

**ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ
В ЗОНДИРУЮЩИХ ПРИБОРАХ****В.А. Гайский, П.В. Гайский**

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

E-mail: gaysky@inbox.ru

В работе анализируются возможности реализации гидростатического метода с использованием многоэлементных резисторных распределенных датчиков давления и температуры, профиломеров сопротивлений этих датчиков и определения пространственного перепада давления на заданной базе по измерению и вычитанию сопротивлений датчиков с учетом температурной коррекции. Использование трех таких датчиков, установленных на трех штангах, ориентированных вниз вдоль осей прямоугольной системы координат, обеспечивает возможность измерения локальной плотности при произвольной ориентации зонда относительно вертикали. Анализ показывает возможность измерения гидростатическим методом локальной плотности морской воды с необходимой точностью в зондирующих приборах.

Ключевые слова: термодинамическое уравнение состояния, плотность жидкости, океанографический зонд.

Поступила в редакцию: 02.03.2021. После доработки: 19.03.2021.

Введение. Измерения плотности жидкости осуществляются во многих областях научных исследований и в технологических процессах с разной точностью, достигающей $1 \cdot 10^{-6}$ в лабораторных измерениях проб, т.е. в изолированной среде.

В океанологии имеется потребность измерений плотности воды в неизолированной среде при зондировании моря от поверхности до глубин в несколько километров. В резервуарах с нефтепродуктами также необходимо измерять плотность жидкости при зондировании. Известен вибрационный способ денситометрии плотности проб жидкости с высокой точностью $\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$ [1].

В зондирующих приборах для автоматических измерений локальной плотности этот способ применения не получил.

Известно широкое применение рефрактометрических методов для измерения плотности жидкостей [2].

В неизолированных жидкостях рефрактометры достигли точности $1 \cdot 10^{-5}$, но оказались сложны в эксплуатации и получили ограниченное применение.

Например, погружной рефрактометр для нефти (погрешность $4 \cdot 10^{-5}$) [3].

Известны неоднократные попытки создания рефрактометров для использования в океанографических зондах, но далее экспериментальных образцов их разработки не продвинулись.

Вместе с тем, актуальность в использовании прямого измерения плотности в море возрастает. Для использования в современных гидротермодинамических моделях необходимы экспериментальные вертикальные профили температуры и плотности в координатах температура–глубина и плотность–глубина [4].

В современных массовых измерениях непосредственно в среде плотность не измеряется, а вычисляется из совокупных измерений давления, температуры и электропроводности или давления, температуры и скорости звука с использованием уравнения состояния морской воды, которое для океанических вод связывает эти величины с погрешностью тысячных долей процента (последнее уточнение TEOS–10) [5].

Поскольку для окраинных морей и прибрежных вод это уравнение состояния требует внесения региональных по-

правок, которые периодически уточняются и будут уточняться впредь, то целесообразно исключить его из способа определения плотности морской воды и измерять плотность непосредственно в данной «точке», фактически средней по отрезку глубины, соответствующему пространственному разрешению используемых СТД-зондов, т.е. локальной плотности.

Примем длину этого отрезка равной $5 \cdot 10^{-2}$ м, необходимую точность измерения локальной плотности, согласно TEOS-10, равной $4 \cdot 10^{-6}$. Перепад давления на отрезке в море составит давлений $\sim 5 \cdot 10^{-3} a$ при внешнем давлении от 1 до 0,1 Н а, где Н – глубина зондирования в метрах, например, для Черного моря, до 200 а.

Известны работы, в которых для измерения локальной плотности при зондировании предлагается использовать модификации гидростатического метода, например, [6].

В этой работе предлагается определять плотность по разности давлений на концах штанги известной длины, а отклонение штанги от вертикали контролировать по разности давлений на концах двух других штанг, установленных прямоугольным крестом горизонтально.

В другой работе [7] показана возможность использования произвольно ориентированных относительно вертикали трех штанг, установленных вертикально в форме трехгранной пирамиды с четырьмя датчиками давления на вершинах, для определения плотности морской воды по трем разностям давления вдоль ребер.

Достоинством данного предложения является инвариантность ориентации штанг относительно вертикали.

Однако общим недостатком обоих этих способов является то, что не раскрыт механизм измерения разности давлений в двух пространственно разнесенных точках, а получение этой величины с указанной выше точностью цифровым вычитанием двух измеренных абсолютных давлений, включая внешнее, требует обеспечения точности $\sim 10^{-10}$, что на современном уровне техники не реализуемо. Кроме того, не ясно обеспечение

точности размера измерительной базы между датчиками.

В работе [8] приводится гипотетический пример гидростатического измерителя плотности с дифференциальным датчиком давления, который не работоспособен из-за отсутствия механизма обеспечения передачи давления от двух разнесенных точек пространства к дифференциальному датчику давления.

В работе [9] предлагается использовать распределенные модулированные по ортогональным функциям датчики с чувствительными элементами из трех параллельных проводов, имеющих разные коэффициенты термо и тензочувствительности при вертикальной стационарной постановке. Достоинства способа в распределенном восприятии давления датчика и в коррекции температурной погрешности тензометров и погрешности термодатчиков от тензоэффекта. Однако для прямого использования в зонде этот способ не пригоден.

Таким образом, известные способы измерения локальной плотности не получили практического осуществления в океанологических зондах из-за сложности реализации и использования, низкой точности измерения разности давлений на локальной измерительной базе, не обеспеченной точности измерения и сохранения размера локальной измерительной базы, погрешности от влияния температуры на датчики.

Основная часть. Целью данной работы является упрощение реализации и использования способа измерения локальной плотности, повышение точности измерения и сохранения отношения перепада давления на локальной измерительной базе к её длине.

Эта цель достигается тем, что измерение разности давлений на заданной пространственной базе выполняется электрическим путем за счет вычитания сопротивлений распределенных модулированных резисторных датчиков на разных концах базы и решения системы линейных алгебраических уравнений относительно перепада давления, содержащей зависимости сопротивлений трех разных параллельных датчиков от коэффициентов термо и тензочувствительности.

Рассмотрим обоснование рассматриваемого способа. Локальную плотность жидкости на отрезке глубины ΔH будем определять по формуле

$$\rho = \frac{1}{g(\varphi, z)} \frac{\Delta P}{\Delta H}, \quad (1)$$

где $g(\varphi, z)$ – ускорение свободного падения в точке измерений с географической широтой φ и глубиной z , предполагается априори известным с требуемой точностью, допустим с погрешностью 10^{-6} . Тогда величину $\frac{\Delta P}{\Delta H}$ – отношение приращения давления на отрезке глубины ΔH , можно измерять с погрешностью не большей $4 \cdot 10^{-6}$, чтобы удовлетворить требования термодинамического уравнения состояния морской воды TEOS-10 [5]. Учтем влияние температуры на тензочувствительность и наоборот. В качестве чувствительных элементов датчиков принимаем провода, имеющие распределенную чувствительность α по температуре и β по тензо-

чувствительности по давлению так, что интегральное сопротивление провода на отрезке равно

$$\bar{R} = \bar{R}_0 (1 + \alpha \bar{\theta} + \beta \bar{P} + \alpha \beta \cdot \bar{\theta P}), \quad (2)$$

где $\bar{\theta}$ и \bar{P} – интегральные значения температуры и давления на некотором отрезке; \bar{R}_0 – интегральное сопротивление провода при начальных значениях температуры (например, $0^{\circ}C$) и давления (θ атмосфер).

Предполагается, что величина \bar{R}_0 , а также коэффициенты чувствительности α и β известны априори с необходимой точностью $\sim 10^{-6}$ или могут быть получены градуировкой для конкретного устройства. Для определения $\bar{\theta}$ и \bar{P} в результате измерения \bar{R} используется параллельно три чувствительных элемента с разными величинами R_{0i} , α_i , β_i ($i = 1, 3$) и решение системы линейных алгебраических уравнений

$$\alpha_i \bar{\theta} + \beta_i \bar{P} + \alpha_i \beta_i \bar{\theta P} = \frac{\bar{R}_i}{R_{0i}} - 1 = \bar{R}_i^{-1}, \quad i = \overline{1, 3}. \quad (3)$$

Расширенная матрица системы имеет вид

$$\begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \alpha_1 \beta_1 & \bar{R}_1^{-1} \\ \alpha_2 & \beta_2 & \alpha_2 \beta_2 & \bar{R}_2^{-1} \\ \alpha_3 & \beta_3 & \alpha_3 \beta_3 & \bar{R}_3^{-1} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Главный определитель системы

$$D = \alpha_1 \alpha_3 \beta_2 (\beta_3 - \beta_1) + \alpha_2 \alpha_3 \beta_1 (\beta_2 - \beta_3) + \alpha_1 \alpha_3 \beta_3 (\beta_1 - \beta_2) \quad (5)$$

в предположении, что $D \neq 0$, тогда значение температуры

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{R}_1^{-1} \beta_2 \beta_3 (\alpha_3 - \alpha_2) + \bar{R}_2^{-1} \beta_1 \beta_3 (\alpha_1 - \alpha_3) + \bar{R}_3^{-1} \beta_1 \beta_2 (\alpha_2 - \alpha_1)}{D}, \quad (6)$$

значение давления

$$\bar{P} = \frac{\bar{R}_1^{-1} \alpha_2 \alpha_3 (\beta_2 - \beta_3) + \bar{R}_2^{-1} \alpha_1 \alpha_3 (\beta_3 - \beta_1) + \bar{R}_3^{-1} \alpha_1 \alpha_2 (\beta_1 - \beta_2)}{D}. \quad (7)$$

Таким образом, значения температуры и давления получаем дополнительно к локальной плотности.

Информативным параметром на выходе распределенного модулированного чувствительного элемента является профиль сопротивления, содержащий воздействие температуры и давления.

Представим этот профиль $R(z)$ разложением на отрезке $2\Delta H$ в ряд Уолша-Адамара всего из двух членов

$$R(z) = \sum_{i=0}^1 \alpha_i had_i(z), \quad (8)$$

где амплитуды функций разложения задаются матрицей

z	0	1
had_0	1	1
had_1	1	-1

Коэффициенты разложения определяются по формулам

$$\alpha_0 = \frac{1}{2\Delta H} \int_0^{2\Delta H} R(z) had_0(z), \quad (9)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2\Delta H} \int_0^{2\Delta H} R(z) had_1(z). \quad (10)$$

Для аппаратной реализации функций разложения профиля $\bar{R}(z)$ осуществим петлевую укладку провода чувствительного элемента так, как это показано на рис. 1.

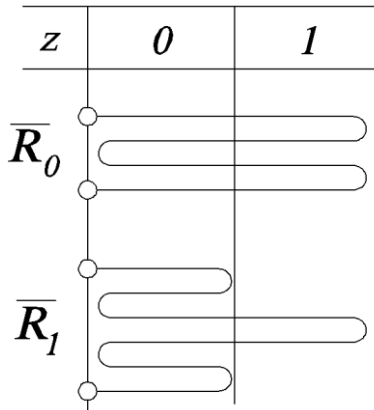


Рис. 1. Петлевая укладка проводов для модуляции локальной чувствительности
Fig. 1. Loop wire routing for modulating local sensitivity

Примем за амплитуду функций разложения сопротивление 2-х последовательных проводников на интервале ΔH . Тогда интеграл в выражении (9) будет равен $\frac{1}{2} \bar{R}_0$, где \bar{R}_0 – измеренное сопротивление 0-го провода, если \bar{R}_1 – измеренное сопротивление 1-го провода, то интеграл в выражении (10) равен

$\bar{R}_1 - \bar{R}_0$. Для коэффициентов разложения получим

$$\alpha_0 = \frac{\bar{R}_0}{4\Delta H}, \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_0}{2\Delta H}. \quad (12)$$

Выражение (8) для профиля $\bar{R}(z)$, и участков $\bar{R}(0)$ и $\bar{R}(1)$ перепада со-

противления на расстоянии ΔH приобретают вид

$$\bar{R}(z) = \frac{\bar{R}_0}{4\Delta H} had_0(z) + \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_0}{2\Delta H} had_1(z), \quad (13)$$

$$\bar{R}(0) = \frac{\bar{R}_0}{4\Delta H} + \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_0}{2\Delta H} = \frac{2\bar{R}_1 - 2\bar{R}_0}{4\Delta H}, \quad (14)$$

$$\bar{R}(1) = \frac{\bar{R}_0}{4\Delta H} - \frac{\bar{R}_1 - \bar{R}_0}{2\Delta H} = \frac{\bar{R}_0 - 2\bar{R}_1}{4\Delta H}, \quad (15)$$

$$\bar{R}(0) - \bar{R}(1) = \frac{2\bar{R}_1 - \bar{R}_0 - \bar{R}_0 + 2\bar{R}_1}{4\Delta H} = \frac{2\bar{R}_1 - \bar{R}_0}{2\Delta H} = \frac{\bar{R}_1 - \frac{1}{2}\bar{R}_0}{\Delta H}. \quad (16)$$

Следовательно, далее необходимо измерить текущую разность сопротивлений $\bar{R}_1 - \frac{1}{2}\bar{R}_0$ в аналоговом виде. Это возможно с точностью $\sim 10^{-6}$, и далее эта разность сопротивлений пересчитывается в разность давлений ΔP на отрезке ΔH .

Для учета влияния температуры θ опять используем три чувствительных элемента и систему из трех алгебраических уравнений аналогично (3).

Однако они будут содержать перепады $\Delta\bar{\theta}$, $\Delta\bar{P}$ и $\bar{R}_1 - \frac{1}{2}\bar{R}_0$ и иметь вид

$$\alpha_i \Delta\bar{\theta} + \beta_i \Delta\bar{P} + \alpha_i \beta_i \Delta\bar{\theta} \Delta\bar{P} \leq \frac{2\bar{R}_{1i} - \bar{R}_{0i}}{\bar{R}_{i0}} = \bar{R}_i^{-1} \quad i = 1, 3. \quad (17)$$

Определитель системы D аналогичен (4). Сопротивление i -го чувствительного элемента \bar{R}_{i0} и ΔH при нулевых

начальных условиях $\bar{\theta}$ и \bar{P} известно априорно или может быть определено градуировкой.

Решением (17) получим

$$\Delta P = \frac{\Delta\bar{R}_1^{-1}(\alpha_1\alpha_2\beta_3 - \alpha_2\alpha_3\beta_3) + \Delta\bar{R}_2^{-1}(\alpha_1\alpha_3\beta_3 - \alpha_1\beta_1\alpha_3) + \Delta\bar{R}_3^{-1}(\alpha_1\alpha_2\beta_1 - \alpha_1\alpha_2\beta_3)}{D}. \quad (18)$$

Далее локальную плотность жидкости определяют по формуле (1), причем

$$g(\varphi, z) = 978,049 (1 + 0,005288 \sin^2 \alpha - 0,000006 \sin^2 2\varphi - 0,0003086 z) [cm/c^2].$$

При зондировании в неизолированной среде для приведения отношения $\frac{\Delta P}{\Delta H}$ к вертикали три распределенных датчика, каждый с тремя парами чув-

ствительных элементов, располагают датчики вдоль трех штанг, установленных по осям x, y, z прямоугольной системы координат ориентированных вниз по главной диагонали квадранта.

Измеряют разность сопротивлений и определяют этими датчиками величины $\frac{\Delta P_x}{\Delta H_x}$, $\frac{\Delta P_y}{\Delta H_y}$, $\frac{\Delta P_z}{\Delta H_z}$ и вертикальный градиент давления

$$\frac{\Delta P}{\Delta H} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_x}{\Delta H_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_y}{\Delta H_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_z}{\Delta H_z}\right)^2}. \quad (19)$$

Заключение. Выполнен анализ метод и средств измерения локальной плотности жидкостей зондирующими приборами. Показано, что модернизированный вариант метода гидростатики способен обеспечить требуемую точность измерения $4 \cdot 10^{-6}$ локальной плотности. В предложенном способе для определения пространственного перепада давления на заданной базе используют распределенные профилемеры температуры и давления с разными коэффициентами температурной и тензочувствительности, а для привязки измерений к вертикали используют три распределенных датчика, установленных на штангах, ориентированных вниз по осям прямоугольной системы координат.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПТС «Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод» (№ госрегистрации АААА-А19-119040590054-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. Введение в океанографию. Перевод с французского Е.П. Плихина и Е.К. Шифриной. Под редакцией Ю.Е. Очаковского и К.С. Шифрина. Изд. Мир. Москва. 1978. С. 81–82.
2. *Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях / под редакцией проф. Л.Д. Конопелько. Изд. Триумф. М., 2020. 208 с.*
3. Миненко Ю.В. Интерференцированный рефрактометр для исследования технологических жидкостей. Контрольно-измерительная техника. РЖ ВНИИ-ТИ. Метрология. 2002. С. 22–32.
4. *Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. Л.: Гидрометеиздат. 1977. 725 с.*
5. 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>).
6. Жемков Е.И. Метод и устройство гидростатического измерения плотности морской воды. Материалы 12 Международной науч.-техн. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований. Ч. 1. М., 2011. С. 95–97.
7. Федотов Г.А. Новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды. Фундаментальные проблемы современной гидродинамики. 2013. Т. 6, № 1. С. 58–65.
8. Краснодубец Л.А., Пеньков М.Н. Компьютерное моделирование гидростатического измерителя плотности морской воды. Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 1 (39). С. 71–76.
9. Патент RU № 2682080. Оpubл. 14.03.2019. Бюл. № 8. Гайский В.А., Гайский П.В. Способ измерения профилей температуры, давления и плотности в жидкости.

**POSSIBILITIES OF MEASURING THE LOCAL DENSITY OF SEAWATER
IN PROBE INSTRUMENTS**

V.A. Gaisky, P.V. Gaisky

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

The paper analyzes the possibilities of implementing the hydrostatic method using multi-element resistor distributed pressure and temperature sensors, resistance profilers of these sensors and determining the spatial pressure drop on a given base by measuring and subtracting sensor, taking into account temperature correction. The use of three such sensors, mounted on three rods, oriented downward along the axes of a rectangular coordinate system, provides the possibility of measuring the local density with an arbitrary orientation of the probe relative to the vertical. The analysis shows the possibility of measuring the local density of seawater by the hydrostatic method with the required accuracy in probe instruments.

Key words: thermodynamic equation of state, fluid density, oceanographic probe.

REFERENCES

1. *Ivanov A.* Vvedenie v okeanografiju. Perevod s francuzskogo E.P. Plihina i E.K. Shifrinov. Pod redakciej Ju.E. Ochakovskogo i K.S. Shifrina. Izd. Mir. Moskva. 1978. pp. 81–82.
2. Refraktometricheskie metody v fiziko-himicheskikh izmerenijah pod redakciej prof. L.D. Konopel'ko. Izd. Triumf. M., 2020. 208 p.
3. *Minenko Ju.V.* Interferencirovannyj refraktometr dlja issledovaniya tehnologicheskikh zhidkostej. *Kontrol'noizmeritel'naja tehnika*. RZh VINITI. Metrologija. 2002. pp. 22–32.
4. Rukovodstvo po gidrologicheskim rabotam v okeanah i morjah. L.: Gidrometeoizdat. 1977. 725 p.
5. 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>).
6. *Zhemkov E.I.* Metod i ustrojstvo gidrostaticeskogo izmerenija plotnosti morskoy vody. Materialy 12 Mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konf. "Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy". Vol. 1. M., 2011. pp. 95–97.
7. *Fedotov G.A.* Novaja modifikacija gidrostaticeskogo metoda opredelenija plotnosti morskoy vody. *Fundamental'nye problemy sovremennoj gidrodinamiki*. 2013. Vol. 6, No 1. pp. 58–65.
8. *Krasnodubec L.A., Pen'kov M.N.* Komp'yuternoe modelirovanie gidrostaticeskogo izmeritelja plotnosti morskoy vody. *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*. 2020. Vol. 1 (39). pp. 71–76.
9. Patent RU № 2682080. Opubl. 14.03.2019. Bjul. № 8. *Gajskij V.A., Gajskij P.V.* Sposob izmerenija profilej temperatury, davlenija i plotnosti v zhidkosti.