

# ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА

В.И. Бабий

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г.Севастополь, ул.Капитанская, 2

Современные автоматизированные гидрофизические измерительные информационные системы мониторинга водной среды состоят из многоканальных измерительно-вычислительных комплексов, в которых первичные измерительные преобразователи (датчики) и промежуточные преобразователи подвергаются одновременно комплексному воздействию множества разнообразных влияющих факторов, как внешних, так и внутренних. Причем с повышением требований к точности измерений увеличивается количество влияющих факторов, подлежащих учету.

Селективность (избирательность) к прямо измеряемым физическим величинам и инвариантность гидрофизических средств измерений (ГФСИ) к воздействию влияющих факторов есть свойство идеальных или гипотетических измерителей [1]. В действительности абсолютная инвариантность (полиинвариантность), т.е. полная независимость результата измерения данной физической величины от всех влияющих факторов является математической абстракцией и не может быть осуществлена. Поэтому на практике рассматривают не абсолютную инвариантность, а квазиинвариантность как условие получения результата измерения с погрешностью, не превышающей некоторого наперед заданного значения в ограниченных областях сосуществования измеряемой физической величины и влияющих факторов.

В терминах метрологии [2] проблему инвариантности можно сформулировать как расширение (посредством совокупности соответствующих технических решений, средств и методов) нормальной области значений влияющих величин на всю область рабочих условий применения ГФСИ, включая предельные условия измерений. Следовательно, расширение нормальной области влияющих величин связано с уменьшением дополнительных погрешностей. Другими словами, это значит, что результирующая погрешность инвариантных ГФСИ существенно не изменяется во всей области рабочих и предельных условий применения, т.е. вклад дополнительной погрешности по сравнению с основной погрешностью должен быть незначителен.

Представим, как это принято, приведенную ко входу полную абсолютную погрешность конкретного экземпляра ГФСИ в реальных условиях его применения в виде суммы

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_d, \quad (1)$$

где  $\Delta$  - полная погрешность,

$\Delta_0$  - основная погрешность (при номинальных значениях влияющих величин),

$\Delta_d$  - дополнительная погрешность, вызванная отклонением влияющих величин от их номинальных значений.

Следовательно, разработка прецизионных ГФСИ состоит как бы из двух взаимосвязанных этапов. Первый заключается в минимизации  $\Delta_0$ , второй - в минимизации  $\Delta_d$ , с общей целью минимизации  $\Delta$ . Таким образом, разработка инвариантных ГФСИ есть один из основных путей их совершенствования и повышения точности и достоверности результатов измерений. В зависимости от задачи исследования (измерительной задачи) и имеющихся ресурсов формулируются требования к метрологическим и эксплуатационным характеристикам ГФСИ, выбирают принципы их работы и структуру, а

также математическую модель измерителя и модель его погрешностей. Посредством численного моделирования находят основные параметры ГФСИ и проводят их оптимизацию в соответствии с принятыми критериями. В океанографии и гидрофизике возможно создание, как универсальных средств измерений, работоспособных во всех мыслимых условиях применения, так и специализированных ГФСИ, предназначенных для исследования конкретных районов и глубин Мирового океана. Понятно, что универсальность достигается за счет ухудшения метрологических характеристик ГФСИ, поскольку при расширении области существования влияющих факторов и измеряемых физических величин увеличивается вклад дополнительной погрешности в полную погрешность.

Особенность современных ГФСИ состоит в том, что они являются аналого-цифровыми средствами измерения. В таких ГФСИ действие влияющих факторов на аналоговую и цифровую части проявляется по-разному. Если для аналоговой части изменения влияющих факторов в рабочей области приводят к дополнительным погрешностям, то для цифровой части эти воздействия влияющих факторов не должны сказываться на ее характеристиках. Т.е. в рабочей области условий применения ГФСИ цифровая часть должна быть всегда инвариантна к ним (работать без сбоев). В этом смысле цифровая часть есть пример абсолютно инвариантного устройства. Следовательно, проблема инвариантности ГФСИ к влияющим факторам сводится к проблеме инвариантности аналоговой части, включая и аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Отсюда следует важный вывод - рекомендация: желательно сократить и упростить аналоговую часть, приблизив, насколько возможно, цифровую часть к перви-

чным измерительным преобразователям.

Рассмотрим различные критерии инвариантности (квазиинвариантности) ГФСИ. Каждое из слагаемых в (1) содержит как систематическую, так и случайную составляющую погрешностей, причем одни влияющие факторы изменяют преимущественно систематическую составляющую  $\Delta_d$ , а другие - случайную составляющую  $\Delta_{d\sigma}$  дополнительной погрешности. В зависимости от цели измерения те или иные составляющие играют определяющую роль. Так при проведении абсолютных измерений важны систематические погрешности. Напротив, при относительных измерениях, например, при исследовании статистических характеристик мелкомасштабной структуры гидрофизических полей [3] преобладающее значение имеют случайные составляющие погрешности. В соответствии с этим возможны следующие критерии инвариантности, представляющие собой отношение максимального значения объединенной дополнительной погрешности к основной погрешности:

- для полной погрешности

$$\eta_0 = \frac{\max \Delta_d}{\Delta_0};$$

для систематических составляющих

$$\eta_s = \frac{\max \Delta_{ds}}{\Delta_{0s}} = \frac{\max M[\Delta_d]}{M[\Delta_0]};$$

- для случайных составляющих

$$\eta_\sigma = \frac{\max \Delta_{d\sigma}}{\Delta_{0\sigma}} = \frac{\max \sigma[\Delta_d]}{\sigma[\Delta_0]};$$

где  $M$  - математическое ожидание,

$\sigma$  - среднее квадратическое отклонение (СКО).

Выбор численных значений критериев инвариантности носит субъективный характер, поскольку сами погрешности имеют вероятностную природу и определяются также с погрешностями. Эти значения могут,

например, находиться в интервале  $0.1 \leq \eta \leq 1$ . Так, согласно рекомендациям ГОСТ 8.009-84 принят критерий малости вклада, при котором сумма всех наибольших возможных значений дополнительных погрешностей не превышает 0.2 суммы наибольших возможных значений остальных составляющих погрешности средства измерения в рабочих условиях применения. В другом источнике [4] приводится величина критерия  $\eta_0=0.5$ . Это говорит о том, что разделение полной погрешности на основную и дополнительную является условным и выбор в указанном интервале  $\eta$  численных значений критериев инвариантности определяется в каждом конкретном случае "волевым" решением, исходя из возможностей и задач эксперимента.

Существует несколько путей построения инвариантных ГФСИ.

п.1. Применение новых (нетрадиционных) принципов и методов на основе известных физических законов, например [5,6].

п.2. Традиционные конструктивно-технологические методы (пассивные, консервативные), использующие материалы, элементы и узлы высокого качества, имеющие стабильные параметры и высокую надежность.

п.3. Методы активной стабилизации параметров, включая системы автоматического регулирования.

п.4. Структурные методы на базе известных физических принципов, в том числе и схемные решения.

п.5. Структурно-алгоритмические методы, включая принцип многоканальности [7] с применением вычислителей (процессоров).

п.6. Комбинации вышеупомянутых методов.

Различают исправленные и неисправленные результаты измерений [2]. Неисправленные результаты получают по пп.1-4, а исправленные - по п.5. Напомним, что в понятие результата

измерений входит и оценка его погрешности.

Все ГФСИ хранят и воспроизводят с той или иной погрешностью единицы измеряемых физических величин, поэтому они обязательно содержат встроенные однозначные или многозначные меры ограниченной точности, на которые также воздействуют внешние и внутренние влияющие факторы. Мера имеет выход, но не имеет входа. Поскольку погрешности встроенных мер входят непосредственно в полную погрешность ГФСИ, то все упомянутые методы достижения инвариантности также относятся и к встроенным мерам.

Учитывая вышесказанное, рассмотрим принципы построения инвариантных гидрофизических гидроакустических измерителей скорости звука (ГИСЗ) как составной части перспективных многоканальных ГФСИ. Согласно физическому определению скорость звука  $C$  измеряют прямым методом в соответствии с классическими выражениями:  $C=dl/dt$  или  $C=\lambda f$ , где  $dl$ -элемент пути,  $t$  - время,  $\lambda$ -длина звуковой волны,  $f$  - частота звука. В конечных разностях  $C \approx L/\tau$ , где  $L$ -геометрическая длина (база),  $\tau$ -интервал времени, за который звуковая волна проходит в среде путь  $L$ . В рабочих ГИСЗ фиксируют базу  $L$  и измеряют интервал  $\tau$ , в эталонных - напротив, варьируют  $L$ . Поскольку скорость звука является производной единицей [2], образованной из основных единиц системы СИ - метра и секунды, то ГИСЗ должен содержать встроенные меры длины и времени (частоты).

Из всех средств измерения наивысшую точность имеет государственный эталон времени и частоты (относительная погрешность  $\sim 10^{-14} - 10^{-13}$ ). Учитывая, что скорость света в вакууме принята мировой константой, в принципе возможно создание единого эталона длины и времени (частоты) с соизмеримыми погрешностями, а, следовательно, в

далекой перспективе, и скорости звука. Необходимо отметить два фундаментальных подхода к мерам длины и частоты: микроскопический и макроскопический. Микроскопический основан на внутриатомных процессах, характеризуется высокой воспроизводимостью, точностью и инвариантностью к внешним воздействиям (лазеры, мазеры и т.п.). Макроскопический основан на законах термодинамики, использует различные свойства физических тел и позволяет создавать меры длины и времени (частоты) ограниченной точности, например, концевые меры, кварцевые генераторы и т.п. Настоящее развитие техники, в зависимости от измерительной задачи и ресурсов, позволяет использовать в рабочих ГИСЗ встроенные меры длины и частоты на той или другой основе (макро или микро).

Современные ГИСЗ строятся по магистрально-модульному принципу. Это значит, что измерительный канал содержит первичный измерительный преобразователь (ПИП) и контейнер с электронными схемами (промежуточными преобразователями и цифровым интерфейсом). Следовательно, встроенные меры длины и частоты пространственно разнесены, т.к. представлены разными звеньями измерительной цепи. Поскольку датчик С (ПИП), являющийся одновременно встроенной однозначной мерой длины, работает непосредственно в морской среде, то он подвергается наибольшему воздействию внешних влияющих факторов и его вклад в погрешность ГИСЗ является максимальным. Напротив, промежуточные измерительные преобразователи, интерфейс и встроенная мера частоты защищены от непосредственного воздействия окружающей среды прочным герметичным контейнером, благодаря чему воздействие внешних влияющих факторов очень ослаблено. Поэтому основное внимание при

рассмотрении вопроса инвариантности ГИСЗ уделяется датчикам скорости звука.

Для ГИСЗ наиболее существенными внешними влияющими факторами являются:  $T$  - температура морской среды;  $P$  - гидростатическое давление;  $V$  - скорость набегающего потока;  $\alpha^*$  - коэффициент поглощения звука. Эти факторы непосредственно влияют на датчик С. Кроме того, есть еще наиболее существенный внутренний влияющий фактор - время задержки  $\tau_0$ , т.е. время распространения сигналов в электроакустическом тракте. Само  $\tau_0$  входит аддитивно в информационный параметр и зависит от напряжения питания электронных схем и опосредствованно связано с температурой окружающей среды. Это же полностью относится к встроенной мере частоты ограниченной точности. Однако здесь проблем с инвариантностью нет, поскольку существующие промышленные малогабаритные и экономичные кварцевые генераторы имеют относительную нестабильность частоты менее  $1 \cdot 10^{-7}$  за год и температурный коэффициент  $\leq 1 \cdot 10^{-9} \text{K}^{-1}$ . При необходимости возможно улучшение этих показателей на два-три порядка применением, например, рубидиевых стандартов частоты.

Рассмотрим математическую модель ГИСЗ, учитывающую основные влияющие факторы. Обратная функция преобразования однонаправленного ГИСЗ имеет вид:

$$C = L / (\tau - \tau_0) - V_i, \quad (2)$$

где  $\tau$  - измеряемый интервал времени;  $V_i$  - проекция вектора скорости  $V$  на ось акустической базы  $L$ . При  $\tau_0 \ll \tau$  и  $V_i \ll C$  получим классическое выражение для идеального измерителя

$$C = L / \tau. \quad (3)$$

Условие  $\langle \tau_0 \rangle = 0$ , где  $\langle \rangle$  означает осреднение, может быть выполнено в ГИСЗ посредством временного разделения. В частности, это достигается

тем, что сигналы, соответствующие началу и концу интервала  $\tau$ , распространяются по одним и тем же звеньям схемы (тракта), так что средняя разность равна нулю. Однако остаются случайные флуктуации времени распространения сигнала в тракте (так называемое "дрожание" фронта - jitter), которые имеют такой порядок величин среднего квадратического отклонения: для быстродействующих компараторов напряжения (КН)

- микросхемы ТТЛ  $\sigma_{\tau} = 0.1 - 0.2$  нс,
- микросхемы ЭСЛ  $\sigma_{\tau} = 0.05 - 0.1$  нс,
- широкополосные операционные усилители (ОУ)  $\sigma_{\tau} = 0.02 - 0.05$  нс.

Надо различать погрешности формирования интервала  $\tau$  и погрешности его измерения. Так наряду с  $\sigma_{\tau}$  в погрешность формирования  $\tau$  входит случайная составляющая  $\sigma_c$ , обусловленная отношением напряжений сигнал/шум на входе компаратора КН. Систематическая погрешность из-за изменения амплитуды сигнала отсутствует (инвариантна к амплитуде), если срабатывание КН происходит в моменты перехода сигнала через нулевое значение, где его производная по времени максимальна. Случайная составляющая

$\sigma_c = [\omega(U_c/U_{\text{ш}})]^{-1}$  зависит от амплитуды сигнала  $U_c$ , поскольку напряжение шума  $U_{\text{ш}}$  можно положить неизменным. Здесь  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота сигнала. В свою очередь  $U_c \sim U_{\text{ж}} \cdot K_c \cdot K_{\text{п}}$ , где  $U_{\text{ж}}$  - амплитуда зондирующих импульсов,  $K_c$  и  $K_{\text{п}}$  коэффициенты передачи сигнала в среде и в приемном тракте соответственно. Заметим, что отношение сигнал/шум от  $K_{\text{п}}$  не зависит, т.к. шумы действуют на входе приемного тракта. Поддержание постоянства  $(U_c/U_{\text{ш}})$ , а следовательно постоянства  $\sigma_c$  при изменении затухания акустического сигнала в среде из-за поглощения звука возможно (см. п.3) посредством системы автоматического регулирования  $U_{\text{п}}$ . Однако, в этом не будет необходимости,

если, учитывая квадратичную зависимость  $\alpha(\omega)$  от частоты, выбрать такое ее значение, при котором изменения  $(U_c/U_{\text{ш}})$  становятся малы, а вклад приращения  $\sigma_c$  в случайную погрешность - несущественным.

Инвариантность ГИСЗ к скорости  $V$  обтекания потоком датчика  $C$  достигается многими путями. Наиболее подвержен влиянию  $V$  однонаправленный ПИП (рис.1), где проекция  $V_i$  входит прямо в измеряемую величину (2). Частичное ослабление влияния скорости потока получают конструктивным путем (п.2) посредством "П", "Z", "V" или им подобных конфигураций звуковых лучей в ПИП, которые реализуют с помощью отражателей звука [3].

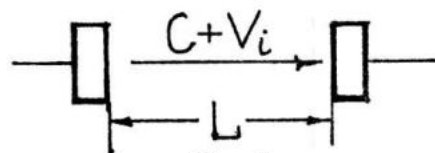


Рис.1

Почти полная компенсация  $V_i$  происходит в одно или двухбазовых ПИП (рис.2 и 3) с отражением звука в обратном направлении одним ультразвуковым преобразователем и общим приемным трактом [3,8]. Для них обратная функция преобразования есть  $C = \frac{2L}{\tau} \cdot \frac{1}{1-M^2}$ , где  $M = \frac{V_i}{C}$ .

Относительная дополнительная погрешность таких ГИСЗ равна  $M^2$ .

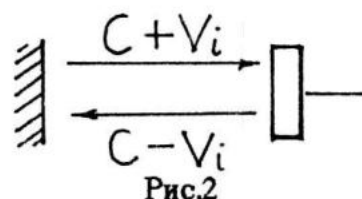


Рис.2

Если  $V_i \leq 1$  м/с, что характерно для зондирующих устройств, то  $M^2 < 10^{-6}$  и условие инвариантности выполняется. Однако, при увеличении  $V_i$ , например, при буксировке до 15-20 м/с,  $M^2 > 10^{-4}$  и дополнительная погрешность превысит в несколько раз основную. Это значит, что при буксировках на больших скоростях ГИСЗ с отра-

жением звука в обратном направлении перестает быть инвариантным к скорости потока.

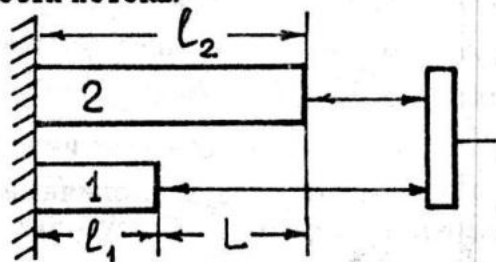


Рис.3

Радикально проблему инвариантности к  $V$  можно решить, используя структурно-алгоритмический способ (п.5). Согласно принципу многоканальности для исключения влияния  $V_i$  необходим, как минимум, еще один канал. В качестве такого канала могут быть использованы различные характеристики одного и того же датчика. Реализация этого принципа возможна в коллинеарных двухбазовых (рис.4) или однобазовых (рис.5) ГИСЗ с распространением зондирующих звуковых импульсов во

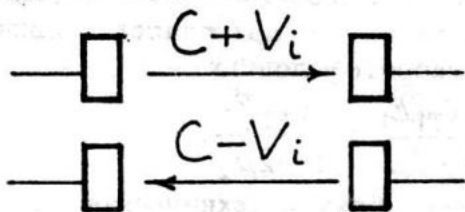


Рис.4

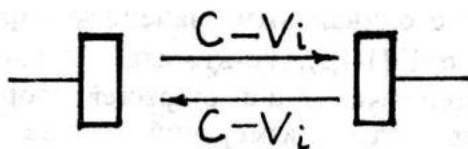


Рис.5

встречных направлениях с временным разделением преобразовательных звеньев и каналов. Функция обратного преобразования этих измерителей имеет вид:

$$C = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right),$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  времена распространения зондирующих импульсов в прямом и встречном направлениях. Формально

условие инвариантности таких ГИСЗ выполняется до  $V < C$ . Для полной компенсации  $V_i$  варианты рис.2 и 5 предпочтительны, поскольку они обеспечивают синхронное пространственное осреднение двумя каналами полей  $C$  и  $V$  в едином объеме среды, т.е. погрешность от неидентичности каналов отсутствует. Кроме того, можно дополнительно получить инвариантную к скорости звука  $C$  информацию о компоненте  $V_i$  согласно алгоритма

$$V_i = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right).$$

Рассмотрим принципы построения встроенной меры длины - акустической базы  $L$ , инвариантной к основным влияющим факторам - температуре  $T$  и гидростатическому давлению  $P$ . Поскольку все конструкционные материалы изменяют свои свойства и геометрические размеры под действием  $T$  и  $P$ , то, полагая функцию  $L=f(T,P)$  непрерывно дифференцируемой и ограничиваясь областью упругих деформаций, разложим ее в ряд Тейлора в окрестности номинальных значений:  $T_0=20^\circ\text{C}$  - комнатная температура;  $P_0=101.3\text{кПа}$  - нормальное атмосферное давление. Тогда, ограничиваясь членами второго порядка, получим

$$L=L(T,P) \approx L(T_0,P_0) \left[ 1 + \frac{1}{L_0} \frac{\partial L}{\partial T} (T - T_0) + \frac{1}{2L_0} \frac{\partial^2 L}{\partial T^2} (T - T_0)^2 + \frac{1}{L_0} \frac{\partial L}{\partial P} (P - P_0) + \frac{1}{2L_0} \frac{\partial^2 L}{\partial P^2} (P - P_0)^2 + \frac{1}{L_0} \frac{\partial^2 L}{\partial T \partial P} (T - T_0)(P - P_0) \right].$$

Здесь коэффициенты разложения имеют следующий физический смысл:  $\frac{1}{L_0} \frac{\partial L}{\partial T} = \alpha_T$  - температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР);  $\frac{1}{2L_0} \frac{\partial^2 L}{\partial T^2}$  - коэффициент, учитывающий температурную зависимость ТКЛР;

$$\frac{1}{L_0} \frac{\partial L}{\partial P} = \alpha_p \quad \text{-барический коэффициент сжатия базы;}$$

циент сжатия базы;

$$\frac{1}{2L_0} \frac{\partial^2 L}{\partial P^2} \quad \text{- коэффициент, учиты-$$

вающий нелинейность упругих деформаций (отклонение от закона Гука);

$$\frac{1}{L_0} \frac{\partial^2 L}{\partial T \partial P} \quad \text{-коэффициент, учиты-$$

вающий температурную зависимость модулей упругости.

Известно, что для стержней  $\alpha_p = -(1-2\mu)/E$ , где  $\mu$  - коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона),  $E$  - модуль упругости (модуль Юнга). Для базы, выполненной из однородного материала или из разных материалов с суммарными эффективными коэффициентами разложения, инвариантность в общем случае может быть выполнена по п.5, при использовании метода многоканальности, если ГИСЗ входит в состав ГФСИ, имеющих каналы измерения  $T$  и  $P$ . При этом коэффициенты разложения определяются в процессе метрологической аттестации ГИСЗ, а поправки в канале измерения  $C$  вводятся в реальном времени (исправленный результат). Однако, здесь остается динамическая погрешность, обусловленная тепловой инерцией конструкции базы  $L$ . Другой способ достижения инвариантности базы к температуре - тривиальный (по п.2), он состоит в использовании материалов с малым ТКЛР, например, кварцевого стекла, инваров, ситаллов, композитов и т.п., которые имеют  $\alpha_T \leq 1 \cdot 10^{-7} K^{-1}$ . При этом динамические погрешности малы, но зависимость от давления  $P$  остается. Поэтому для достижения инвариантности и к давлению необходим дополнительно канал измерения  $P$  (в соответствии с п.5), т.е. согласно п.6 используется комбинация п.2 и п.5.

Для одно- или двухбазового ГИСЗ (рис.3), где  $L = \ell_2 - \ell_1$ , возможна термокомпенсация согласно п.2 и п.4

традиционным методом. Ограничиваясь областью линейных удлинений стержней  $\ell_2$  и  $\ell_1$ , условие термокомпенсации записывается в виде:  $\alpha_{T1} \ell_1 (T - T_0) - \alpha_{T2} \ell_2 (T - T_0) = 0$  или  $\ell_1 / \ell_2 = \alpha_{T2} / \alpha_{T1}$ , где индексы 1 и 2 относятся к двум различным материалам стержней, образующих базу измерений.

Условие барокомпенсации запишем аналогично в виде:

$$\alpha_{P1} \ell_1 (P - P_0) - \alpha_{P2} \ell_2 (P - P_0) = 0$$

или

$$\frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{E_1 (1 - 2\mu_2)}{E_2 (1 - 2\mu_1)}$$

Объединяя эти два условия, видим, что полная баротермокомпенсация получается при условии

$$\frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{\alpha_{T2}}{\alpha_{T1}} = \frac{E_1 (1 - 2\mu_2)}{E_2 (1 - 2\mu_1)}, \text{ т.е. ме-}$$

ханические свойства используемых конструкционных материалов должны удовлетворять условию

$$\frac{\alpha_{T1} E_1}{1 - 2\mu_1} = \frac{\alpha_{T2} E_2}{1 - 2\mu_2}$$

Таким образом техническая задача полной термобарокомпенсации решается во-первых подбором материалов с одинаковым значением параметра  $\alpha_T E / (1 - 2\mu)$ , во-вторых выбором геометрических длин стержней, образующих базу измерений согласно

соотношению  $\frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{\alpha_{T2}}{\alpha_{T1}}$  или

$$\frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{E_1 (1 - 2\mu_2)}{E_2 (1 - 2\mu_1)} \quad \text{При этом}$$

$|\delta L / L| = 0$  и соответственно  $|\delta C / C| = 0$  также. Однако на практике полной термобарокомпенсации добиться не удастся, а только достигается выполнение условия  $|\delta L / L| < \epsilon_L$ .

Для исключения динамических погрешностей [9] в термостабилизированной и термобаростабилизированной

Таблица

Материал	Марка	$\mu$	1-2 $\mu$	d мм	$\alpha_T$	$\left  \frac{\Delta L}{L} \right  \cdot 10^5$
Титановый сплав	BT-14	0.36	0.28	13.3	84	84
Суперинвар	32НКД	0.29	0.42	16.3	10	10
Кварцевое стекло	КВ	0.18	0.64	20.2	5	5
Ситалл	С0115М	0.22	0.56	18.8	1	1

где  $\alpha_T$  - температурный коэффициент линейного расширения в ед.  $10^{-7} \text{K}^{-1}$ . В последней колонке таблицы приведены оценки относительной погрешности длины базы  $L$  (а, следовательно, и  $C$ ) для диапазона температур  $-5 + 95^\circ \text{C}$ ,

где  $\left| \frac{\Delta L}{L} \right| = \alpha_T \Delta T$ ,  $\Delta T = 100 \text{K}$ .

Выше были рассмотрены способы и методы достижения инвариантности  $L$  на основе макроскопического подхода. А теперь рассмотрим принципиально другой - микроскопический подход с применением малогабаритных стабилизированных лазеров, воспроизводящих длину световой волны с относительной погрешностью не хуже  $10^{-8}$ .

Дальнейшее уменьшение погрешности по п.1 возможно путем прямого контроля длины базы  $L$  в процессе измерения  $C$ , например, посредством оптического интерферометра [5]. При этом изменение длины базы  $L$  выражается в долях интерференционной полосы между световыми пучками так, что

$$L = L(T, P) = L(T_0, P_0) - \lambda/2 \cdot (\Delta\varphi - \Delta\varphi_0),$$

где  $\lambda$  - длина световой волны источника света (лазера),  $\Delta\varphi$  - полная разность фаз,  $\Delta\varphi_0$  - начальная разность фаз между световыми пучками при  $T = T_0$  и  $P = P_0$ . Тогда скорость звука рассчитывается в вычислителе по формуле

$$C = 2[L(T_0, P_0) - \lambda/2 \cdot (\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)]/t.$$

Оценим величину погрешности на конкретном примере. Пусть  $\delta\varphi \leq 0.01$  интерференционной полосы,  $L(T_0, P_0) = 0.1 \text{ м}$  и  $\lambda = 0.63 \text{ мкм}$ . Для этих значений получим

$$\left| \frac{\delta C}{C} \right| = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\delta\varphi}{L} \approx 3 \cdot 10^{-8}, \text{ что дает}$$

для  $C = 1500 \text{ м/с}$  оценку абсолютной погрешности измерения скорости звука  $\delta C \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$  во всей области изменения  $T$  и  $P$ .

Преимущества непрерывного непосредственного контроля длины базы  $L$  в момент измерения  $C$  очевидны, поскольку при этом устраняются еще и погрешности, не учитываемые при макроскопическом подходе. К ним относятся изменение  $L$  из-за старения материалов, изменения ТКЛР и модулей упругости, термического и барического гистерезиса, динамические погрешности, обусловленные тепловой инерцией базы. Эти преимущества посредством реализующих их ГИСЗ позволят уточнить в лабораторных и натуральных условиях региональные уравнения состояния и формулы скорости звука, особенно при больших давлениях (глубинах). Наиболее



базах необходимо еще выполнить условие  $\tau_{L1} = \tau_{L2}$ , где  $\tau_{L1}$  и  $\tau_{L2}$  - постоянные тепловой инерции стержней 1 и 2.

Рассмотрим по п.1 вариант технического решения полной барокомпенсации (баростабилизации) длины акустической базы ГИСЗ. Принцип полной баростабилизации заключается в трансформации компонент внутренних механических напряжений материала базы таким образом, чтобы при ее объемной деформации один из размеров (длина) оставался неизменным [6]. Известно, что в объемно-напряженном состоянии относительное удлинение стержня вдоль его оси OX дается выражением  $\epsilon_x = \Delta L/L = [\sigma_x - \mu\sigma_y - \mu\sigma_z]/E$ , где  $E$  - модуль Юнга;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  - компоненты напряжений вдоль координатных осей стержня. Из этого выражения следует, что  $\Delta L=0$  при  $[\sigma_x - \mu\sigma_y - \mu\sigma_z]=0$ . Следовательно при полной барокомпенсации должно выполняться следующее соотношение между компонентами напряжений:  $\sigma_x = \mu(\sigma_y + \sigma_z)$ . Если на боковую поверхность стержня воздействует исследуемая среда под давлением  $P$ , то  $\sigma_y = \sigma_z = P$  и  $\sigma_x = 2\mu P$ . Это и есть условие полной барокомпенсации, т.е. инвариантности геометрической длины базы ПИП к давлению исследуемой среды  $P$ . Преимущества такого способа барокомпенсации состоят в том, что в выражение входит только один параметр  $\mu$  - константа, практически не зависящая от температуры (в отличие от других способов, куда входит модуль Юнга  $E$ ), возможность изготовления базы из одного материала (моноблок), а также независимость от  $L$ . Реализация

этого принципа возможна множеством вариантов конструкций первичного измерительного преобразователя скорости звука. Для примера на рис.6 приведен вариант выполнения термобаростабилизированной базы с радиальным (или торцевым) уплотнением компенсатора.

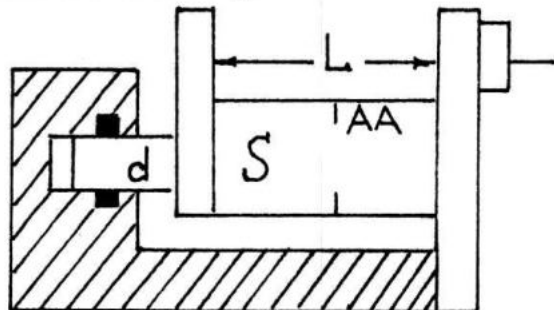


Рис.6

Система барокомпенсации работает следующим образом. Пусть  $S$  - суммарная площадь поперечного сечения стоек (сигалловых стержней), см. рис.6 сечения AA, а компенсатор давления на отражателе 2 имеет диаметр  $d$ . Тогда напряжение  $\sigma_x = (S - \pi d^2/4)P/S$  и условие барокомпенсации для конструктивных параметров запишется в виде  $\frac{\pi d^2}{4S} = 1 - 2\mu$ . Подгонка осуществляется изменением  $d$  и (или)  $S$ .

В качестве примера рассмотрим варианты выполнения стержней базы из некоторых материалов. Пусть суммарная площадь стержней  $S = 5 \text{ см}^2$ , (см. рис.6 сечение AA). Тогда диаметр компенсатора определяем из выражения  $d = 2\sqrt{\frac{1 - 2\mu}{\pi} S}$ . Результаты оценок величины  $d$  приведены в таблице.

естественно эти технические решения осуществить в оптико-акустических измерителях термодинамического состояния морской среды с единым объемом пространственного осреднения [10], где данные канала измерения базы  $L$  лазерным интерферометром используются одновременно как для введения поправок в канале скорости звука, так и в канале показателя преломления света.

Дальнейшим развитием этого метода может быть следящая система автоматического поддержания постоянства  $L$  по п.3 посредством исполнительных устройств типа

магнито- или электро-стрикторов, для которых управляющим сигналом является разность фаз лазерного интерферометра, измеряющего текущую величину  $L$ .

Рассмотренные принципы инвариантности были реализованы в различных конструкциях датчиков  $S$  и измерителях скорости звука (рабочих, образцовых и эталонных), созданных в МГИ НАНУ. Эти принципы могут быть использованы и при разработке перспективных ГФСИ, в частности, инвариантных оптикоакустических измерителей параметров термодинамического состояния морской среды.

### Литература

1. Кулебакин В.С. О применимости принципа абсолютной инвариантности в физических реальных системах. - ДАН СССР, 1948, т.60, N 2, с.231-234.

2. Основные термины в области метрологии: Словарь-справочник. Под редакцией Ю.В.Тарбеева. - М.: Издательство стандартов, 1989.-113с.

3. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. - Л.: Гидрометеониздат, 1983.-200с.

4. Цейтлин Я.М. Нормальные условия измерений в машиностроении. - Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1981.-224 с.

5. Авторское свидетельство СССР N 1538057, БИ N 3, 23.01.1990.

6. Авторское свидетельство СССР N 1608433, БИ N 43, 23.11.1990.

7.Петров Б.Н., Викторов В.А., Лукин Б.В.,Совлуков А.С.-//Принцип инвариантности в измерительной технике.-М.: Наука, 1976.-240с.

8. Бабий В.И. Анализ погрешности измерителя скорости звука в воде. - Международный научно-технический семинар "Морское и экологическое приборостроение". Сб. трудов. Севастополь, 1995.с.78-79.

9.Бабий В.И. Динамические характеристики термокомпенсированных датчиков скорости звука в воде.- В кн.: Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря. Севастополь, 1997.с.162.

10.Авторское свидетельство СССР N 1239586, БИ N23, 23.06.1986.