

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛОГРАФА СКОРОСТИ ЗВУКА И КОРРЕКЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

А.Н. Греков, Н.А. Греков, Ю.Е. Шишкин

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: ngrekov@nt.ru

В статье рассмотрены метрологические и пространственно-временные характеристики профилографа скорости звука. Подробно рассмотрен датчик скорости звука, исследован его водообмен в измерительной базе при зондировании с различными скоростями. Разработана динамическая коррекция вертикальных профилей, связанная с движением прибора. Приведены профили скорости звука, в которых прослеживается их слоистость с вертикальными масштабами в несколько сантиметров. Даны рекомендации по использованию прибора в натуральных условиях с борта судна.

Ключевые слова: температура, скорость звука, метод, соленость, погрешность, моделирование, динамические характеристики, градиент.

Введение. До недавнего времени исследования вертикальной структуры скорости звука основывались на косвенных методах измерения (температуры, электропроводности, давления).

Используя температуру, электропроводность, давление и уравнения состояния для морских вод [1], рассчитывалась относительная соленость, а с учетом поправки определялась абсолютная соленость, и, в дальнейшем, по известным уравнениям [2] определялась скорость звука.

Однако с развитием техники, наряду с косвенными методами, были разработаны и прямые, основанные на измерении времени прохождения высокочастотного акустического сигнала на эталонной базе. Контактные измерения скорости звука обладают высокими метрологическими характеристиками и позволяют исследовать мелкомасштабную структуру скорости звука.

При изучении физических процессов в океанах необходимо учитывать динамические характеристики профилографов, которые возникают из-за вертикальных и горизонтальных смещений приборов, вызванных волновой качкой, дрейфом судна и подводными течениями, а также пространственно-временными характеристиками датчиков и стратификацией морской воды.

Учету динамических погрешностей морских приборов посвящено много работ, в то же время, при измерении SVP

профилографами не изучены их возможности при исследовании, например, тонкой структуры.

При расчете плотности, солености динамическое рассогласование измерительных каналов профиломеров приводит в зонах высоких градиентов к появлению ложных структур.

Не все данные тонкой структуры могут быть восстановлены из необработанных измерений, поэтому некоторые исследователи предлагают устранение эффектов движения зондов с помощью специальной лебедки с обратной связью.

Используемый для измерений температуры, давления и скорости звука каждый SVP прибор имеет свои технические особенности. Если сравнивать SVP приборы различных производителей, имеется ввиду Valeport и т.д., и при заявленной погрешности измерительных каналов, которые определяются в лабораторных условиях в статических режимах, в натуральных условиях методические погрешности могут превышать 100%.

Поэтому при проведении натуральных наблюдений в океанах необходимо для каждого типа прибора иметь свою методику измерения. В частности необходимо контролировать колебания при погружении прибора, где большие вертикальные градиенты исследуемой среды, учитывать механизмы изменения температуры воды вблизи контейнеров приборов, а также оценивать захват воды из близлежащих слоев.

Рассмотрим технические возможности измерительного канала скорости звука прибора ИСЗ-1 [3]:

- частота опроса измерительного канала 18 Гц;
- длина измерительной базы датчика скорости звука 6 см;
- погрешность измерения скорости звука в статическом режиме 0,02 м/с;
- частота излучаемых радиоимпульсов 2 МГц.

Градуировка канала скорости звука проводится в лабораторных условиях при нормальном атмосферном давлении с применением образцового термометра 0,01°C в дистиллированной воде. По известной зависимости скорости звука от температуры в дистиллированной воде (формула Дель-Гроссо) рассчитывается скорость звука, которая приравнивается выходному коду измерительного канала.

При измерении вертикальной структуры поля скорости звука прибором ИСЗ-1 необходимо знать: пространственно-временные характеристики датчика скорости звука, его положение в пространстве во время зондирования и скорость погружения.

Пространственный масштаб датчика скорости звука определяется измерительной базой и диаметром пьезокерамики, в нашем случае $l = 6$ см, $d = 1$ см.

В зависимости от пространственного расположения датчика относительно набегающего потока минимальная толщина измеряемого слоя может составлять от 1 см.

Еще один важный параметр, возникающий при зондировании прибором, – это водообмен между измерительной базой и окружающей ИСЗ-1 морской водой.

Для исследования водообмена была создана модель датчика скорости звука с обозначенными точками замера на оси измерительной базы. Размеры модели соответствовали реальному датчику скорости звука, установленному в корпусе ИСЗ-1 (рис. 1, а).

Используя 6 точек, расположенных на оси измерительной базы датчика, рассчитывалась скорость водообмена отно-

сительно внешнего потока при изменении угла набегающего потока.

Величина водообмена рассчитывалась для измерительной базы как среднее от величины скорости потока для 6 точек (1)

$$\bar{V}_{cp} = \sum_{n=1}^6 V_{in}. \quad (1)$$

На рис. 1, б, в, г показаны результаты моделирования обтекания датчика скорости звука совместно с герметичным контейнером ИСЗ-1 при различных углах набегающего потока.

Рис. 1, б соответствует режиму подъема или погружения прибора при горизонтальном расположении его относительно вертикальной оси, на рис. 1, в показан водообмен в измерительной базе при вертикальном погружении профилографа (направление потока 0°), рис. 1, г соответствует режиму подъема профилографа (направление потока 180°).

Как видно из графика рис. 2 скорость водообмена может колебаться в пределах от 0,14 до 0,83 м/с и время водообмена может изменяться от 0,02 до 0,4 с, что соответствует величине измеряемого слоя от 3 до 60 см при скорости набегающего потока, равного 1,5 м/с.

Как мы уже отмечали, в реальных условиях при зондировании с борта судна возникают методические погрешности, которые необходимо устранять.

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные в 39-м рейсе НИС “Профессор Водяницкий” прибором ИСЗ-1.

На рис. 3, а представлен график зависимости скорости звука от глубины. На графике видно, что построенный профиль скорости звука, особенно в поверхностном слое, имеет размытую область значений. Выделение из этой области истинного значения скорости звука простыми методами фильтрации не даст должного результата. Исследуем этот вопрос. Построим по экспериментальным данным зависимость скорости погружения от глубины. На графике рис. 3, б видно, что измеритель ИСЗ-1 в восьмиметровом слое совершил колебательно-круговые движения по вертикали.

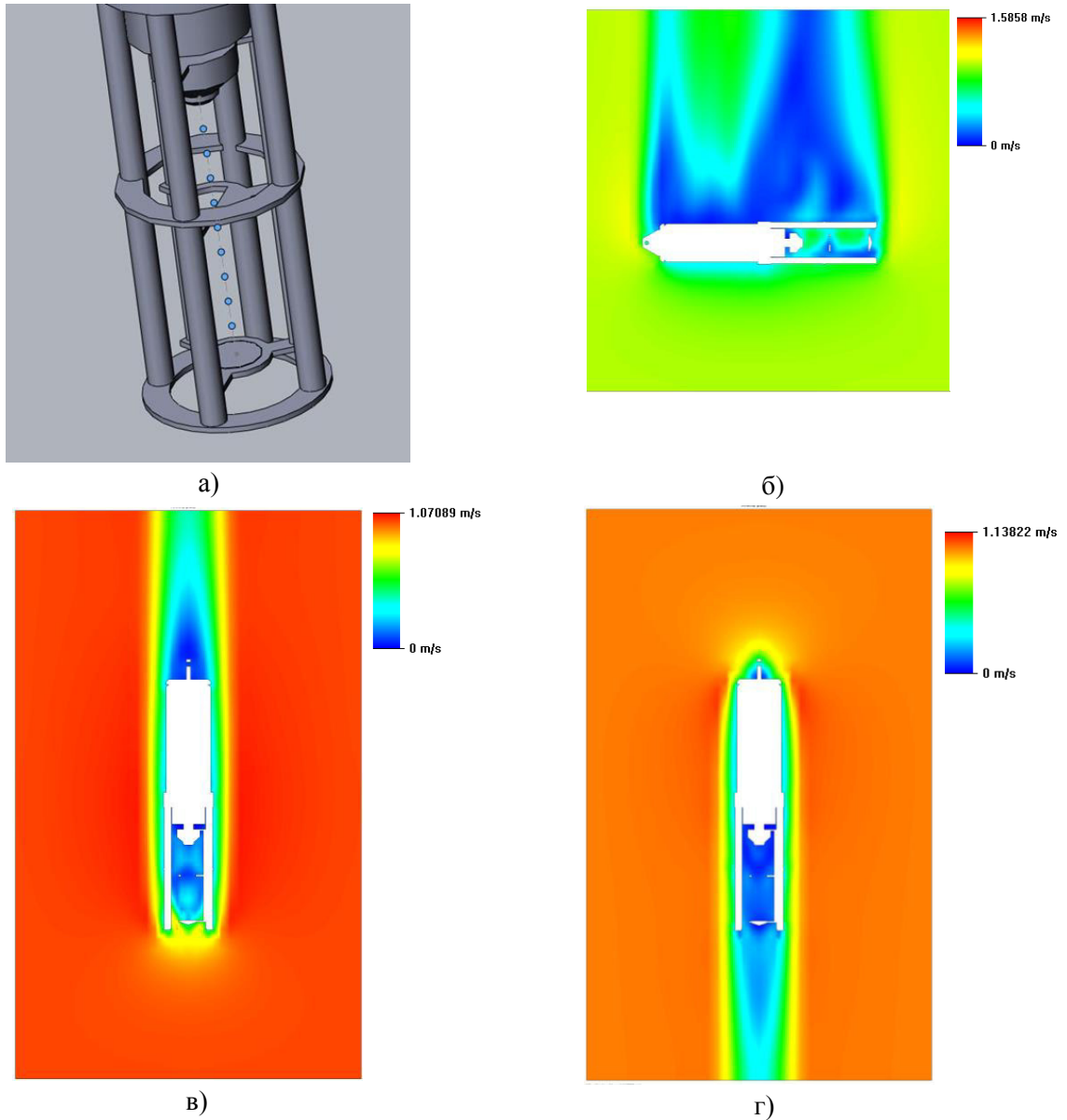


Рис. 1. Модель измерителя и распределение скоростей обтекания жидкостью прибора ИСЗ-1:

а) модель датчика скорости звука с обозначенными точками замера; б) распределение скоростей обтекания при горизонтальном расположении прибора ($\varphi = 90^\circ$) относительно вертикального зондирования; в) распределение скоростей обтекания при вертикальном расположении прибора относительно оси зондирования при погружении ($\varphi = 0^\circ$); г) распределение скоростей обтекания при вертикальном расположении прибора относительно оси зондирования при подъеме ($\varphi = 180^\circ$)

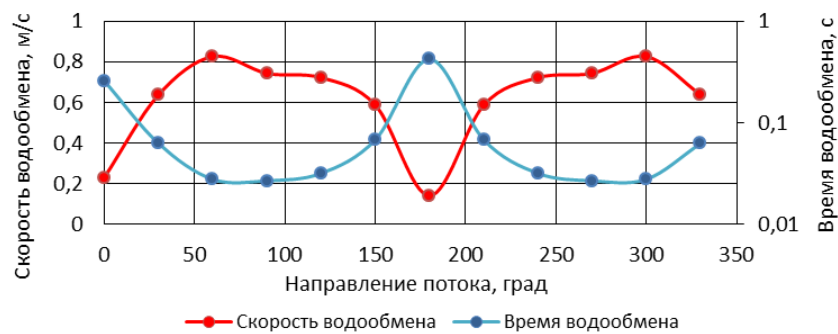


Рис. 2. График зависимости времени и скорости водообмена в измерительной области датчика от угла и скорости набегающего потока, величина которого равна 1,5 м/с

Эти искажения вызваны качкой судна и проявляются в виде одного или нескольких накладывающихся колец, ко-

торые легко можно увидеть на графике зависимости скорости погружения от глубины погружения (рис. 3, б).

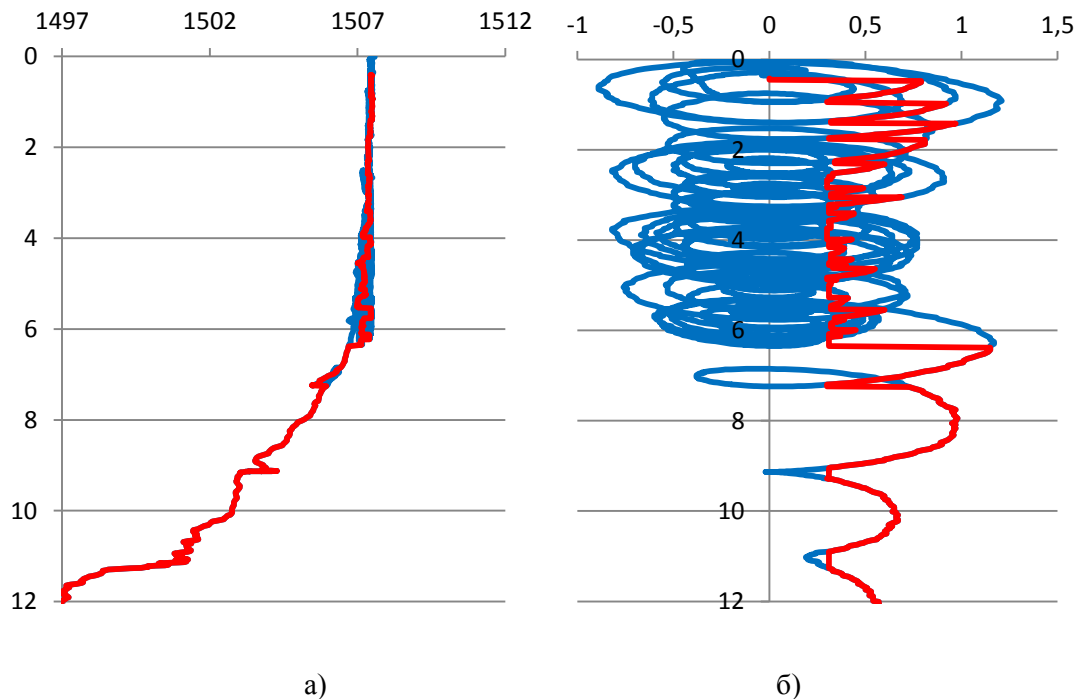


Рис. 3. Экспериментальные данные, полученные в 39-м рейсе ЯСМ ч НИС “Профессор Водяницкий” прибором ИСЗ-1:
 а) зависимость скорости звука от глубины (синяя кривая), после обработки (красная кривая);
 б) график зависимости скорости погружения от глубины погружения (синяя линия), после обработки (красная кривая)

Существует ряд работ, в которых раскрыта проблема удаления одиночных петель [4], однако по-прежнему актуальной является проблема удаления множество пересекающихся и в том числе вложенных циклов. Предлагаемый ниже алгоритм предназначен для уменьшения всплесков на графике скорости звука, полученном по данным SVP зонда. Одним из вариантов решения поставленной задачи является удаление множества данных, соответствующих любому восходящему движению зонда, оставляя только нисходящее, однако этот подход создает новую проблему появления новых всплесков. Данная проблема не столь актуальна, например, для STD зондов, оснащенных помпой, где поддержан стационарный поток, например, в SeaBird, но такое решение также имеет свои недостатки. Поэтому проблема игнорирования данных полученных при

недостаточном обмывании датчика остается актуальной.

Рассмотрим алгоритм редактирования данных, содержащих одиночные и вложенные петли. В достаточно общем виде множество данных измерений представим в виде кортежа

$$M_n = \langle P, T, C, Z, V \rangle,$$

где P – гидростатическое давление; T – температура среды; C – скорость звука в среде; Z – время измерения; V – скорость погружения.

Введем ограничения:

$$P' \geq P_{\text{нор}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{нор}}$ – пороговое значение, характеризующее скорость погружения, обеспечивающую достаточное обтекание датчиков; $Z' = \text{const}$ как требование к равномерному осуществлению отсчетов времени.

Выполним выборку подмножества K из непустого множества M таким образом, чтобы ее элементы удовлетворяли требованию:

$K_i = M_i$ при условии $K_{i-1} \neq 0$, $K_{i-1} \langle P \rangle \leq K_i \langle P \rangle \forall i \in [0; |K|]$, и в силу ограничения (2) имеет место следующее: элементы $K_i = 0 \forall i \in [0; |K|]$ заменяются на значения соседних $K_{i-1} \neq 0$ и $K_{i+1} \neq 0$ таким образом, чтобы все нулевые элементы получили значения, описываемые регрессионным уравнением второго порядка, проходящим между двумя ближайшими соседними ненулевыми точками.

Применив описанный алгоритм к искаженному профилю, показанному на рис. 3, б (синяя кривая), получим скорректированный профиль (красная кривая).

После устранения искажений, вызванных качкой судна, получен неискаженный профиль скорости звука (рис. 3, а, красная кривая).

Вторая задача, которую необходимо было решить – это коррекция динамической ошибки, возникающей из-за инерционности датчика температуры.

Сложность корректировки данных заключается в том, что датчик температуры является инерционным звеном, и для его коррекции необходимо знать величину постоянной времени датчика τ , однако, постоянная времени τ зависит от скорости набегающего потока и расположения датчика температуры к потоку.

Разработанный нами метод коррекции заключается в том, что используя практически безинерционные данные по скорости звука и инерционные данные по температуре, мы восстанавливаем профиль температуры.

С учетом технических характеристик прибора принимаем, что температурный канал SVP зонда может эффективно обрабатывать изменение температуры, градиент которого не больше чем $T_{\text{доп}}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$), при этом значение его составляет $0,05^{\circ}$ и определяется экспериментально для конкретного прибора.

Возьмем исходные профили температуры и скорости звука (рис. 4, а, б) и для устранения случайных выбросов температуры и скорости звука сгладим эти профили фильтром скользящего среднего с шириной окна 0,05 м.

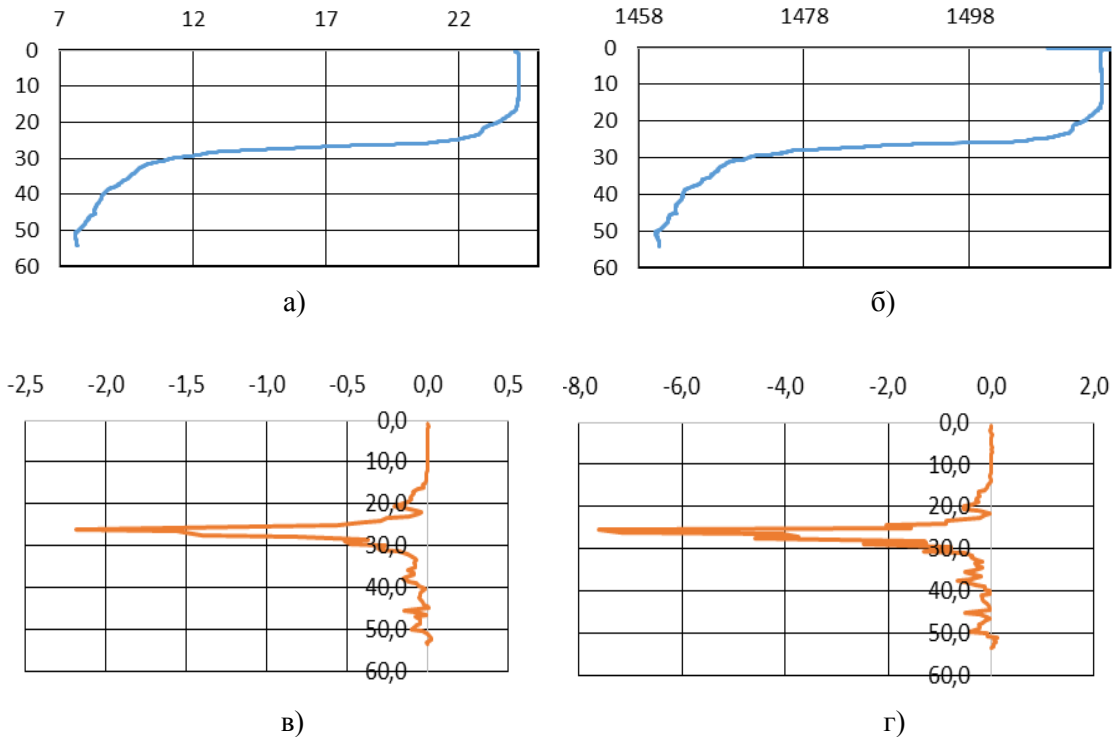


Рис. 4. Измеренные профили температуры (а), скорости звука (б) и их вертикальные градиенты: скорости звука (в) и температуры (г)

Найдем значения градиентов температуры T' и скорости звука C' с шагом 0,05 м в точках 0; 0,05; 0,1 м и т.д.

На рис. 4, в, г представлены графики градиентов температуры (в) и скорости звука (г), рассчитанные для экспериментальных профилей (рис. 4, а, б).

Используя граничное значение градиента температуры $T'_{дон}$, разобьем множество T' на два непересекающихся подмножества Tc' и Ti' , определенных граничными диапазонами $A = \langle i_{нач}, i_{кон} \rangle$ и $B = \langle j_{нач}, j_{кон} \rangle$, такие, что

$$\begin{cases} T'_i \leq T'_{дон} & \forall i \in Tc' \\ T'_j > T'_{дон} & \forall j \in Ti' \end{cases}$$

Каждому диапазону из подмножества B поставим в соответствие диапазон взятый из множества C' , выполнив предварительно преобразование

$f: C' \rightarrow Cn'$, такое, что удовлетворяет условию:

$$\int Cn' = \int T', \quad (3)$$

пусть $f(x) = ax + b$, тогда при заданном начальном $- T_0$ найдем первообразную $F(Cn')$, для чего зададим начальное значение $F(Cn')_0 = T_0$ и в силу (3) очевидно, что $F(Cn')_{кон} = T_{кон}$.

На рис. 5, а представлены участки профилей температуры в зоне максимальных градиентов. Сплошной синей линией показан исходный профиль температуры, красной линией – профиль температуры после применения описанного алгоритма обработки.

Для наглядности на рис. 5, б представлен график разности температур этих профилей, где максимальное расхождение температур достигает 1,4°C в зонах максимальных градиентов температур.

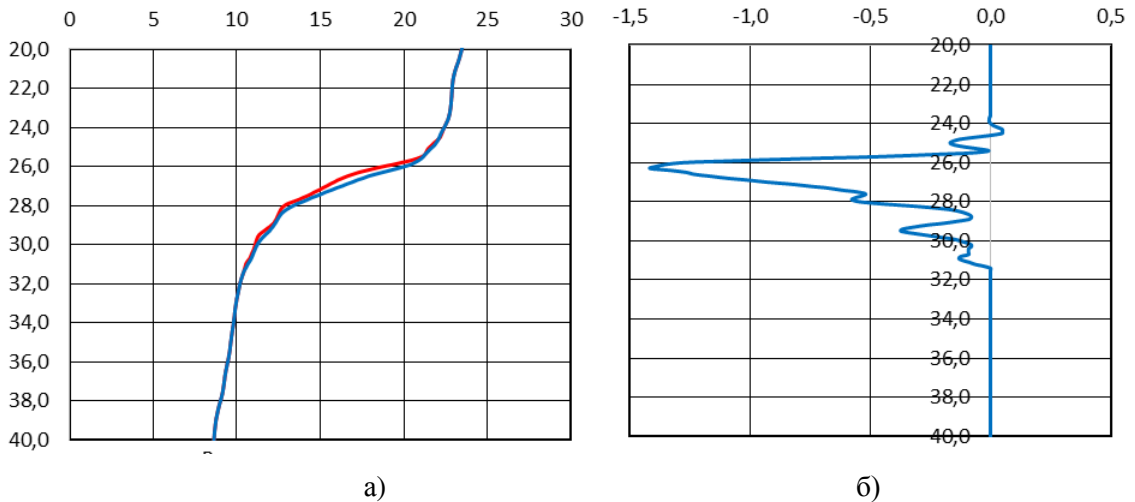


Рис. 5. Профили температуры измеренный (синий), восстановленный (красный) (а) и разность температур между ними (б)

Вычислим профиль солёности в соответствии с уравнением TEOS-10, используя в качестве входных данных профиль скорости звука и профиль скорректированной температуры. На рис. 6

представлены профили солёности. Синей линией показан профиль солёности без коррекции значений температур, красной линией – профиль солёности с откорректированной температурой.

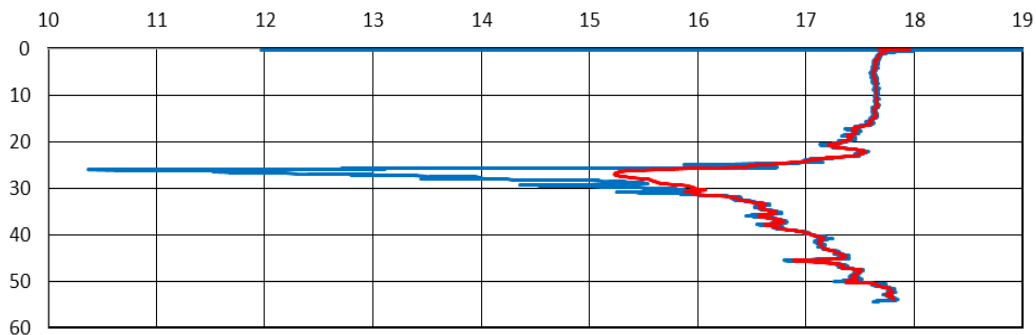


Рис. 6. Профили солёности (синий) – без коррекции, (красный) – с коррекцией

Выводы. В результате проведенных исследований характеристик профилографа скорости звука (ИСЗ-1) получены величины водообмена для различных углов и скоростей набегающего потока. Даны рекомендации по оптимальному расположению измерителя относительно осей координат во время зондирования.

Осреднения по вертикали профиля скорости звука может находиться в пределах от 0,01 до 0,7 м в зависимости от угла расположения измерителя к набегающему потоку.

Разработан и исследован метод коррекции вертикального профиля скорости звука, полученного во время вертикального зондирования при качке судна, что позволяет устранить неоднозначности в измеренном профиле скорости звука;

Разработан и исследован метод коррекции профиля температуры, искажение в котором вызваны инерционными свойствами датчика температуры, а также его колебаниями в измеряемой среде.

Применение предложенных методик обработки данных измерений для профилей температуры и скорости звука позволило получить корректные расчетные значения профилей плотности и солёности. Кроме этого, правильное расположение профилемера при зондирова-

нии и учет скорости зондирования позволяет исследовать тонкую структуру вплоть до 2 см по вертикали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English), 196 pp.*

2. *Leroy C.C., Robinson S.P., Goldsmith M.J. A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans // The Journal of the Acoustical Society of America. 2008. Т. 124. № 5. С. 2774–2782.*

3. *Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Профилографы скорости звука и алгоритм определения плотности воды для океанографического диапазона // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2017. Вып. 8 (28). С. 11–15.*

4. *Christian de Moustier. Removal of nested heave loops from depth profiles of seawater conductivity and temperature. 2016. P. 1–3. 10.1109/OCEANS.2016.7761422.*

INVESTIGATION OF A SOUND SPEED PROFILOGRAPH CHARACTERISTICS AND CORRECTION OF MEASUREMENT RESULTS

A.N. Grekov, N.A. Grekov, Y.E. Shishkin

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

The metrological and space-time sound velocity characteristics of the profilograph are considered in the article. The sound speed sensor is considered in detail, its water exchange in the measuring base at various immersion velocities has been studied. A dynamic correction of the vertical profiles, connected with the movement of the device, has been carried out. The profiles of sound velocity in which their vertical stratification of the order of several centimeters are given. Recommendations on the use of the instrument in full-scale conditions from the shipboard are given.

Keywords: temperature, sound speed, method, salinity, error, modeling, dynamic characteristics, gradient