

Перспективный оптико-акустический метод измерения параметров термодинамического состояния морской среды. Оценка погрешностей

© 2016 В.И. Бабий*, М.В. Бабий*, А.А. Родионов**

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: marbab@yandex.ru

**Санкт-Петербургский филиал Института океанологии
им. П.П. Шириова РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sPPP@spbrc.nw.ru

Поступила в редакцию 09.12.2015 г. После доработки 10.01.2016 г.

В основе рассматриваемого метода лежит концепция построения идеального гидрофизического измерителя параметров термодинамического состояния случайно-неоднородных жидкостей, которая заключается в непрерывном синхронном измерении показателя преломления света, скорости звука и давления в едином объеме среды. Сделаны оценки погрешностей прямо и косвенно измеряемых этим методом параметров термодинамического состояния морской среды. Предложен возможный вариант реализации оптико-акустического измерителя. Обсуждается проблема децентрализации эталонной базы таких измерителей посредством создания единого специального первичного эталона единиц скорости звука и скорости света в прозрачных жидкостях с привязкой к идеальному легко воспроизводимому абсолютному реперу – скорости света в вакууме, принятой в качестве мировой фундаментальной физической константы.

Ключевые слова: морская вода, параметры состояния, скорость света, скорость звука, давление, квазиидеальный измеритель, погрешности измерения, единый эталон, децентрализация.

Введение. 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 измерения перед косвенными. Однако важнейшие первичные параметры термодинамического состояния морской среды – плотность и соленость – с необходимой точностью, быстродействием и достоверностью в настоящее время прямым методом *in situ* не измеряют по причине отсутствия таких средств, а рассчитывают по результатам прямых измерений температуры, электропроводности и давления традиционными гидрологическими *CTD*-зондами [1 – 7]. Принципиальными недостатками всех современных *CTD*-зондов являются практически неустранимые погрешности при динамических измерениях параметров состояния в случайно-неоднородной и нестационарной морской среде, обусловленные различием объемов пространственного осреднения гидрофизических полей датчиками, их разнесением в среде и разной ориентацией, неодинаковой инерционностью каналов, их шумами. Эти эффекты тем или иным способом стараются частично ослабить при последующей математической обработке данных *CTD*-измерений [7]. И хотя проблема корректности косвенных измерений в гидрофизике возникла давно, она до сих пор еще не решена.

Корректные прецизионные измерения параметров термодинамического состояния морской среды являются комплексной проблемой, охватывающей различные взаимосвязанные аспекты: принципы и условия измерений, методики измерений и градуировки, взаимодействие датчиков с объектом измерения (средой), структуру исследуемых гидрофизических полей и цели исследования, уравнения состояния морской воды, методики математической обработки результатов измерений, их анализа и интерпретации, оценки погрешностей восстановления и т. п. В случайно-неоднородных средах, в том числе и океанической, это еще и проблема корректности динамических измерений. Заметим, что все эти аспекты гидрофизических измерений изучают исключительно в рамках приближенных математических моделей.

Рассмотрим возможный вариант реализации концепции квазиидеального измерителя параметров термодинамического состояния морской среды на основе оптико-акустического метода, лишенного указанных недостатков современных *CTD*-зондов.

Основы метода. Морская вода является сложной многокомпонентной термодинамической системой. При макроскопическом описании ее состав характеризуют массовой (или объемной) концентрацией каждой компоненты a_i так, что

$$\sum_{i=1}^m a_i = 1,$$

где m – число компонент. В частности, a_i могут соответствовать концентрации различных солей, многообразных примесей, в том числе и загрязнителей морской воды, определяющих ее экологические характеристики. Сложность модели морской воды или число принимаемых в расчет компонент m зависит от необходимой точности и подробности исследования ее как термодинамической системы. В соответствии с правилом фаз Гиббса число независимых переменных (термодинамических степеней свободы), необходимых и достаточных для полного описания состояния l -фазной и m -компонентной равновесной термодинамической системы, равно $k = m - l + 2$. В однофазной системе ($l = 1$) имеем $k = m + 1$. Для чистых жидкостей, например дистиллированной воды, $m = 1$, $k = 2$. В действительности число k доступных прямому измерению *in situ* с необходимой точностью параметров состояния морской воды ограничено. Специфика исследования морской среды состоит в том, что важнейшие параметры ее состояния (плотность, или удельный объем, и соленость) прямыми методами *in situ* не измеряют, а рассчитывают на основе функционально связанных с ними других (прямо измеряемых) параметров. В настоящее время гидрологическими *CTD*-зондами непосредственно *in situ* измеряют три параметра состояния ($k = 3$): температуру (T), электропроводность (χ) и гидростатическое давление (P). В океанографии в рамках гипотезы постоянства относительного химического состава используют бинарную модель морской воды «дистиллированная вода + квазиоднородная соль», где $m = 2$.

По прямо измеряемым T , χ , P на основе соответствующих уравнений состояния рассчитывают искомые параметры среды: соленость (S), плотность (ρ),

сжимаемость (β), скорость звука (C), показатель преломления света (n) и др. Наиболее изучены уравнение $\rho = \rho(T, S, P)$ и его модификации $\rho = \rho(T, \chi, P)$, $S = S(T, \chi, P)$ и т. п., где $S = a_1$. Относительная погрешность определения косвенно измеряемых параметров состояния составляет $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$. Повышение точности прямых измерений только T, χ, P не приведет к повышению точности определения косвенно измеряемых параметров ρ и S вследствие ограниченной примерно на уровне 10^{-5} погрешности существующих эмпирических уравнений состояния при $m = 2$, которые не учитывают региональные особенности бассейна, например наличие сероводорода в Черном море. Дальнейший прогресс возможен за счет усложнения модели морской воды, т. е. увеличения m . Однако с необходимой точностью пока возможны дополнительно к T, χ, P измерения *in situ* прямым методом еще только двух параметров: C и n (или скорости света $C_{св}$). Тогда получим $k = 5, m = 4$. Это даст возможность примерно на порядок уменьшить погрешность расчета косвенно измеряемых гидрофизических параметров и уточнить уравнения состояния. Дополнительная информация может быть получена путем учета комплексного характера параметров C, χ, n и использования их частотной зависимости от компонент a_i , что эквивалентно увеличению k , а следовательно, и m . Например, прямые измерения коэффициента поглощения ультразвука и частотной зависимости C , а также измерения n и коэффициента поглощения света на разных длинах световых волн также дадут возможность увеличить m и уточнить параметры состояния. При этом, естественно, желательно для корректности измерений осуществить совмещение объемов пространственного осреднения всех первичных измерительных преобразователей. При натуральных исследованиях морской среды как неравновесной термодинамической системы важнейшей характеристикой измерителей, наряду с объемом пространственного осреднения, является быстродействие.

В океанологии широко используют T, S -анализ водных масс [1 – 3]. Экспериментальное исследование бинарной системы будет эффективным, если прямым методом измерять такие параметры, которые образуют на T, S -диаграмме семейство ортогональных изолиний [2]. В этом случае положение некоторой точки на диаграмме, характеризующей термодинамическое состояние морской воды при наличии погрешностей измерений, будет наиболее определенным. Показателем близости координатной сетки изолиний к ортогональной является выражение

$$\varepsilon = \iint_{TS} \psi(T, S) C(T, S) C_{св}(T, S) dT dS,$$

где $\psi(T, S)$ – весовая функция, а интегрирование проводится в некоторой области изменения первичных параметров T и S . При полной ортогональности $\varepsilon = 0$.

На рис. 1 представлены семейства изолиний параметров состояния при $P = P_0$ в двух системах координат: T, S и $C, C_{св}$ (или C, n), которые взаимнооднозначно соответствуют друг другу. Как видно, в отличие от изолиний удельной электропроводности χ (штриховые линии) только системы изолиний $C, C_{св}$ и C, n на T, S -диаграмме наиболее близки к ортогональным. Соот-

ветственно и система изолиний T, S на $C, C_{св}$ -диаграмме также близка к ортогональной. Это значит, что синхронные измерения в едином объеме среды скорости света (показателя преломления), скорости звука и гидростатического давления наиболее достоверно определяют термодинамическое состояние морской воды в рамках бинарной модели.

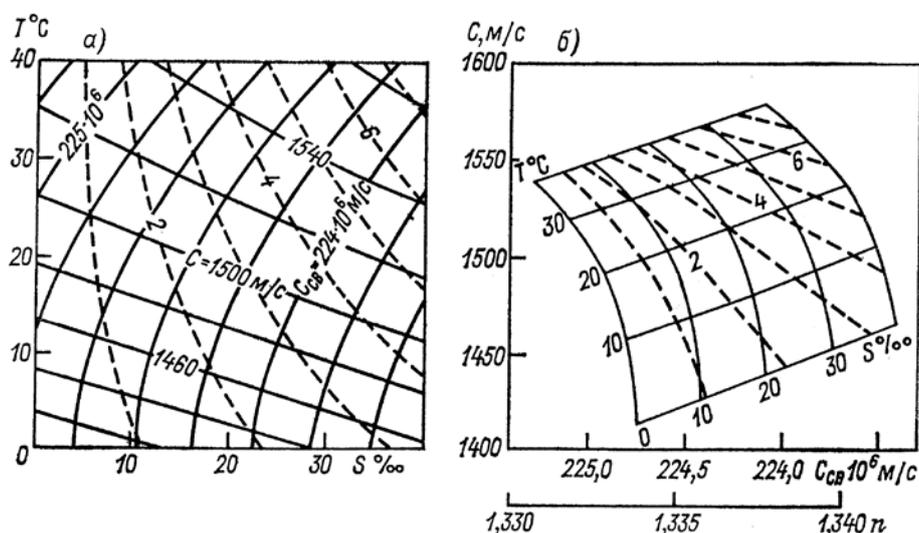


Рис. 1. Семейства изолиний: a – $C, C_{св}, \chi$ (См/м, штриховые линии) на T, S -диаграмме; b – T, S, χ на $C, C_{св}$ -диаграмме

Отмеченные выше недостатки CTD -зондов могут быть практически полностью устранены в зондах с совмещенными гидрофизическими первичными измерительными преобразователями [8 – 19], где функции пространственного и временного осреднения разделены, измерения синхронны, функции временного осреднения в каналах одинаковы, а объемы пространственного осреднения гидрофизических полей равны и совмещены (едины). Принципиальное преимущество совмещенных оптико-акустических гидрофизических измерителей по сравнению с традиционными CTD -системами состоит в замене взаимодействия среды с веществом датчика взаимодействием среды с излучением – акустическим (ультразвуковым) и оптическим (лазерным) – в едином объеме среды, как в параметрических системах. Это уменьшает динамические погрешности при косвенном измерении температуры, плотности, солености, сжимаемости и других параметров состояния на основе прямых измерений скорости звука и скорости света, поскольку скорости распространения световых и звуковых волн в среде велики по сравнению со скоростью эволюции гидрофизических полей (~ 1 см/с, [2]). При этом повышается временная разрешающая способность (быстродействие) таких измерителей, что особенно важно при динамических измерениях [6, 16].

Достоинством данной концепции построения квазиидеального гидрофизического измерителя является устранение специфических погрешностей, обусловленных пространственным разнесением и ориентацией датчиков с

разными объемами пространственного и временного осреднения. Это делает корректными косвенные измерения других параметров состояния на основе прямых измерений скорости звука, скорости света (показателя преломления) и давления. При этом вместо контактного (поверхностного) взаимодействия морской среды с веществом датчика (например термометра) используется объемное взаимодействие среды с оптическим и акустическим полями, которые практически не нарушают структуру исследуемых гидрофизических полей. Причем взаимодействие этих излучений со средой (континуумом) происходит на атомном и молекулярном уровнях в едином объеме среды, что позволяет приблизиться к реализации концепции идеального измерителя параметров состояния морской среды.

В таком измерителе аппаратные функции пространственного и временного осреднения гидрофизических полей могут быть разделены, поскольку осреднение происходит в разных звеньях измерительной цепи:

$$H_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \tau) = H_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3) H_i(\tau),$$

где $H_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ – весовая функция пространственного осреднения i -м датчиком поля элемента x_i ; ξ_1, ξ_2, ξ_3 – пространственные сдвиги; τ – временной сдвиг; $H_i(\tau)$ – весовая функция временного осреднения i -м измерительным каналом. В совмещенных измерителях для всех каналов функции $H_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ должны быть одинаковыми. При полностью совмещенных объемах пространственного осреднения датчиками прямо измеряемых параметров эквивалентный измеритель имеет наименьшую погрешность и одинаковые функции пространственного осреднения (одинаковое пространственное разрешение) для всех прямо и косвенно измеряемых параметров состояния. Оптимальным образом это совмещение достигается в оптико-акустических измерителях параметров термодинамического состояния морской среды [12, 19]. Функции временного осреднения $H_i(\tau)$ для всех каналов также должны быть одинаковыми, что легко выполнимо при цифровой фильтрации [16].

При экспериментальных исследованиях случайно-неоднородных жидкостей, в частности морской среды как неравновесной термодинамической системы, важен динамический параметр измерителя $V_0 = l_0 / \tau_0$, где l_0 – эффективный масштаб пространственного осреднения гидрофизического поля датчиком в направлении траектории зондирования, определяемый весовой функцией $H_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$; τ_0 – эффективный масштаб временного осреднения измерительным каналом в единичном отсчете, определяемый функцией $H_i(\tau)$, характеризующей быстродействие, т. е. временное разрешение [20]. Обобщенный параметр V_0 гидрофизических средств измерения (ГФСИ) – это показатель динамических свойств любых ГФСИ (с размерностью скорости м/с), не зависящий от принципа действия и рода измеряемой физической величины. Он характеризует способность всех ГФСИ проводить корректные измерения маломасштабной структуры гидрофизических полей на ходу мобильного носителя [20]. Следовательно, обобщенный показатель V_0 указывает предел скорости движения носителя относительно среды, при котором еще выполняется условие корректности маломасштабных измерений. Например, при $l_0 = 0,1$ м и $\tau_0 = 0,01$ с получим $V_0 = 10$ м/с (~20 узлов). В совмещенном

оптико-акустическом измерителе динамический параметр V_0 одинаков для всех прямо и косвенно измеряемых параметров состояния среды, что отвечает концепции идеального ГФСИ.

В работах [6, 17] с использованием имитационного математического моделирования рассмотрены погрешности метода, возникающие из-за неполного совмещения и различия размеров и ориентации объемов пространственного осреднения безынерционными оптико-акустическими измерителями параметров состояния морской воды. При анализе погрешностей использовались линеаризованные уравнения состояния $y_v = F(y_i, y_j)$, где y_v – косвенно определяемый параметр; y_i, y_j – прямо измеряемые параметры. В одномерной модели стратифицированной среды (например при вертикальном зондировании тонкой структуры гидрофизических полей) имеем

$$Y_i(z, t) = \iiint H_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3) x_i(z - \xi_3) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 + \varepsilon_i(t),$$

где x_i – значения i -й физической величины на входе измерительного канала; z – глубина; $\varepsilon_i(t)$ – собственный шум i -го измерительного канала; t – время.

Численное моделирование измерителя проводилось для равновесного осреднения поля в объемах датчиков, представленных в виде круглых цилиндров при их различных высотах L_1, L_2 , отношении их радиусов r_1, r_2 , ориентации осей φ_1, φ_2 и пространственном разnose h . Погрешности оценивались как разности между измеренными прямо или косвенно параметрами состояния и их модельными значениями:

$$\delta x_v(r_i, r_j, L_i, L_j, h, \varphi_1, \varphi_2, z, t) = y_v(y_i, y_j) - x_v(x_i, x_j).$$

В идеальном измерителе с полностью совмещенными объемами пространственного осреднения поля датчиками эти разности равны нулю.

При анализе погрешностей использовались модельные распределения полей по глубине в виде двух слоев при условии гидростатической устойчивости. Получено, что при вертикальном зондировании причиной ложных выбросов на восстановленных профилях косвенно измеряемых параметров состояния является неполное совмещение объемов пространственного осреднения датчиков прямо измеряемых параметров. При этом характеристики пространственного осреднения эквивалентного измерителя косвенно определяемых элементов состояния будут различны в зависимости от того, какой параметр поля рассчитывается. Погрешности восстановления тонкой структуры косвенно измеряемых параметров критичны к пространственному разнесению объемов осреднения датчиков и носят асимметричный характер относительно границы слоев.

Погрешности восстановления прямо и косвенно измеряемых параметров зависят от ориентации датчиков в исследуемом поле. При увеличении отношения максимального размера объема осреднения к минимальному требованию стабилизации ориентации осей датчиков в поле повышаются. При соизмеримости этих размеров характеристики пространственного осреднения становятся близкими к характеристикам изотропного датчика и требования к ориентации могут быть снижены.

Повышение пространственной разрешающей способности измерителей гидрофизических полей является одной из важных задач при разработке современных средств исследования мелкомасштабной структуры морской среды. Эта задача решается оптимальным сочетанием способов уменьшения геометрических размеров датчика (например за счет многократных отражений сигнала на базе) и формированием неравновесной функции пространственного осреднения (априорные методы) с последующим восстановлением (реконструкцией) входного воздействия путем соответствующей математической обработки выходного сигнала измерителя (апостериорные методы). Одним из способов формирования неравновесной функции пространственного осреднения является использование оптических и акустических датчиков с фокусированием излучения [18]. Преимущество метода фокусирования состоит в возможности эффективного применения противозумовой коррекции пространственных характеристик датчика в области масштабов, меньших его геометрических размеров, поскольку шумы измерителя возникают после пространственной фильтрации (подъема высоких пространственных частот). В [6, 18] численными методами исследовалась возможность увеличения пространственной разрешающей способности ГФСИ (что необходимо, например, при экспериментальном исследовании микроструктуры) на примере фокусирующего датчика скорости звука, выполненного в виде открытого устойчивого конфокального осесимметричного сферического резонатора.

Возможный вариант реализации метода измерения. Рассмотрим рис. 2, на котором схематически изображена структура оптико-акустического устройства, реализующего изложенный выше метод измерения физических свойств жидкостей [12], в частности морской воды, путем синхронных измерений скорости звука и скорости света в едином объеме среды. Устройство содержит электронный измеритель 1 скорости распространения звука и обратимый электроакустический преобразователь 2, например пьезокерамический, с оптически зеркальной излучающей звук поверхностью 3. Преобразователь 2 электрически связан с измерителем 1. Позицией 4 обозначен единый эффективный объем пространственного осреднения датчиком физических полей в жидкости. На расстоянии L от электроакустического преобразователя 2 параллельно его излучающей поверхности 3 и соосно ему установлен оптически прозрачный отражатель звука – иллюминатор 6, выполненный, например, из кварца или лейкосапфира, от поверхности 5 которого происходит отражение звука. Кроме того, устройство содержит оптикоэлектронный измеритель 7 скорости света в жидкости (показателя преломления), например лазерный интерферометр. Оптическая ось его рабочего плеча совпадает с акустической осью электроакустического преобразователя 2. Параметры преобразователя 2 и измерителя 7 выбраны такими, чтобы в процессе измерений эффективные сечения светового и звукового пучков были равны и совмещены, а их оси совпадали на единой базе измерения L . На рис. 2 эффективный диаметр пучков обозначен литерой D . Расстояние L образует единую базу измерителей скорости звука и скорости света. Измерители 1 и 7 соединены с вычислителем 8 (микропроцессор с интерфейсом), где в реальном времени рассчитывают прямо и косвенно измеряемые искомые параметры термоди-

намического состояния морской среды. Необходимые для расчетов данные о давлении поступают либо от отдельного измерителя давления, либо от преобразователя 2, согласно техническому решению, изложенному в [13].

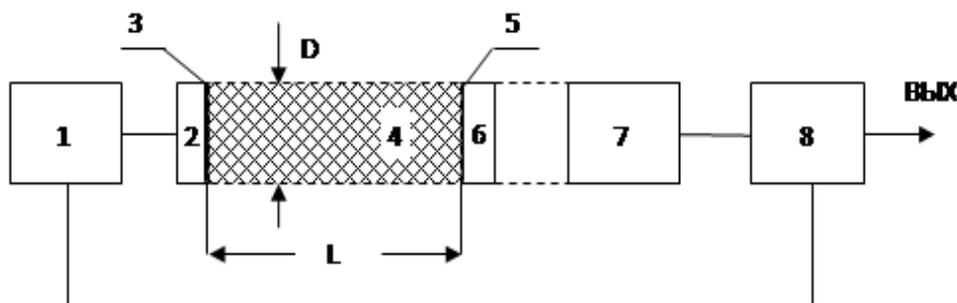


Рис. 2. Блок-схема гидрофизического оптико-акустического совмещенного измерителя скорости звука и скорости света

Устройство работает следующим образом. Электронный измеритель 1 скорости звука, например импульсно-циклический или времяпролетный, вырабатывает электрический импульс, который возбуждает преобразователь 2, например пьезоэлектрический. Он преобразует электрические колебания в механические, которые, распространяясь от его излучающей поверхности 3 в объеме 4 исследуемой жидкости, отражаются от поверхности 5 иллюминатора 6 и возвращаются к обратимому преобразователю 2. Здесь ультразвуковые колебания преобразуются обратно в электрический сигнал и поступают в измеритель 1, где и происходит определение скорости распространения звука на базе L в объеме 4. Одновременно с этим оптикоэлектронный измеритель 7 показателя преломления света с заданной и стабилизированной длиной световой волны, например оптический интерферометр Майкельсона, одно из плеч которого составляют иллюминатор 6, объем 4 исследуемой жидкости и поверхность 3 в качестве зеркала, испускает пучок света. Он проходит через иллюминатор 6, затем через объем 4 исследуемой жидкости, отражается от оптически зеркальной поверхности 3 и возвращается через иллюминатор 6 в измеритель 7, где и происходит определение показателя преломления света на базе L . Геометрическая длина базы L стабилизируется известными способами или, с целью устранения влияния механических и тепловых воздействий, измеряется прямым методом в дополнительном плече тем же лазерным интерферометром непрерывно и одновременно в процессе измерений и учитывается в расчетах C и $C_{св}$ [2 – 5]. Исходя из полученных значений скорости звука и скорости света в исследуемом объеме среды, а также измеренного гидростатического давления P , в вычислителе 8, помимо прямо измеряемых параметров C и $C_{св}$, согласно выражению $X_i = X_i(C, C_{св}, P)$ косвенно определяют искомые параметры термодинамического состояния морской среды, такие как плотность, соленость, температура, электропроводность, сжимаемость и др.

Достоинством перспективного оптико-акустического измерителя является высокая состоятельность (валидность) результатов измерений, обуслов-

ленная хорошей «промываемостью» совмещенного датчика и его «бестелесностью». Отметим специфику оптико-акустического измерителя – необходимость правильного выбора длины волны излучения источника света и требования к стабильности его частоты излучения. Критерием выбора оптимальной длины световой волны может быть минимум коэффициента ослабления света в среде и его слабая изменчивость, например в области 0,6 – 0,65 мкм. Требования к стабильности частоты излучения определяются значением производной $(dn/df_{св})$, где $f_{св}$ – частота источника света. Из работ [1, 5] следует, что для прецизионных измерений показателя преломления относительная нестабильность частоты монохроматического излучения света, которую обеспечивает лазер, должна быть не более $\sim 10^{-6}$. Очень важен вопрос выбора оптимального размера единой базы L , который, с одной стороны, должен отвечать требованиям необходимого пространственного разрешения и быстрого действия для данной измерительной задачи, а с другой – наряду с оптимизацией параметров измерителей C и $C_{св}$ отвечать требованиям достижения наибольшей пороговой чувствительности как оптического, так и акустического каналов.

Оценки погрешностей измерений. Оценим погрешности прямо и косвенно измеряемых параметров термодинамического состояния морской среды перспективным совмещенным оптико-акустическим гидрофизическим измерителем. Для этого в рамках бинарной модели морской воды воспользуемся известными эмпирическими зависимостями [1 – 5], связывающими прямо измеряемые параметры C, n, P с первичными гидрологическими параметрами T, S, ρ состояния морской воды:

$$C = C(T, S, P), \quad n = n(T, S, P), \quad \rho = \rho(T, S, P).$$

Из этих выражений получаем формулы для расчета косвенно измеряемых параметров:

$$T = T(C, n, P), \quad S = S(C, n, P), \quad \rho = \rho(C, n, P), \quad (1)$$

где C, n, P измеряют непосредственно совмещенным оптико-акустическим прибором.

Представим прямо измеряемые параметры в виде суммы полезного сигнала и инструментальных шумов (погрешностей), приведенных к входам измерительных каналов C, n, P :

$$C(t) + \varepsilon_c(t), \quad n(t) + \varepsilon_n(t), \quad P(t) + \varepsilon_p(t).$$

Из этих слагаемых образуем корреляционную матрицу. Полагая $C(t) = \text{const}$, $n(t) = \text{const}$, $P(t) = \text{const}$ и некоррелированность собственных инструментальных шумов каналов, получим при нулевых временных сдвигах выражение для дисперсий случайных погрешностей косвенно измеряемых параметров X_i (след корреляционной матрицы):

$$\sigma_{X_i}^2 = (\partial X_i / \partial C)^2 \sigma_c^2 + (\partial X_i / \partial n)^2 \sigma_n^2 + (\partial X_i / \partial P)^2 \sigma_p^2, \quad (2)$$

где $\sigma_c^2, \sigma_n^2, \sigma_p^2$ – дисперсии собственных инструментальных шумов $\varepsilon_c(t), \varepsilon_n(t), \varepsilon_p(t)$ измерительных каналов C, n, P .

Для оценок погрешностей косвенно измеряемых параметров X_i оптико-акустическим измерителем, согласно выражению (2), в таблице представлены приближенные значения первых частных производных уравнений (1), определенные по данным [1 – 5] для средних значений T , S , P .

Частные производные уравнений (1)

Параметр X	$\partial X/\partial C$	$\partial X/\partial n$	$\partial X/\partial P$
T , К	$\sim 0,3$ К·с/м	$1 \cdot 10^4$ К/отн. ед.	$1 \cdot 10^{-8}$ К/Па
S , епс	$0,8$ епс·с/м	$5 \cdot 10^3$ епс/отн. ед.	0
ρ , кг/м ³	$-0,07$ кг·с/м ⁴	$2,7 \cdot 10^3$ кг/(м ³ ·отн. ед.)	$4,4 \cdot 10^{-7}$ кг/(м ³ ·Па)

Приведем модельный пример. При уже реально достигнутых исходных случайных погрешностях отдельно прямо измеряемых параметров $\sigma_c = 1 \cdot 10^{-3}$ м/с, $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$ отн. ед., $\sigma_p = 1 \cdot 10^3$ Па, согласно (2), получим оценку среднеквадратического отклонения (СКО) погрешности косвенно измеряемой температуры $\sigma_T \approx 1 \cdot 10^{-3}$ К. Аналогично для этих же исходных погрешностей получим оценки СКО косвенно измеряемых солености и плотности: $\sigma_s \approx 1 \cdot 10^{-3}$ епс и $\sigma_\rho \approx 1 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, или $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ усл. ед. Как видим, относительные погрешности прямо и косвенно измеряемых параметров соизмеримы, что обусловлено преимущественно влиянием погрешности σ_n . Поэтому совершенствование канала измерения n желательно. Такие показатели пороговой чувствительности совмещенного оптико-акустического измерителя достаточны для выполнения современных гидрофизических исследований, в частности в Арктическом бассейне, где велико влияние «распреснения» морской воды речными стоками.

При расчетах флуктуаций и погрешностей косвенно измеряемых абсолютных значений параметров состояния (1) используем арифметическую сумму

$$dX = (\partial X/\partial C)dC + (\partial X/\partial n)dn + (\partial X/\partial P)dP,$$

где dC , dn , dP – отклонения от средних значений или неисключенные систематические составляющие погрешностей прямо измеряемых параметров, минимальные значения которых определяются уровнем точности эталонной базы.

Особенности градуировки оптико-акустических измерителей. Одно из прогрессивных направлений развития современной метрологии – децентрализация эталонной базы с целью повышения качества и обеспечения единства измерений. Это связано с тем, что требования к точности гидрофизических измерений в океанологии непрерывно возрастают, приближаясь к точности первичных эталонов, например в программах *WOCE* и *TOGA*. На основе оптико-акустического метода возможно создание специального объединенного первичного эталона скорости звука C и скорости света $C_{св}$ в прозрачных жидкостях с привязкой к единому абсолютному легко воспроизводимой гидрофизический журнал № 2 2016

димому реперу – скорости света в вакууме, принятой в качестве мировой фундаментальной физической константы ($C_{\text{вак}} = 299792458$ м/с точно). Заметим, что размерности этих трех физических величин (C , $C_{\text{св}}$, $C_{\text{вак}}$) одинаковы (м/с). Единая идеальная мера – скорость света в вакууме, где отсутствуют поглощение и частотная дисперсия света и нет зависимости от температуры и давления, действующих на сосуд с вакуумом, – автоматически решает проблему полной децентрализации эталонной базы таких измерителей и с метрологической точки зрения принципиально устраняет препятствия для дальнейшего совершенствования этих гидрофизических средств измерения. Синхронная градуировка каналов прецизионных оптико-акустических измерителей термодинамического состояния жидкостей позволит разработать региональные уравнения термодинамического состояния, а также ревизовать экспериментально уже существующие уравнения состояния морской воды, включая *TEOS-10* (*UNESCO*), с целью их дальнейшего уточнения.

Преимущество оптико-акустических зондов состоит в возможности одновременной калибровки и градуировки всех измерительных каналов в чистой дистиллированной воде – весьма доступном образцовом веществе, термодинамические характеристики которого хорошо изучены, стандартизованы и децентрализованно легко воспроизводятся с высокой точностью и достоверностью. Для калибровки же существующих *CTD*-зондов необходимы дорогостоящие и дефицитные растворы *нормальной* морской воды, параметры которых с большой точностью можно также исследовать оптико-акустическим методом. Напомним, что дистиллированная вода – однофазная однокомпонентная жидкость ($l = 1$, $m = 1$), термодинамическое состояние которой однозначно определяется любой парой прямо измеряемых параметров ($k = 2$), в том числе скоростью звука и скоростью света. Это же относится и к другим чистым жидкостям.

Выводы. Реализация предлагаемого перспективного оптико-акустического метода в рабочих гидрофизических средствах измерения, а также метода градуировки должна позволить рассматривать их как альтернативу традиционным гидрологическим *CTD*-зондам. Более того, появится возможность комплексирования этих средств измерения с современными *CTD*-системами для увеличения числа независимых прямо измеряемых параметров среды с целью уточнения существующих и разработки региональных уравнений состояния, учитывающих, например, концентрацию сероводорода, метана, дисперсной фазы и т. п. Полное использование всей полезной информации, содержащейся в таких корректных синхронных исходных данных, должно обеспечить на основе комплексирования получение *in situ* наилучших, достоверных, надежных и состоятельных оценок параметров термодинамического состояния морской среды в широком диапазоне температур и давлений (глубин).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А.* Введение в океанографию. – М.: Мир, 1978. – 576 с.
2. *Бабий В.И.* Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 200 с.
3. *Архипкин В.С., Добролюбов С.А.* Основы термодинамики морской воды. – М.: Диалог-МГУ, 1998. – 154 с.
4. *Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М.* Морская вода. – М.: Наука, 1979. – 327 с.
5. *Брамсон М.А., Красовский Э.И., Наумов Б.В.* Морская рефрактометрия. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 247 с.
6. *Бабий В.И.* Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – 142 с.
7. *Лазарюк А.Ю.* Об инерционности датчиков температуры и электропроводности CTD-зондов // *Океанология*. – 2008. – 48, № 6. – С. 936 – 939.
8. *Левцов В.И., Трохан А.М., Королев А.И. и др.* Модульная измерительная система для исследования скалярных гидрофизических полей океана // *Метрология гидрофизических измерений*. – М.: НПО ВНИИФТРИ, 1989. – С. 43 – 55.
9. А.с. № 1453265 (СССР). Интерференционный рефрактометр / В.И. Бабий, М.В. Бабий. – Оpubл. 23.01.89. Бюл. № 3.
10. А.с. № 1538057 (СССР). Устройство для измерения скорости звука в жидкостях и газах / В.И. Бабий, М.В. Бабий. – Оpubл. 23.01.90. Бюл. № 3.
11. А.с. № 1402066 (СССР). Способ определения показателя преломления жидкости / В.И. Бабий, М.В. Бабий. – Оpubл. 04.03.86.
12. А.с. № 1239586 (СССР). Способ измерения физических свойств жидкостей и устройство для его осуществления / В.И. Бабий. – Оpubл. 23.06.86. Бюл. № 23.
13. А.с. № 1424453 (СССР). Устройство для измерения распределения скорости звука в жидкости / В.И. Бабий. – Оpubл. 06.01.86.
14. *Бабий В.И., Родионов А.А.* Спектральные отношения сигнал/шум в гидрофизике и гидроакустике // *Тр. XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. – СПб.: Нестор-История, 2014. – С. 335 – 337.
15. *Бабий В.И., Родионов А.А.* Флуктуации гидрофизических полей, обусловленные акустическими шумами океана // *Докл. РАН*. – 2014. – 456, № 1. – С. 106 – 110.
16. *Бабий В.И., Бабий М.В.* О низкочастотной фильтрации сигнала в гидрофизических измерителях скорости звука // *Системы контроля окружающей среды. Средства и мониторинг*. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – С. 70 – 72.
17. *Бабий В.И., Бабий М.В., Завьялов Д.Д.* Математическое моделирование измерителей состояния морской среды // *Международный научно-технический семинар «Морское и экологическое приборостроение»*. Сборник трудов. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1994. – С. 14 – 17.
18. *Бабий В.И., Бабий М.В., Завьялов Д.Д.* Математическое моделирование фокусирующих первичных измерительных преобразователей // *Там же*. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1995. – С. 84 – 85.
19. *Бабий В.И., Родионов А.А., Бабий М.В.* Перспективный оптико-акустический метод измерения параметров термодинамического состояния морской среды // *Тр. VIII Международной конференции «Современные проблемы оптики естественных сред (ONW-2015)»*. – СПб.: ЛЕМА, 2015. – С. 254 – 259.
20. *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)*. Т. 1. – М.: АПР, 2015. – С. 48 – 53.

Promising optical-acoustic method for measuring the parameters of the marine environment thermodynamic state. Errors' estimating

V.I. Babiy*, M.V. Babiy*, A.A. Rodionov**

**Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: marbab@yandex.ru*

*** Saint-Petersburg Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology,
Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia
e-mail: sPPP@spbrc.nw.ru*

The basis of the method under consideration consists in a concept of constructing a perfect hydrophysical meter of the fluid thermodynamic state parameters. The concept represents continuous simultaneous measurements of the light refractive index, the sound velocity and the pressure in a single volume of marine environment. The errors of direct and indirect measurements of the parameters of the marine environment thermodynamic state are estimated. A possible variant of implementing the optical-acoustic meter is proposed. Considered is the problem of decentralizing the standard base of such meters by creating a single special primary standard of units of sound and light velocities in transparent fluids with reference to the perfect easily-reproduced absolute checkpoint – light velocity in vacuum accepted as the word fundamental physical constant.

Keywords: seawater, state parameters, light velocity, sound velocity, pressure, quasi-perfect meter, measurement errors, single standard, decentralization.