

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ПРИБОРА В МОРЕ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ

В.А. Гайский

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

Предлагается при зондировании вод измерять одновременно гидростатическое давление и локальную плотность воды и вычислять глубину погружения прибора как сумму отрезков расстояний, полученных из деления приращения давлений на произведение средней локальной плотности на отрезке между отсчетами давления и ускорения силы тяжести. Результат не зависит от скорости зондирования и отклонения от вертикали. Метод пригоден для определения отклонения движения подводного аппарата или буксируемого прибора от заданной глубины. За счет усреднения случайных погрешностей измерения и аддитивной случайной помехи может быть достигнута гарантированная точность порядка 10^{-4} .

Ключевые слова: глубина погружения, гидростатическое давление, локальная плотность.

Поступила в редакцию: 28.09.2022.

Введение. Известны способы определения глубины приборов в море по измерениям гидростатического давления. Например, достаточно подробный обзор этих способов приведен в работе [1]. Эти способы основаны на уравнении гидростатики, связывающим гидростатическое давление $P(z)$ на глубине z с профилем плотности $\rho(z)$ и значением ускорения силы тяжести $g(\varphi, z)$, зависящим в свою очередь от географической широты φ и глубины z , и имеющим вид

$$P(z) = P_a + \int_0^z g(\varphi, z) \rho(z) dz, \quad (1)$$

где P_a – атмосферное давление, которое измеряют или принимают, причем в океанографии принимают

$$P_a = 0,101326 \text{ МПа.}$$

Поскольку профиль $\rho(z)$ априорно неизвестен, то принимают некоторые модели среды и устанавливают расчетные зависимости $P(z)$ или $z(P)$. При грубых определениях для неточных измерений используется формула [2]

$$z = 0,9919 P - 0,2121 P^2 \cdot 10^{-5} \quad [P \text{ в МПа}] . \quad (2)$$

Если представить «стандартный» океан однородным слоем соленостью 35‰ и температурой 0°C , то более точная формула будет иметь вид [3]

$$P = 0,101326 + 0,01008247 z + 0,2334 \cdot 10^{-7} z^2 \quad [P \text{ в МПа, } z \text{ в м}] . \quad (3)$$

При использовании модели «стандартного» океана и Международного уравнения состояния морской воды

(1980 г.) с учетом зависимости $g(\varphi)$ более точная формула имеет вид [4]

$$z = \left[100 - (5,92 + 5,25 \sin^2 \varphi) \cdot 10^{-1} \right] P - 2,21 \cdot 10^{-2} P^2 \quad [P \text{ в МПа, } z \text{ в м}] . \quad (4)$$

Эта формула дает погрешность порядка 0,4 м для глубин от 0 до 6000 м

широт от 0 до 70° . Однако для реального океана необходимо учитывать ре-

гиональные поправки от $-1,5$ м до $2,5$ м для глубин до 1000 м и от 0 до 4 м для глубин до 6000 м [5].

Аналогичные выражения связи $z(P)$ и $P(z)$ для других моделей морской

$$z = \left(1,00675014 \cdot 9,215 \cdot 10^{-5} \varphi \right) \cdot P + \left(-2,4057 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-10} \varphi \right) \cdot P^2 + 2,3 \cdot 10^{-11} \cdot P^3$$

(z – в метрах, P – в децибарах) . (5)

Эта формула дает погрешность до $4-5$ метров в «стандартном» Черном море на предельных глубинах.

С применением уравнения состояния морской воды TEOS-10 способ определения глубины погружения приборов по давлению принципиально не изменился, поскольку вновь традиционно используется новая модель «стандартного» океана и вводятся региональные поправки [12].

Таким образом, во всех перечисленных вариантах определения глубины погружения прибора используется один и тот же метод, содержащий измерение гидростатического давления и вычисление глубины по формуле, полученной из представления среды некоторой «стандартной» статической моделью из эмпирических данных о профиле плотности вод, при которых реальные профили температуры и электропроводности среды не учитываются.

Недостатком этого метода является декларативность заявляемой точности

среды и вычислительных процедур приводятся в работах [6–10].

Имеется формула определения глубины приборов в некотором «стандартном» Черном море вида [11]

порядка 10^{-3} , которая не гарантируется при измерениях в реальной среде, являющейся нестационарной в пространстве и времени.

Целью работы является повышение гарантированной точности измерения глубины погружения прибора в водной среде с априорно неизвестными характеристиками.

Основная часть. При зондировании одновременно измеряем гидростатическое давление и локальную плотность воды. Считаем, что уже созданы рабочие средства измерения локальной плотности морской воды в среде [13]. Графики измеряемых и вычисляемых величин при зондировании вниз представлены на рис. 1.

Общее обоснование способа состоит в следующем. Рассмотрим разность двух давлений P_2 и P_1 на двух последовательных горизонтах зондирования в соответствии с уравнением гидростатики (1)

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \int_0^{z_2} g(\varphi, z) \rho(z) dz - \int_0^{z_1} g(\varphi, z) \rho(z) dz \approx g(\varphi, z) \int_{z_1}^{z_2} \rho(z) dz =$$

$$= \bar{g}(\varphi, z) (z_2 - z_1) \bar{\rho}(z) = g(\varphi, z) \Delta z \bar{\rho}(z) .$$

(6)

Откуда

$$\Delta z = \frac{\Delta P}{g(\varphi, z) \bar{\rho}(z)} , \quad (7)$$

где Δz – перемещение зонда по глубине (искомое) от давления P_1 к давлению P_2

(измеряемым); $\bar{\rho}(z)$ – средняя плотность воды на участке между давлениями P_1 и P_2 (измеряемая и вычисляемая); $g(\varphi, z)$ – ускорение силы тяжести для данных широты φ и диапазона глубин считаем известными, при малых Δz считаем фиксированным.

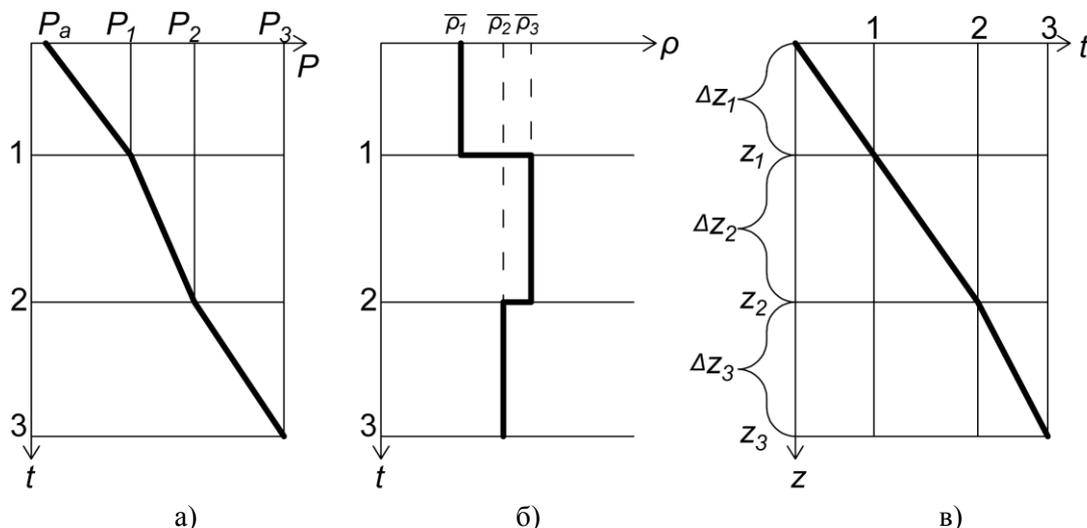


Рис. 1. Графики изменений измеряемых величин при зондировании:

а) изменение гидростатического давления от времени; $P(t)$

б) изменение средней плотности морской воды от времени $\bar{\rho}(t)$;

в) изменение глубины погружения прибора во времени $z(t)$

Fig. 1. Graphs of changes in measured values during probing:

a) change in hydrostatic pressure over time $P(t)$;

b) change in the average density of sea water from time $\bar{\rho}(t)$;

c) change in the depth of immersion of the device in time $z(t)$

Рассмотрим процесс зондирования. Последовательность отсчетов измеряемых величин по времени будем отмечать номерами индексов. Из схемы зондирования вниз с достаточно высокой скоростью на рис. 1 следует, что гидростатическое давление P со временем растёт.

Локальная плотность морской воды ρ может произвольно изменяться и её средние значения измеряются–вычисляются на отдельных неизвестных участках Δz профиля зондирования между последовательными отсчетами давления. Задача состоит в том, чтобы по измеряемым во времени функциям гидростатического давления и локальной плотности морской воды выразить глубину погружения прибора как функцию времени.

Поскольку никакой модели «стандартного» океана не используется, то вместо фиксированного значения давле-

ния атмосферы P_a необходимо его измерить непосредственно перед зондированием. В момент входа зонда в воду давление начинает резко возрастать линейно от P_a (рис. 1а), а локальная плотность возрастает скачком до некоторого уровня, который далее представляется её средним значением $\bar{\rho}_1$ до некоторого следующего измеряемого значения гидростатического давления P_1 (рис. 1б).

Среднее значение $\bar{\rho}_1$ функции локальной плотности ρ_j может быть вычислено любым известным способом от измерения на заданной пространственной базе до подсчета средней амплитуды пакета мгновенных отсчетов ρ_j от 1 до n .

В последнем случае частота дискретиза-

ции функции локальной плотности морской воды будет в n раз превышать частоту дискретизации величины гидростатического давления P_j .

Поскольку P_1 измеряется, а $\overline{\rho_1}$ определяется из измерения и вычисления, $g(\varphi, z_0)$ – вычисляется по известной формуле, то можно определить величину первого отрезка глубины

$$\Delta z_1 = \frac{P_1}{\overline{\rho_1} g(\varphi, z_0)}. \quad (8)$$

Далее зонд проходит отрезок глубины Δz_2 до момента отсчета давления P_2 , который равен

$$\Delta z_2 = \frac{P_2 - P_1}{g(\varphi, z_1) \overline{\rho_2}}. \quad (9)$$

По аналогии, для любого отрезка по глубине Δz_j можно записать

$$\Delta z_j = \frac{P_j - P_{j-1}}{g(\varphi, z_{j-1}) \overline{\rho_j}}. \quad (10)$$

Значение числителя может быть > 0 (зонд заглубляется), $= 0$ (зонд завис на горизонте), < 0 (зонд всплывает).

Глубина погружения z_i , как алгебраическая сумма отрезков Δz_j при $j=1$ до i , определится по формуле

$$z_i = \sum_{j=1}^{j=i} \Delta z_j = \sum_{j=1}^i \frac{P_j - P_{j-1}}{g(\varphi, j-1) \overline{\rho_j}}. \quad (11)$$

Отметим, что используется

$g(\varphi, z - z_{j-1})$, поскольку при вычислении Δz_j ещё не определено

$$g(\varphi, z_j).$$

Все величины в правой части выражения (11) известны: измеряемые P_j и P_{j-1} , измеряемо-вычисляемые $\overline{\rho_j}$ и

стандартно вычисляемые $g(\varphi, z_{j-1})$.

Глубина получена как функция времени z_i (рис. 1в). Результат не зависит от движения с непостоянной скоростью и отклонении от вертикали.

Следовательно, задача определения глубины погружения прибора при зондировании как функции времени решена.

Изложенный метод может быть использован для контроля перемещений по вертикали при движении подводного аппарата или буксируемого прибора на заданной глубине.

Рассмотрим вопросы точности.

При заданных погрешностях измерения давлений, определения их разности, измерения локальной плотности и вычисления средней на интервале локальной плотности можно оценить погрешность результата при статическом состоянии среды. Учитывая, что имеет место суммирование многих отрезков Δz_j по выражению (11), а также операция вычисления средней локальной плотности $\overline{\rho_j}$,

случайная составляющая инструментальной погрешности стремится к нулю.

Поэтому целесообразно в измерительных каналах давления и локальной плотности использовать аналого-цифровые преобразователи с высоким разрешением при большой составляющей случайной погрешности, например, типа $\Sigma\Delta$ -АЦП. Это позволит достичь инструментальной погрешности порядка единиц 10^{-5} .

Методическая абсолютная погрешность измерения—определения глубины погружения прибора зависит от вертикальных скоростей движения среды и прибора относительно среды. Погрешность равна расстоянию, на которое перемещается среда относительно прибора за время между двумя последовательными отсчетами давления P_{j-1} и P_j .

По относительной величине она равна отношению абсолютной величины к расстоянию, которое зонд пройдет по вертикали за это же время. Поэтому погрешность будет тем меньше, чем выше скорость зондирования и частота измерений. В разных состояниях среды будет разная методическая погрешность с различными уровнями систематической и случайной составляющей. Например, в поле внутренних волн на некоторых участках профиля будет превалировать систематическая периодическая составляющая из-за вертикальной скорости среды до нескольких см/с. В общем случае на всей траектории зондирования методическая погрешность будет присутствовать как случайная помеха, которая будет усредняться также, как и случайная составляющая инструментальной погрешности. Можно оценить значение результирующей относительной погрешности измерения—определения глубины погружения прибора порядка 10^{-4} .

Заключение. Предложен метод определения глубины погружения зондов в море с измерением давления и локальной плотности морской воды с целью обеспечения гарантированной точности. Показано, что погрешность измерения в реальном море может быть уменьшена примерно на порядок.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС № госрегистрации 121122300070-9 "Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левашов Д.Е. Техника экспедиционных исследований: инструментальные методы и технические средства оценки

промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 400 с.

2. Парамонов А.Н., Кушниц В.М., Заикин В.М. Автоматизация гидрофизического эксперимента. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 224 с.

3. Полосин А.С. Вычисление скорости звука в морской воде. Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География, 1967. № 3, С. 101–104.

4. Saunders P.M. Practical conversion of pressure to depth // J. Phys. Oceanogr. 1981. 11. P. 573–574.

5. Saunders P.M., Fofonoff N.P. Conversion of pressure to depth in the ocean // Deep-Sea Res. 1976. 23. P. 109–111.

6. Тароян Г.И., Воронова М.С. Определение глубин погружения океанографической аппаратуры по гидростатическому давлению. Записки по гидрографии, 1968. № 1, С. 95–98.

7. Федоров И.И. О пересчете глубины в давление при определении скорости звука в морской воде // Океанология, 1970. Т. 10. Вып. 1. С. 176–180.

8. Парамонов А.Н., Кушниц В.М., Забурдаев В.И. Современные методы и средства измерения гидрофизических параметров океана. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.

9. Millero E.J., Chetirkin P.V. The density of Caspian Sea waters // Deep-Sea Res. 1980. 27A. P. 265–271.

10. Fofonoff N.P., Millard R.C. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater // UNESCO technical papers in marine science. 1983. N 44. 53 p.

11. Забурдаев В.И., Гайский П.В. Практические формулы взаимосвязи давления и глубины в Черном море. МГЖ. № 6, 2002. С. 36–43 с.

12. IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. International Oceanographic Commission, Manuals and Guides. No. 56. UNESCO (English). 196 p. (Available from <http://www.TEOS-10.org>).

13. Гайский В.А. Гидростатический дифференциальный измеритель локальной плотности природных вод // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 3 (45). С. 50–58. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-3-50-58.

**METHOD FOR DETERMINING THE DEVICE IMMERSION DEPTH
IN THE SEA DURING SOUNDING**

V.A. Gaisky

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

It is proposed to measure hydrostatic pressure and local water density simultaneously during sounding and calculate the device immersion depth as the sum of the distance segments obtained by dividing the pressure increment by the product of the average local density in the segment between the readings of pressure and gravity. The result does not depend on the sounding speed and deviation from the vertical. The method is suitable for determining the deviation of the movement of an underwater vehicle or a towed device from a given depth. By averaging random measurement errors and additive random noise, a guaranteed accuracy of the order of 10^{-4} can be obtained.

Keywords: immersion depth, hydrostatic pressure, local density.

REFERENCES

1. *Levashov D.E.* Tekhnika ekspeditsionnykh issledovaniy: instrumental'nye metody i tekhnicheskie sredstva ocenki promyslovo-znachimyykh faktorov srede (Expeditionary Research Technique: Instrumental Methods and Technical Means for Evaluating Commercially Significant Environmental Factors). M.: Publishing House of VNIRO, 2003, 400 p.
2. *Paramonov A.N., Kushnir V.M., Zaikin V.M.* Avtomatizatsiya gidrofizicheskogo eksperimenta (Automation of hydrophysical experiment). L.: Gidrometeoizdat, 1982. 224 p.
3. *Polosin A.S.* Vychislenie skorosti zvuka v morskoy vode (Calculation of the speed of sound in sea water). Vestn. Moscow University. Ser. 5. Geography, 1967, No. 3, pp. 101–104.
4. Saunders P.M. Practical conversion of pressure to depth // J. Phys. Oceanogr. 1981, 11, P. 573–574.
5. Saunders P.M., Fofonoff N.P. Conversion of pressure to depth in the ocean // Deep-Sea Res. 1976, 23, P. 109–111.
6. *Taroyan G.I., Voronova M.S.* Opredelenie glubin pogruzheniya okeanograficheskoy apparatury po gidrostaticheskomu davleniyu (Determination of the depths of immersion of oceanographic equipment by hydrostatic pressure). Notes on Hydrography, 1968, No. 1, pp. 95–98.
7. *Fedorov I.I.* O pereschete glubiny v davlenie pri opredelenii skorostizvuka v morskoy vode (On the conversion of depth into pressure when determining the speed of sound in sea water). Okeanologiya, 1970, Vol. 10. No. 1, pp. 176–180.
8. *Paramonov A.N., Kushnir V.M., Ziburdaev V.I.* Sovremennyye metody i sredstva izmereniya gidrofizicheskikh parametrov okeana (Modern methods and means of measuring the hydrophysical parameters of the ocean). Kiev: Nauk. dumka, 1979, 248 p.
9. Millero E.J., Chetirkin P.V. The density of Caspian Sea waters // Deep-Sea Res. 1980. 27A. P. 265–271.
10. Fofonoff N.P., Millard R.C. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater // UNESCO technical papers in marine science. 1983. N 44. 53 p.
11. *Ziburdaev V.I., Gaisky P.V.* Prakticheskie formuly vzaimosvyazi davleniya i glubiny v Chernom more (Practical formulas for the relationship between pressure and depth in the Black Sea). MGJ, No. 6, 2002, pp. 36–43.
12. IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. International Oceanographic Commission, Manuals and Guides. No. 56. UNESCO (English). 196 p. (Available from <http://www.TEOS-10.org>).
13. *Gaisky V.A.* Gidrostaticheskij differentsial'nyj izmeritel' lokal'noj plotnosti prirodnykh vod (Hydrostatic differential meter of local density of natural waters). *Sistemy` kontrolya okruzhayushhej srede*, 2022, No. 3 (45), pp. 50–58.