одной стороны, происходит уменьшение C_m от снижения T_m , а с другой стороны, — увеличение C_m при повышении давления P . Качественную картину и диапазон изменчивости этих параметров от давления P иллюстрирует рис. 2, где график 1 соответствует зависимости $T_m(P)$, а график 2 — зависимости $C_m(P)$, согласно условию равенства адиабатической и изотермической скоростей звука в дистиллированной воде вплоть до температуры замерзания. Следовательно, путем изменения P можно оценить постоянство параметра $D(C_m)$ и уточнить его значение в некотором диапазоне изменения C_m и T_m . Такие условия выполняются в природе, в частности, на глубинах в озере Байкал [27].

С целью обеспечения единства измерений скорости звука в жидкостях имеет смысл, подоб-

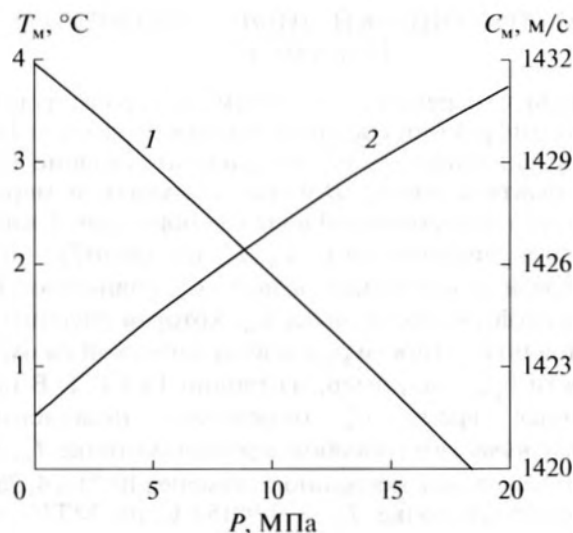


Рис. 2. Зависимость параметров T_m (график 1) и C_m (график 2) от гидростатического давления P .

но температурной шкале, “узаконить” некоторые реперные точки шкалы скорости звука в дистиллированной воде (как образцовом веществе) с указанием погрешностей при нормальном атмосферном давлении для определенных частот звука. Эти точки могут соответствовать как особенностям физических свойств воды, так и реперным точкам температурной шкалы, например, термодинамическим температурам: ТТВ – 0.01°C , тройной точке галлия – 29.774°C , тройным точкам, реализуемым на основе чистых органических веществ: $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}$ – 26.866°C , $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$ – 34.494°C , $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$ – 36.324°C и др. Помимо этих температурных реперов отметим упомянутую выше точку максимальной плотности воды T_m , а также точки минимальной сжимаемости и максимума температурной зависимости скорости звука. В точке максимальной плотности воды температурные флуктуации скорости звука обусловлены флуктуациями сжимаемости, в точке минимума температурной зависимости сжимаемости – флуктуациями плотности. В точке максимума скорости звука, где производная по температуре равна нулю, температурные флуктуации плотности компенсируются флуктуациями сжимаемости [3]. Это позволяет воспроизвести реперные точки шкалы скорости звука неакустическим методом, используя стандартные образцы чистой воды в качестве меры C .

На рис. 3 приведены результаты расчета дифракционных погрешностей ГИСЗ МГИ 4603 [4] для приближенной модели дифракции вида (1). Графики 1, 2 построены для $\lambda/r = 0.1$, а графики 3, 4 – для $\lambda/r = 0.125$. Как видно на рис. 3, при $\lambda = \text{const}$ относительная дифракционная погрешность D (график 1), определенная в реперной точ-

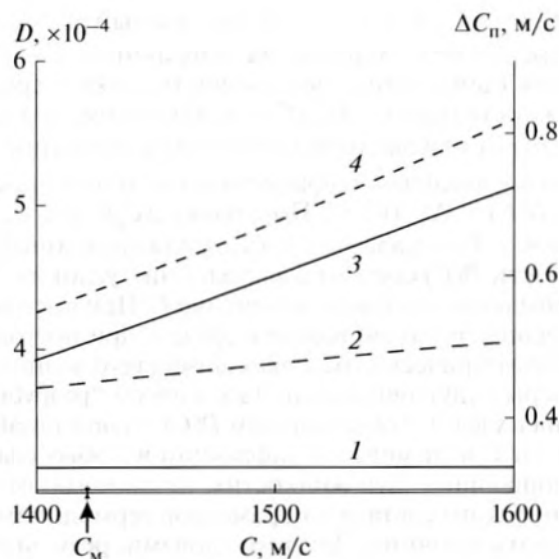


Рис. 3. Зависимости от скорости звука C относительных (D – сплошные линии) и абсолютных (ΔC_n – штриховые линии) дифракционных погрешностей для разных режимов измерений: 1, 2 – при $\lambda = \text{const}$; 3, 4 – при $f_c = \text{const}$.

ке $C_m(T_m, P_0)$, 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 традиционных измерителях, где $f_c = \text{const}$, относительная дифракционная погрешность (график 3) зависит от C квадратично, а абсолютная дифракционная погрешность (график 4) – кубично [4, 17, 24]. На графике 4 видно, что при $f_c = \text{const}$ дифракционная погрешность ΔC_n изменяется приблизительно на 0.25 м/с во всем диапазоне изменения C . Эту расчетную оценку экспериментально подтверждает график 1 на рис. 1.

Режим $\lambda = \text{const}$ реализуется различными способами – например, методом автогенерации [28] или программно-алгоритмически, посредством изменения частоты возбуждения широкополосного ультразвукового преобразователя согласно выражению $f_c = C_n / \lambda$, где C_n – прямо измеряемая скорость звука без поправки на дифракцию. 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 в ГИСЗ.

СРАВНЕНИЕ НСП

Поскольку теоретический вывод уравнений состояния пресной и морской воды отсутствует,

эти функциональные зависимости получают экспериментально и постоянно уточняют. Примером является новое международное термодинамическое уравнение состояния морской воды TEOS-10 (UNESCO) [29]. Соответственно, и процесс уточнения эмпирических формул скорости звука в воде происходит непрерывно по мере роста требований практики и развития измерительной техники. Эти формальные выражения содержат более полусотни членов разложения с коэффициентами до 15 десятичных знаков, что, однако, характеризует только точность приближения аналитических аппроксимаций к исходным данным, которые определены экспериментально, т.е. с погрешностями.

Для иллюстрации неопределенности результатов расчета абсолютных значений скорости звука по некоторым эмпирическим формулам, рассмотрим рис. 4, на котором показан разброс полиномиальных аппроксимаций экспериментальных данных прецизионных измерений прямым методом адиабатической скорости звука в дистиллированной воде, полученных *in vitro* разными исследователями относительно данных Дель-Гроссо и Мадера (1972), принятых здесь в качестве опорных ($\Delta C = 0$). Усредненная по приведенным данным зависимость (график 6) имеет практически постоянное систематическое смещение ~ 0.2 см/с относительно опорной зависимости, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости C в окрестности T_m (вертикальная штриховая линия). Начальная скорость звука $C_0 = 1402.385$ м/с при $T = 0^\circ\text{C}$ (график 6) усредненной зависимости совпадает с ее величиной в формуле Келла (1970), а начальные значения данных ГСССД 190-2000 совпадают с данными Дель-Гроссо и Мадера (1972). Наименьший разброс данных ~ 1 см/с наблюдается в диапазоне $T = 1...2^\circ\text{C}$, что можно объяснить его близостью к реперной точке ТТВ температурной шкалы [3]. В точке T_m размах ΔC составляет ~ 2 см/с. Несмотря на большие значения (dC/dT) , в области низких температур данные разных авторов хорошо согласуются между собой, и абсолютные значения скорости звука имеют высокую достоверность, что важно для оценки дифракционной поправки рассмотренным выше методом. С повышением температуры и давления, а следовательно, и скорости звука, разброс данных резко увеличивается (более 0.5 м/с), превышая доверительные интервалы, гарантируемые авторами каждой формулы. Заметим, что графики рис. 4 характеризуют различие результатов расчета C по разным эмпирическим формулам, а не их отличие от действительных (истинных) абсолютных значений скорости звука. Из приведенного примера следует, что относительная НСП воспроизведения единицы скорости звука в дистиллированной воде в области низких темпера-

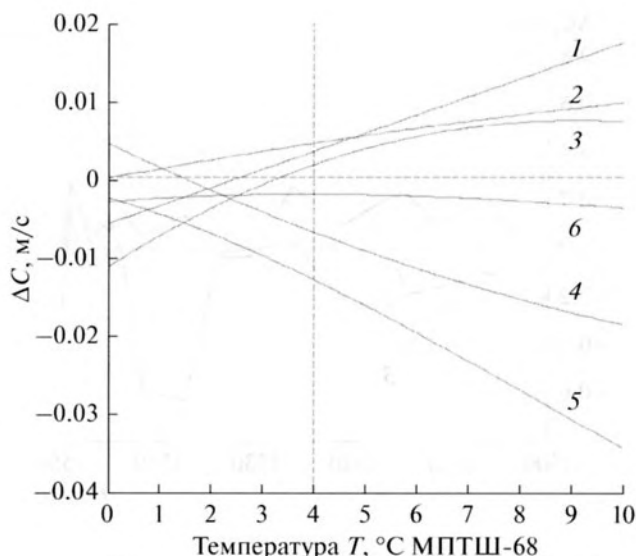


Рис. 4. Аномалии скорости звука при $P = P_0$ относительно данных Дель-Гроссо и Мадера (1972) — горизонтальная штриховая линия; 1 — Кроэбел и Март (1976); 2 — ГСССД 190 — 2000; 3 — Карнвалл и др. (1968); 4 — Дель-Гроссо (1970); 5 — Келл (1970); 6 — усредненные данные.

тур при нормальном давлении P_0 в настоящее время не лучше $\sim 10^{-5}$. Для сравнения: относительная НСП первичного государственного эталона РФ составляет $(2...5) \times 10^{-5}$ в диапазонах C , T , P .

Результаты калибровок и градуировок позволяют определить действительные значения измеряемой *in situ* величины C , оценить поправки и погрешности рабочих ГИСЗ, а значит оценить достоверность получаемых данных. Погрешность градуировки ГИСЗ складывается из погрешности ЭСИ, погрешности метода градуировки и случайной погрешности самого градуируемого ГИСЗ. При этом случайная погрешность градуируемого ГИСЗ при его применении вносит двойной вклад (по дисперсии) в суммарную погрешность результата измерений [1]. Важным параметром является отношение погрешностей градуируемого и эталонных средств измерения. На практике это отношение составляет от нескольких единиц до единицы (при сличении ГИСЗ одного уровня точности) как в лабораторных (*in vitro*), так и натурных (*in situ*) условиях [3–5, 24].

Для сравнения с рис. 4 приведем пример результатов градуировки и интеркалибровки (сличения) *in vitro* в резервуаре с морской водой в статическом режиме методом непосредственного сличения двух однотипных рабочих ГИСЗ комплекса АЗ-2 ИО РАН, где в качестве ЭСИ использован прецизионный СТД-зонд фирмы N. Brown, измеряющий C косвенным методом по алгоритму UNESCO 44 [30]. На рис. 5 по данным табл. 2.1 из [30] построены графики 1 и 2 отклонений ΔC по-

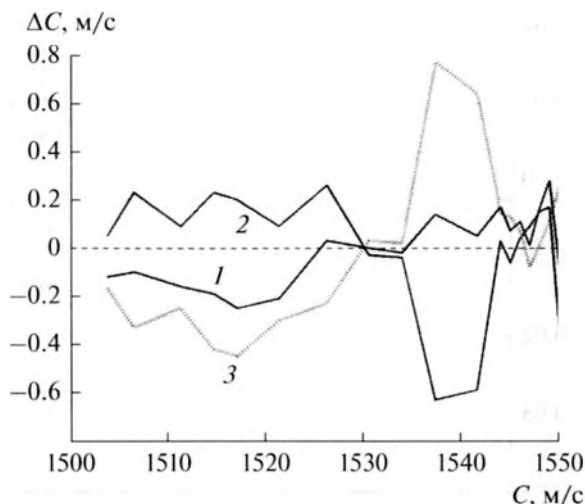


Рис. 5. Результаты градуировки двух однотипных рабочих ГИСЗ. 1 — отклонение показаний измерителя 1 от опорной зависимости; 2 — отклонение показаний измерителя 2 от опорной зависимости; 3 — разность показаний измерителей 1 и 2.

казаний калибруемых зондов ГИСЗ от показаний STD-зонда, принятых в качестве опорных, — горизонтальная штриховая линия, где $\Delta C(C) = 0$, и график 3 (пунктир) — разность показаний ГИСЗ 1 и 2. Из рис. 5 следует, что размах отклонений показаний зондов ГИСЗ в указанном диапазоне C составляет: 0.53 м/с (график 1); 0.89 м/с (график 2); 1.22 м/с (график 3). Как видим, реальная погрешность этих РСИ в морской воде превысила погрешность ЭСИ (см. рис. 4) более чем на порядок. Заметим, что результаты этой интеркалибровки единовременны и не содержат информации о дрейфовой составляющей погрешности ГИСЗ [4].

Аналогичное сравнение результатов прямых и косвенных измерений скорости звука в воде озера Байкал выполнено посредством зонда MiniSVS фирмы Valeport и STD-зонда SBE 37-SMP-ID-Microcat, см. рис. 1 в [38]. Систематическое различие их показаний составило ~ 1.7 м/с, что более чем на порядок превысило абсолютную погрешность обоих зондов, гарантируемую фирмой. Причиной расхождения результатов может быть загрязнение вод.

Для сравнения с данными рис. 5 приведем еще результаты интеркалибровки (сличения) *in situ* в динамическом режиме двух идентичных измерительных каналов скорости звука в Черном море при вертикальном зондировании с дрейфующего судна модифицированным STD-зондом ИСТОК-6 (МГИ 4103). Зонд был специально дополнительно оборудован двумя синхронно работающими время-пролетными модулями ГИСЗ (зав. № 003 и 004), разнос датчиков 0.2 м, база $L = 0.07$ м [4, 5]. При непрерывном вертикальном

зондировании в диапазоне глубин от 200 до 1200 м при интервале дискретных отсчетов 0.25 с и скорости зондирования ~ 0.5 м/с, коэффициент взаимной корреляции центрированных синхронных рядов при нулевом сдвиге был выше 0.999, а среднее значение разностного ряда составило 0.02 м/с, что свидетельствует о высокой достоверности результата зондирования и перспективности время-пролетного метода измерения скорости звука в морской среде. Эти измерения можно рассматривать как реализацию корреляционного метода и разновидность групповых измерений [4, 32–36]. В то же время сопоставление результатов прямых и косвенных измерений скорости звука зондом ИСТОК-6 в натурных условиях в Черном море показало их существенное различие, возрастающее с глубиной (более 1 м/с для формул разных авторов [4, 5]). Наблюдаемое различие может быть обусловлено еще и региональными особенностями состава вод *in situ*, в частности меньшей соленостью и влиянием растворенного сероводорода, концентрация которого увеличивается с глубиной. Такое различие свидетельствует о необходимости разработки региональных уравнений термодинамического состояния на основе прецизионных измерений прямым методом скорости звука и о возможности непрерывного определения концентрации сероводорода при совместных измерениях [4, 39].

Все приведенные выше примеры подтверждают вывод о том, что проблема согласования результатов прямых и косвенных прецизионных измерений скорости звука в морской среде все еще далека от своего решения.

В зависимости от назначения ГИСЗ и изменчивости (деградации) их метрологических характеристик [3, 4, 40], требования к точности и периодичности градуировок и калибровок будут различными. Так, в ГИСЗ, предназначенных для измерения параметров термодинамического состояния морской среды, самые высокие требования предъявляют к погрешности измерения абсолютных значений C , определяемой НСП. В то же время при исследованиях маломасштабных флуктуаций скорости звука основное требование — высокий реальный порог флуктуационной чувствительности ГИСЗ, определяемый СКП [3, 34, 37, 41, 42].

СРАВНЕНИЕ СКП

Рассмотрим показатель СКП, характеризующий случайную погрешность измерений и важный при исследовании мелкомасштабных флуктуаций скорости звука в морской среде и расчете градиентов [3, 4]. Методика и результаты метрологических измерений *in vitro* с целью определения случайной составляющей инструментальной погрешности ГИСЗ представлены ниже. Для

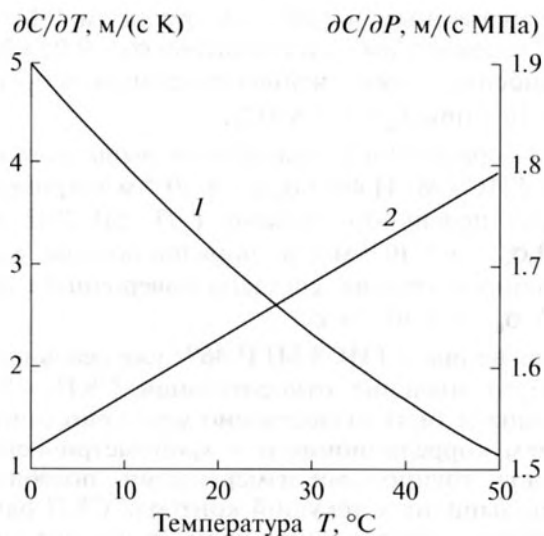


Рис. 6. Зависимости температурного (1) и барического (2) коэффициентов скорости звука от температуры в дистиллированной воде при нормальном давлении.

оценки СКП используют зависимость $C(T, P)$ в дистиллированной воде [3–5, 24]. Статистические характеристики собственных инструментальных шумов ГИСЗ рассчитывают по временным реализациям $C_b(T, P, t)$ при условии $T(t) = \text{const}$ и $P(t) = \text{const}$, где t — время. Требования к стабильности аргументов T и P получают посредством частных производных, зависимость которых от температуры приведена на рис. 6. Как видно, требования к стабильности температуры пробы воды очень высоки, особенно в области менее 4°C , где находятся реперные точки T_m , — см. рис. 2 и рис. 6.

На рис. 7 приведен пример калибровки ГИСЗ МГИ 4603, иллюстрирующий приращение скорости звука, созданное перепадом гидростатического давления $\Delta P = -0.6$ м водного столба при $T(t) = \text{const}$. Полученное приращение скорости звука $\Delta C = -9.7 \times 10^{-3}$ м/с дает согласно рис. 6 оценку производной $(\partial C/\partial P) = 1.64$ м/(с МПа). Из примера следует, что при непосредственном сличении прецизионных ГИСЗ необходимо учитывать разность высот геометрических центров акустических баз датчиков. Этот пример показывает также возможность применения измерителя скорости звука как приемника давления [3, 4].

Одним из главных показателей, наглядно и объективно характеризующих случайную составляющую результирующей инструментальной погрешности, является функция распределения плотности вероятностей случайной погрешности. Эта важная характеристика случайной составляющей погрешности ГИСЗ, к сожалению, приводится очень редко. Для примера на рис. 8 изображена полученная экспериментально *in vitro*

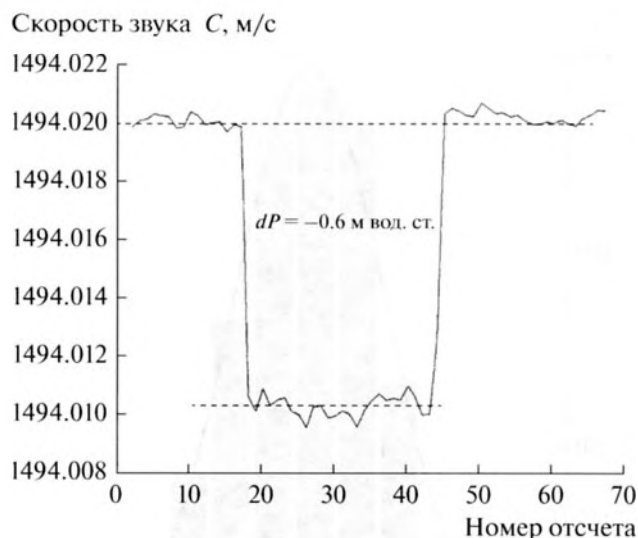


Рис. 7. Приращение скорости звука, созданное перепадом гидростатического давления $\Delta P = -0.6$ м вод. ст.

гистограмма случайной составляющей инструментальной погрешности (собственных шумов) прецизионного время-пролетного измерителя скорости звука и ее аппроксимация нормальным законом распределения плотности вероятностей (сплошная линия). Отметим “усеченность” распределения, а также отсутствие выбросов, сбоев и промахов.

Измерения выполнены в дистиллированной воде как образцовом веществе в условиях локального термодинамического равновесия в пассивном термостате при $T(t) = \text{const}$ и нормальном атмосферном давлении P_0 , т. е. при $C(t) = \text{const}$. Вычисленное значение СКО $\sigma_c \approx 2 \times 10^{-4}$ м/с реализации выходного сигнала $C_b(T, P, t)$, приведенного к входу ГИСЗ, является выборочной оценкой *сверху* случайной составляющей инструментальной погрешности. Соответственно, оценка *сверху* относительной случайной погрешности (собственных инструментальных шумов) данного измерителя скорости звука есть $(\sigma_c/C) \leq 1.3 \times 10^{-7}$. Отметим, что скорость звука — это единственный акустический параметр жидкости, в том числе и морской среды, который в настоящее время можно измерять прямым методом с такой высокой точностью. В действительности результирующее значение σ_c характеризует в совокупности собственный инструментальный шум прибора, акустический шум среды (флуктуации давления) [31], температурную нестабильность рабочей жидкости, т.е. пробы воды в термостате, шумы квантования (методическая погрешность $\sigma_{\text{кв}} \approx 0.4 \text{ bin} = 4 \times 10^{-5}$ м/с) и погрешность выборки. Поэтому результирующее распределение (рис. 8) является композицией функций распределения плотности

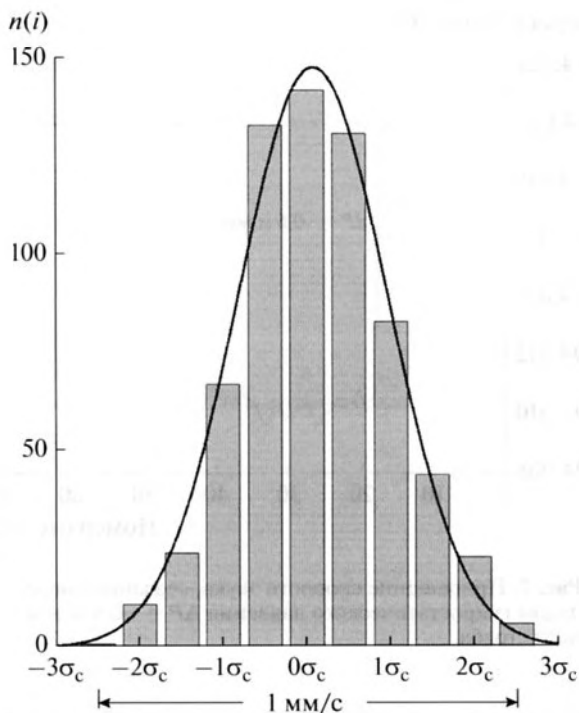


Рис. 8. Гистограмма случайной погрешности время-пролетного гидроакустического измерителя скорости звука МГИ 4603, интервал (bin) — 1×10^{-4} м/с. Сплошная линия — аппроксимация нормальным законом распределения плотности вероятностей, СКО $\sigma_c = 2 \times 10^{-4}$ м/с.

вероятностей этих слагаемых, так как для независимых случайных величин функция плотности вероятности их суммы равна свертке плотностей вероятностей слагаемых. График, изображенный на рис. 8 (сплошная линия), можно рассматривать как экспериментальное подтверждение предположения о близости распределения суммы шумов различной природы к нормальному закону (как следствие центральной предельной теоремы теории вероятностей). Автокорреляционная функция реализации выходного сигнала близка к дельта-функции, что характерно для “белого” шума и подтверждает адекватность спектральной модели инструментальных шумов ГИСЗ [4, 32, 40].

Оценка сверху эквивалентной СКО нестабильности температуры пробы воды в термостате при $\partial C / \partial T \approx 3$ м/(с К), см. рис. 6, дает значение $\sigma_T \leq 0.06$ мК, которому соответствует относительная нестабильность $\sigma_T / T_a \leq 2 \times 10^{-7}$, где $T_a \approx 300$ К. Это свидетельствует о возможности применения такого измерителя в прецизионной акустической термометрии [3, 33]. Отметим, что данная погрешность соизмерима с относительной случайной погрешностью воспроизведения термодинамической температуры основной реперной точки международной температурной шкалы МТШ-90

государственным первичным эталоном РФ, где СКП температуры ТТВ составляет $\sigma_T = 0.05$ мК, и ее относительная случайная погрешность $\sigma_T / T_a \approx 2 \times 10^{-7}$ при $T_a = 273$ К [12].

Для сравнения с полученной выше оценкой СКП ГИСЗ МГИ 4603 $\sigma_c \leq 2 \times 10^{-4}$ м/с приведем данные первичного эталона ГЭТ 201-2012, где СКО $\sigma_c \approx 5 \times 10^{-3}$ м/с на порядок больше, а для вторичного эталона, согласно поверочной схеме СКО, $\sigma_c \approx 5 \times 10^{-2}$ м/с.

Как видим, в ГИСЗ МГИ 4603 уже реально достигнуто значение относительной СКП $\sim 10^{-7}$. Оно может быть существенно улучшено применением корреляционного и хронометрического методов, групповыми измерениями, позволяющими выполнять текущий контроль СКП одновременно и непрерывно в процессе измерения C [4, 34–36]. Такая высокая пороговая чувствительность рабочих средств измерения необходима, например, при натурных исследованиях структуры гидрофизических полей и процессов обмена в глубоководной части Черного моря, являющейся своеобразным природным термостатом [37].

ВЫВОДЫ

Согласно концепции опережающего развития средств метрологического обеспечения, сформулируем задачу создания перспективного эталона скорости звука для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы скорости звука в жидкостях в широком диапазоне температур и при больших давлениях с относительной погрешностью НСП $\sim 10^{-6}$ и менее. Эталон должен представлять собой автоматизированный измерительный-вычислительный комплекс (ИВК), содержащий два различных измерителя скорости звука, функционирующих одновременно. Их первичные измерительные преобразователи размещены в едином объеме рабочей жидкости общей термостатированной камеры давления.

Один измеритель скорости звука с переменной базой (первичный эталон) служит для воспроизведения единицы скорости звука в отдельных точках шкалы C в режиме $\lambda = \text{const}$, в том числе и в реперных точках $C_m(T_m, P)$ для расчета дифракционного параметра $D(C_m)$ по предложенной методике. Приращение длины базы, а следовательно, и длину звуковой волны λ измеряют в длинах световой волны в вакууме лазерным интерферометром с относительной погрешностью $< 10^{-7}$, а частоту f_c — эталонным частотомером с НСП $< 10^{-8}$. Вычисление действительных (восстановленных) значений C_v проводится по формуле (3).

Другой измеритель скорости звука с фиксированной базой (вторичный эталон), работающий в режиме $f_c = \text{const}$ синхронно с первым, служит

интерполятором во всем диапазоне значений скорости звука с относительной СКП $<10^{-7}$. Геометрические размеры акустической базы интерполятора стабилизируют одним из способов, изложенных в [4]. Функции влияния факторов T и P , параметры a , b , d , Δt , l_0 определяют по данным измерителя с переменной базой, а скорость звука рассчитывают, например, по формуле (2). Интерполятор, по сути, близок к идеальному измерителю. Параметры интерполятора оптимизируют, обеспечивая высокую воспроизводимость, стабильность и малые собственные шумы [4]. Примером интерполятора может служить упомянутый выше время-пролетный измеритель скорости звука типа МГИ 4603, посредством которого метрологически поверяют рабочие ГИСЗ. Заметим, что погрешности измерительных каналов T и P в ИВК должны быть на уровне специальных эталонов, а конструкция перспективного вторичного эталона скорости звука в жидкостях — обеспечивать возможность передачи с минимальной погрешностью размера единицы скорости звука рабочим средствам измерений методом непосредственного сличения в широком диапазоне температур и давлений, что особенно важно при проведении исследований в квазиоднородных слоях и на больших глубинах океана. Это связано с тем, что требования к точности гидрофизических измерений в современной океанологии непрерывно возрастают, приближаясь к точности первичных эталонов.

Все, что мы знаем об океане, стало известно благодаря океанографическим приборам. Ввиду очень слабой изменчивости гидрофизических полей "...океанография не может существовать без точных измерений. Когда же требуется исследовать характеристики глубинных водных масс, зависимость человека от приборов становится абсолютной" (Deason M.). Это высказывание лишний раз подтверждает значимость метрологии в современных океанологических исследованиях, в том числе в гидрофизике и гидроакустике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, используя предложенные выше принципы и методы, становится возможным на порядок и более повысить точность воспроизведения новым первичным эталоном размера единицы скорости звука в жидкостях и передачи его подчиненным средствам измерения в широком диапазоне температур и давлений. Выражая скорость звука в воде в долях скорости распространения света в вакууме, удастся создать принципиальную основу для децентрализации эталонной базы, обеспечения единства измерений и существенного повышения инструментальной точности рабочих гидроакустических средств измерения

прямым методом скорости звука в морской среде и в других жидкостях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений: Метрологическая справочная книга. Л.: Лениздат, 1987. 295 с.
2. Бабий В.И. Скорость звука как связующее звено гидрофизики и гидроакустики // Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана: Сб. докладов Второй международной научно-практической конференции. НАН Украины, Научно-технический центр панорамных акустических систем. Запорожье, 2008. С. 113–121.
3. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 200 с.
4. Бабий В.И. Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане / Серия: Современные проблемы океанологии. Выпуск № 7. Морской гидрофизический институт НАН Украины. Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ ГИДРОФИЗИКА", 2009. 142 с.
5. Бабий В.И., Толстошеев А.П. Рабочие средства измерения скорости звука в морской среде. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. 36 с.
6. Серавин Г.Н. Измерение скорости звука в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 136 с.
7. Комляков В.А. Корабельные средства измерения скорости звука и моделирования акустических полей в океане. СПб.: Наука, 2003. 357 с.
8. Микушин И.И., Серавин Г.Н. Методы и средства измерения скорости звука в море. СПб.: Судостроение, 2012. 224 с.
9. Белогольский В.А., Саморукова Л.М., Секоян С.С. О практическом метрологическом обеспечении измерений скорости звука в жидких средах // Труды IX Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". СПб.: Наука, 2008. С. 260–264.
10. 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.
11. Бабий В.И. Принципы создания и совершенствования эталона скорости звука в жидкости // Научно-техническая конференция "Проблемы метрологии гидрофизических измерений ПМГИ-2006". Материалы конференции. Ч. 2. М.: ФГУП ВНИИФТРИ, 2006. С. 124–128.
12. Захаров И.П., Павленко Ю.Ф. Эталоны в области электрорадиоизмерений. Справочное пособие. М.: "Горячая линия — Телеком", 2008. 192 с.
13. Бабий В.И., Бабий М.В. Устройство для измерения скорости звука в жидкостях и газах. Авторское свидетельство № 1538057, 23.01.1990. БИ № 3.
14. Еняков А.М. Децентрализация: мода или необходимость? // Проблемы метрологии гидрофизических измерений. Тезисы докладов. М.: Изд. НПО "ВНИИФТРИ", 1992. С. 26–27.
15. Бабий В.И. Способ измерения физических свойств жидкостей и устройство для его осуществления.

- Авторское свидетельство № 1239586, 23.06.1986. БИ № 23.
16. *Бабий В.И.* О погрешности измерения скорости звука в морской среде // Морской гидрофизический журн. 1999. № 3. С. 77–83.
 17. *Бабий В.И.* Дифракционные эффекты при измерении скорости звука в жидкостях // Известия Южного Федерального университета РФ. Тематический выпуск “Экология 2009 – море и человек”. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. № 6(95). С. 169–174.
 18. *Бабий В.И.* Скорость звука в диссипативной среде // Доклады XIII школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”, совмещенной с XXIII сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС, 2011. С. 165–168.
 19. *Бабий В.И.* Скорость звука в нелинейной диссипативной среде // Физическая акустика. Нелинейная акустика. Распространение и дифракция волн. Акустоэлектроника. Геоакустика. Сб. трудов Научной конференции “Сессия Научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества”. Т. 1. М.: ГЕОС, 2012. С. 159–161.
 20. *Бабий В.И.* Влияние звукового поля на параметры термодинамического состояния воды. Роль нелинейных эффектов // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск “Экология 2013 – море и человек”. 2013. № 9(146). С. 36–39.
 21. *Урусовский И.А.* Звуковое поле во френелевой зоне осесимметричного плоского излучателя с неравномерным распределением колебательной скорости // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 291–295.
 22. *Кудашев Е.Б., Кошлыницин В.А., Маршов В.П., Ткаченко В.М., Цветков А.М.* Экспериментальное моделирование гидродинамических шумов обтекания на автономной морской лаборатории // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 211–221.
 23. *Буторин В.М.* Фазовые скорости плоских волн в трубе с неравномерной скоростью потока вдоль радиуса // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 677–684.
 24. *Бабий В.И.* Математическая модель гидрофизических измерителей скорости звука и метод их метрологической аттестации // Системы контроля окружающей среды. Сб. науч. тр. МГИ НАН Украины. Севастополь, 2002. С. 119–127.
 25. *Краснушкин П.Е.* О дифракционных эффектах при измерениях скорости и поглощения ультразвука // ДАН СССР. 1968. Т. 181. № 6. С. 1361–1364.
 26. *Бабий В.И.* Метрология скорости звука в морской воде // X Всесоюзная акустическая конференция. Доклады. Секция II. М., 1983. С. 42–45.
 27. *Шерстянкин 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. Т. 405. № 1. С. 42–45.
 28. *Фурдуев А.В.* Акустический мониторинг изменчивости подводной среды (экспериментальная проверка новых методов) // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 3. С. 422–430.
 29. TEOS-10 “The international thermodynamic equation of seawater – 2010”. Calculation and use thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides № 56, UNESCO (English), 196 p. http://www.teos-10.org/pubs/teos-10_primer.pdf
 30. *Кузнецов В.П.* Нелинейная акустика в океанологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 264 с.
 31. *Бабий В.И., Родионов А.А.* Флуктуации гидрофизических полей, обусловленные акустическими шумами океана // Доклады РАН. 2014. Т. 456. № 1. С. 106–110.
 32. *Бабий В.И., Бабий М.В.* Алгоритмический метод разделения сигнала и собственных шумов одноканального измерителя скорости звука // Украинский метрологический журн. 2011. № 2. С. 40–45.
 33. *Бабий В.И.* О пределе чувствительности измерений температуры морской среды // Морские гидрофизические исследования. Севастополь, 1970. № 3(49). С. 113–129.
 34. *Бабий В.И., Бабий М.В.* Корреляционный метод измерения скорости звука // Труды XI Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”. СПб.: Наука, 2012. С. 413–416.
 35. *Бабий В.И.* Хронометрический метод измерения скорости звука в воде // Сб. трудов 3-й Украинской конференции по автоматическому управлению “Автоматика-96”. Секция 14. Севастополь, 1996. С. 24–26.
 36. *Бабий В.И.* Групповые измерения скорости звука в морской среде // Морской гидрофизический журн. 2003. № 1. С. 67–71.
 37. *Babiy V.I., Babiy M.V.* Layered structure of Black sea bathyal zone // Int. Conf. “Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres”, Санкт-Петербург, 25–28 июня 2013 г. М.: МАКС Пресс, 2013. С. 17–19.
 38. *Губин Н.А., Ченский Д.А., Ченский А.Г.* Лабораторный стенд для калибровки измерителей скорости звука // Современные методы и средства океанологических исследований // Материалы XIV Международной научно-технической конференции “МСОИ-2015”. М.: АПР, 2015. Т. 1. С. 120–122.
 39. *Бабий В.И., Кирющенко И.Г.* О возможности измерения концентрации сероводорода в воде на основе прямых измерений скорости звука // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. Вып. 15. НАН Украины, МГИ, ИГН, ОФ ИНБЮМ. Севастополь, 2007. С. 418–424.
 40. *Бабий В.И.* Спектральная модель основной погрешности гидрофизических измерителей // Международная научно-техническая конференция “Современные методы и средства океанологических исследований МСОИ-2000”. М., 2000. Ч. 1. С. 128–135.
 41. *Бабий В.И., Бабий М.В., Родионов А.А.* Показатели качества измерений гидрофизических полей океана // Современные методы и средства океанологических исследований. Материалы XIV Международной научно-технической конференции “МСОИ-2015”. М.: АПР, 2015. Т. 1. С. 48–53.
 42. *Бабий В.И., Бабий М.В., Родионов А.А.* Перспективный оптико-акустический метод измерения параметров термодинамического состояния морской среды. Оценка погрешностей // Морской гидрофизический журн. 2016. № 2(188). С. 70–82.