

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ

Бабий В.И.

Морской гидрофизический институт НАН
Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

В соответствии с известным правилом фаз Гиббса число независимых переменных, необходимых и достаточных для полного описания состояния однофазной m -компонентной равновесной термодинамической системы, равно $m+1$. Сложность модели морской воды или число принимаемых в расчет компонентов m зависит от необходимой точности и подробности исследования её как термодинамической системы. Согласно гипотезе постоянства химического состава морской воды она рассматривается как двухкомпонентный раствор ($m=2$), для которого число независимых переменных равно трём. В традиционных гидрофизических СТД-зондах это прямо измеряемые: температура T , относительная электрическая проводимость σ_e и гидростатическое давление P . Однако, СТД-зондам присущи принципиальные недостатки, обусловленные инерционностью контактных датчиков T , различными величинами и формой объёмов пространственного осреднения датчиков T и σ_e , их пространственным разнесением, что приводит к существенным динамическим погрешностям при исследовании стратифицированных сред. Отмеченные недостатки устраняются в перспективных оптикоакустических измерителях термодинамического состояния (ИТС) морской воды, основанных на синхронной регистрации взаимодействия в едином объёме оптического и акустического излучений с морской средой [1,2]. Датчики таких ИТС относятся к параметрическим первичным измерительным преобразователям, которые излучают энергию, преимущественно диссипирующую в тепло в общем эффективном объёме, что приводит к возмущению исследуемой среды и, следовательно, к искажению результатов измерений. Поэтому при анализе результирующей погрешности измерения гидрофизических элементов необходимо учитывать эффект взаимодействия датчиков ИТС с исследуемой средой. Возможны два подхода к оценке погрешности. Один - экспериментальный (эмпирический), когда

ИТС представляют в виде "черного ящика" на входы которого подаются калиброванные воздействия, например, при метрологической аттестации, и регистрируют отклик, апостериорно определяя погрешность. Этот метод не позволяет оптимизировать параметры ИТС на стадии проектирования. Другой подход (рассматриваемый ниже) - теоретический, в основе которого лежит анализ физических принципов измерения, что позволяет создать математическую модель погрешности и оптимизировать параметры ИТС на стадии разработки, а соответствие расчетных оценок погрешностей действительным проверяется экспериментальным первым методом. Учитывая, что связь между прямо измеряемыми x_i и косвенно измеряемыми y_j гидрофизическими элементами описывается уравнениями состояния вида $y_j = f_j(x_i)$, определим погрешность ϵ прямо или косвенно измеряемого элемента как относительное отклонение измеренного значения (\sim) от истинного (действительного)

$$\epsilon_i = (\tilde{x}_i - x_i) / x_i$$

и

$$\epsilon_j = (\tilde{y}_j - y_j) / y_j = [f_j(\tilde{x}_i) - f_j(x_i)] / f_j(x_i),$$

где \tilde{x}_i - в ИТС могут быть скорость звука C , показатель преломления света n , электрическая проводимость σ_e , гидростатическое давление P ; а \tilde{y}_j - температура T , плотность ρ , солёность S , сжимаемость β и т.п. В области небольших отклонений элементов состояния от некоторых средних значений достаточно для оценки случайных погрешностей косвенно измеряемых элементов использовать первые частные производные соответствующих уравнений состояния. Так для оптикоакустического ИТС (при $m=2$) $\tilde{y}_j = f_j(C, n, P)$ и относительная средняя квадратическая погрешность косвенно измеряемого элемента

$$\sigma_j = \sqrt{\left[C \left(\frac{\partial y_j}{\partial C} \right) \epsilon_c \right]^2 + \left[n \left(\frac{\partial y_j}{\partial n} \right) \epsilon_n \right]^2 + \left[P \left(\frac{\partial y_j}{\partial P} \right) \epsilon_p \right]^2} / \tilde{y}_j \quad (1)$$

Как видно, в зависимости от измеряемого элемента (T , S , ρ или др.) вклад погрешностей прямо измеряемых элементов будет различен. Так, для T определяющим является C , а для S и ρ - n .

Рассмотрим воздействие основных внешних влияющих факторов - T , P и относительной скорости набегающего потока V , и внутренних - мощности

акустического W_0 и оптического W_n излучений и электрической мощности W_p датчика Р. Представим предельные относительные погрешности измерительных каналов оптикоакустического ИТС в виде:

$$\text{скорости звука } \varepsilon_c = \varepsilon_{vc} + \varepsilon_{tc} + \varepsilon_{wc} + \varepsilon_{oc},$$

$$\text{преломления света } \varepsilon_n = \varepsilon_{vn} + \varepsilon_{tn} + \varepsilon_{wn} + \varepsilon_{on}, \quad (2)$$

$$\text{давления } \varepsilon_p = \varepsilon_{vp} + \varepsilon_{tp} + \varepsilon_{wp} + \varepsilon_{op},$$

где первые члены обусловлены только скоростью \bar{V} , вторые - нагревом среды в общем эффективном объеме суммарным излучением средней мощностью W и

влиянием скорости потока \bar{V} , третьи - отношением сигнал/шум (зависят от W_i), четвертые слагаемые зависят от Т, Р и

других факторов, но не зависят от \bar{V} и W_i , (например, длина базы L , шум квантования и т.п.). Первые и вторые слагаемые в (2) можно отнести к

методическим погрешностям, а третьи и четвертые - к инструментальным. Если в оптикоакустическом ИТС используют

совмещенный с параметрическим датчиком С генераторный датчик Р, у которого $W_p=0$, то погрешностью ε_p можно пренебречь, оставив для рассмотрения в (1)

только ε_c и ε_n . В канале измерения С, использующем время-импульсный метод многократных отражений звука, первое

слагаемое в (2) будет $\varepsilon_{vc} = (|\bar{V}|/C)^2$, а в канале n, использующем лазерный

интерферометр, ε_{vn} практически равно нулю. Полагая, что вся энергия оптического и акустического излучений

диссипирует в тепло в едином эффективном объеме v совмещенного датчика ИТС, получим для продольного обтекания общей

измерительной базы L , составляющие погрешности, обусловленные нагревом среды:

$$\varepsilon_{TC} = \frac{1}{C} \cdot \frac{\partial C}{\partial T} \cdot \frac{W}{2\rho v q} \cdot \frac{L}{|\bar{V}|} = b_c \cdot \frac{W}{|\bar{V}|}$$

$$\varepsilon_{Tn} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \frac{W}{2\rho v q} \cdot \frac{L}{|\bar{V}|} = b_n \cdot \frac{W}{|\bar{V}|},$$

где $W = a_c W_0 + a_n W_n$ - суммарная средняя мощность акустического и оптического излучений, a_c и a_n - коэффициенты

заполнения, т.е. отношение длительности зондирующего излучения (импульса) к периоду повторения (для непрерывного излучения $a=1$), q - удельная теплоемкость

воды. Здесь величина L/\bar{V} есть время

облучения элементарного объема среды, а

$$\text{величина } \frac{W}{2\rho v q} \cdot \frac{L}{|\bar{V}|} \text{ есть повышение}$$

температуры среды за счет её объемного нагрева суммарным излучением. Как видим, слагаемые ε_{tc} и ε_{tn} зависят не только от параметров ИТС, но и от

термодинамических свойств исследуемой среды (температурные коэффициенты С и n). Заметим, что средние мощности оптического и акустического излучений в ИТС соизмеримы.

Слагаемые ε_{wc} и ε_{wn} в (2) имеют вид

$$\varepsilon_{wc} = \frac{\delta\tau}{\tau} = \frac{C}{2\pi f l k} \sqrt{\frac{W_{шс}}{W_c}} = d_c \frac{1}{\sqrt{W_c}},$$

$$\varepsilon_{wn} = \frac{\delta\varphi}{\varphi} = \frac{\lambda}{4\pi L n} \sqrt{\frac{W_{шн}}{\gamma W_n}} = d_n \frac{1}{\sqrt{W_n}},$$

где $\delta\tau$ - погрешность измерения интервала времени τ распространения звукового излучения частотой f на пути l , k - коэффициент ослабления зондирующего звукового сигнала по звуковому давлению при распространении по пути l , $W_{шс}$ - мощность шума, приведенная к

поверхности приемного ультразвукового преобразователя; $\delta\varphi$ - погрешность измерения набега фазы φ оптического излучения при распространении его на базе L , $W_{шн}$ - мощность шума фотоприемника, λ - длина волны оптического излучения в

вакууме, γ - коэффициент ослабления света по интенсивности.

В правильно сконструированном ИТС должны выполняться условия:

$$\varepsilon_{oc}^2 < \varepsilon_{vc}^2 + \varepsilon_{tc}^2 + \varepsilon_{wc}^2$$

$$\text{и } \varepsilon_{on}^2 < \varepsilon_{vn}^2 + \varepsilon_{tn}^2 + \varepsilon_{wn}^2.$$

С учетом вышеизложенного перепишем (2) в виде:

$$\varepsilon_c = \left(\frac{|\bar{V}|}{C}\right)^2 + b_c \frac{W}{|\bar{V}|} + d_c \frac{1}{\sqrt{W_c}} + \varepsilon_{oc}$$

$$\varepsilon_n = b_n \frac{W}{|\bar{V}|} + d_n \frac{1}{\sqrt{W_n}} + \varepsilon_{on}. \quad (3)$$

Эти выражения совместно с (1) допускают оптимизацию по \bar{V} , W_0 , W_n в зависимости от того, погрешность какого измеряемого гидрофизического элемента минимизируют.

Поэтому величины \vec{V} , W_c , W_n в реальном ИТС будут условно оптимальными, т.е. в зависимости от выбранного критерия будут являться компромиссом при определении, например, области неопределённости на T, S - диаграмме состояния морской воды. Для заданного измеряемого элемента соотношение между различными слагаемыми в (3) зависит, как от параметров ИТС (W_c , W_n), так и от режима измерений (\vec{V}). Анализ показывает, что ограничение максимальной скорости зондирования определяет член $(|\vec{V}|/C)^2$ в ϵ_c , особенно при косвенном измерении температуры, а минимальную скорость зондирования определяют члены

$$b_c \cdot \frac{W}{|\vec{V}|} \text{ и } b_n \cdot \frac{W}{|\vec{V}|},$$

характеризующие объёмный нагрев среды суммарным излучением. Для расширения диапазона скорости зондирования необходимо снижать мощность излучения W , при этом результирующая погрешность возрастает и преобладающим становится вклад членов $d_c / \sqrt{W_c}$ и $d_n / \sqrt{W_n}$.

Если в оптикоакустический ИТС добавить канал измерения электропроводности с совмещённым эффективным объёмом датчика Δe , то можно будет исследовать морскую воду как трёхкомпонентную термодинамическую систему ($m=3$), т.е. учитывать региональные особенности её состава. Тогда формулы (2) надо дополнить аналогичным выражением погрешности этого канала

$$\epsilon = \epsilon_w + \epsilon_T + \epsilon_w + \epsilon_e,$$

а в подкоренное выражение формулы (1) ввести дополнительное слагаемое

$$\left[x \cdot \left(\frac{\partial y_j}{\partial e} \right) \cdot \epsilon_{\Delta e} \right]^2$$

и решать задачу оптимизации для составляющих W и \vec{V} . При этом суммарная средняя мощность излучения

$$W = a_c W_c + a_n W_n + a_p W_p + a_{ee} W_{ee},$$

где W_{ee} - мощность электромагнитного излучения в среду датчиком Δe .

Таким образом, изложенный подход позволяет синтезировать оптимальный ИТС для заданных конкретных условий измерения.

Проведенный анализ результирующей погрешности перспективных оптикоакустических измерителей термодинамического состояния морской воды показывает, что специфические эффекты нагрева среды суммарным излучением и скорости набегающего потока в ИТС достаточно велики и накладывают определённые ограничения на мощность акустического и оптического излучений и на минимальную и максимальную скорость зондирования при измерениях, что должно быть принято во внимание, как при разработке ИТС, так и при их метрологической аттестации, проверке, сличениях, планировании и проведении наблюдений в натуральных условиях.

Литература

1. Бабий В.И. Способ измерения физических свойств жидкостей и устройство для его осуществления. - АС N1239586, БИ N23, 23.06.86.
2. Бабий В.И., Бабий М.В., Завьялов Д.Д. Математическое моделирование измерителей состояния морской среды. - "Морское и экологическое приборостроение". Сборник трудов. Севастополь, 1994, сс. 14-17.