

УДК 551.46.083

EDN: IWPFEH

© И. Ю. Семькина, Л. А. Краснодарец, 2025

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОНОМНЫХ ЗОНДОВ-ПРОФИЛОГРАФОВ

Исследование относится к области методов определения вертикального профиля плотности морской воды *in situ*. Традиционные методы определения плотности морской воды ρ через CTD-параметры (электропроводность, температура, глубина) имеют многоэтапный характер, что усложняет их использование в реальном времени. Перспективным решением является применение динамических измерений с использованием автономных зондов-профилографов, которые, будучи оборудованы только одним датчиком давления, могут определять вертикальный профиль плотности морской воды со скоростью порядка 1 м/с. Однако текущая реализация данного метода требует информации о плотности морской воды на поверхности. Задачей данного исследования является разработка модификации метода динамических измерений, не требующего такой информации. В основу метода положен анализ математического описания движения автономного зонда-профилографа в поле гидростатического давления p при свободном погружении, на базе которого получено уравнение для определения $\rho(p)$, не требующее априорной информации о плотности. Метод предполагает вычисление первой и второй производных гидростатического давления. Для снижения эффекта усиления шумов при дифференцировании предложено использовать фильтры-дифференциаторы и дана рекомендация по определению границы полосы подавления частот в зависимости от скорости профилирования. Проанализировано влияние скорости погружения зонда-профилографа на динамическую погрешность измерения давления и погрешность аналого-цифрового преобразования. Выявлен диапазон скоростей профилирования, в котором снижено влияние указанных погрешностей. Проведено моделирование, подтверждающее результативность предложенных решений. Полученные результаты могут быть применены при определении профиля плотности морской воды в океанологии, рыболовстве и подводных работах.

Ключевые слова: плотность морской воды, автономный зонд-профилограф, динамические измерения, скорость профилирования, фильтр-дифференциатор

ВВЕДЕНИЕ

Данные о распределении плотности морской воды играют фундаментальную роль в изучении динамических процессов в мировом океане. С увеличением глубины плотность морской воды обычно возрастает, однако в результате различных факторов, таких как сезонные температурные колебания, испарение и другие, в некоторых зонах может наблюдаться поверхностное увеличение плотности, что приводит к формированию термохалинной циркуляции. Эта циркуляция существенно влияет на крупномасштабные океанические течения [1–3]. Информация о профиле плотности морской воды также имеет важное значение для исследований морской флоры и фауны, т.к. этот параметр оказывает влияние на распределение и миграцию биологических видов [4, 5]. Кроме того, данные о профиле плотности морской воды в сочетании с другими гидрологическими параметрами играют ключевую роль для оценки эффективности техниче-

ских средств при реализации специализированных морских задач [6].

На практике распространены косвенные способы определения плотности по измеренным *in situ* другим параметрам морской воды. Например, стандарт WOCE предусматривает измерение CTD-параметров морской воды (электропроводность, температура, глубина), их последующую обработку и вычисление плотности морской воды с помощью термодинамического уравнения состояния морской воды TEOS-10 [7]. Основным недостаток такого способа — многоэтапность процедуры, что существенно затрудняет ее применение для определения плотности морской воды *in situ* непосредственно в процессе вертикального профилирования.

Другим распространенным подходом к определению плотности морской воды является использование измерений гидростатического давления. Например, для определения плотности морской воды в работах [8, 9] предложено использовать резервуар с эталонной жидкостью, в верхней

и нижней частях которого размещаются дифференциальные датчики давления, а по измерениям разности давлений определяют плотность. Однако данный подход неудобен для оперативного зондирования, поскольку для обеспечения высокой точности определения вертикального профиля плотности при каждом измерении требуется гидростатическое равновесие, а также информация об установившейся средней температуре в резервуаре с эталонной жидкостью. Соблюдение этих условий приводит к значительной инерционности измерительных каналов, а следовательно, в процессе вертикального профилирования с высокими скоростями возникают существенные динамические искажения в измерениях плотности.

Существуют варианты использования измерений гидростатического давления, не требующие резервуара с эталонной жидкостью. Так, в работах [10–12], предложено определять плотность морской воды по разности давлений, измеренных с помощью системы датчиков давления в нескольких разнесенных в пространстве точках, например на границах отрезка, в узлах пирамиды и т.п. Достоинством такого подхода является инвариантность измерений плотности по отношению к температуре морской воды и скорости вертикального профилирования, однако получение разности давлений вычитанием двух измерений давления, полученных разнесенными в пространстве датчиками, как правило, вносит значительную погрешность.

Еще одним подходом к определению профиля плотности морской воды является использование метода динамических измерений. Данный подход разрабатывается в Институте природно-технических систем специально для оперативного зондирования и предполагает использование автономного зонда-профилографа с известными конструктивными параметрами, совершающего свободное вертикальное движение (погружение) со скоростью порядка 1 м/с, что существенно выше скорости профилирования CTD-зондами программы Argo [13], осуществляющих профилирование при всплытии, для которых на всплытие с горизонта 2000 м уходит 5–7 ч.

В одном из вариантов реализации данного подхода [14] вертикальные составляющие скорости и ускорения зонда, а также глубина непрерывно измеряются в процессе погружения с помощью бортовой навигационной системы, а вертикальный профиль плотности определяется по динамике изменения данных параметров. Однако бортовые навигационные системы, обеспечивающие измерение скорости и ускорения вертикального движения, а также глубины погружения с приемлемой точностью в течение многочасового вертикального про-

филирования, крайне сложны по своей конструкции. Кроме того, этот вариант использования метода динамических измерений определяет профиль плотности морской воды в функции глубины, в то время как современные океанографические приборы определяют гидрологические характеристики в океанской толще как функцию от давления.

Для преодоления этих недостатков в [15] предложено оснастить автономный зонд-профилограф датчиком давления. Предполагается, что форма и геометрические параметры корпуса зонда остаются постоянными. Измерения давления проводятся во время погружения, когда окружающая среда находится в состоянии гидростатического равновесия. В процессе погружения зонд если и движется горизонтально, то лишь следуя за линиями тока воды. В таких условиях горизонтальные силы, действующие на зонд, пренебрежимо малы по сравнению с вертикальными. В условиях гидростатического равновесия изменение давления, регистрируемое профилографом при вертикальном перемещении зонда в стратифицированном океане, определяется исключительно изменением плотности морской воды. Тогда вертикальный профиль плотности морской воды определяется по динамике изменения давления, непрерывно измеряемого в процессе погружения, по формуле

$$\rho(p) = \rho_0 \left(2 - \frac{1}{g} (\ddot{p}(t) + a\dot{p}(t)^2) \right), \quad (1)$$

где ρ — плотность морской воды; p — измеряемое давление; ρ_0 — плотность морской воды, измеренная на поверхности перед погружением зонда либо среднестатистическое значение плотности морской воды для конкретного региона; g — ускорение свободного падения для географической широты и глубины, на которой проводится вертикальное профилирование; $\dot{p}(t)$ и $\ddot{p}(t)$ — соответственно первая и вторая производные p по времени t , вычисляемые разностным методом с использованием микроконтроллера; a — конструктивная константа

$$a = \frac{C_x S_m}{2V_b},$$

где V_b — объем корпусной части зонда; S_m — площадь поперечного сечения зонда; C_x — коэффициент лобового сопротивления. Сущность метода динамических измерений плотности морской воды с использованием автономного зонда-профилографа, оснащенного датчиком давления, показана на рис. 1.

Достоинствами описанного варианта является определение вертикального профиля плотности морской воды в функции давления и использование при этом только одного датчика давления. Однако

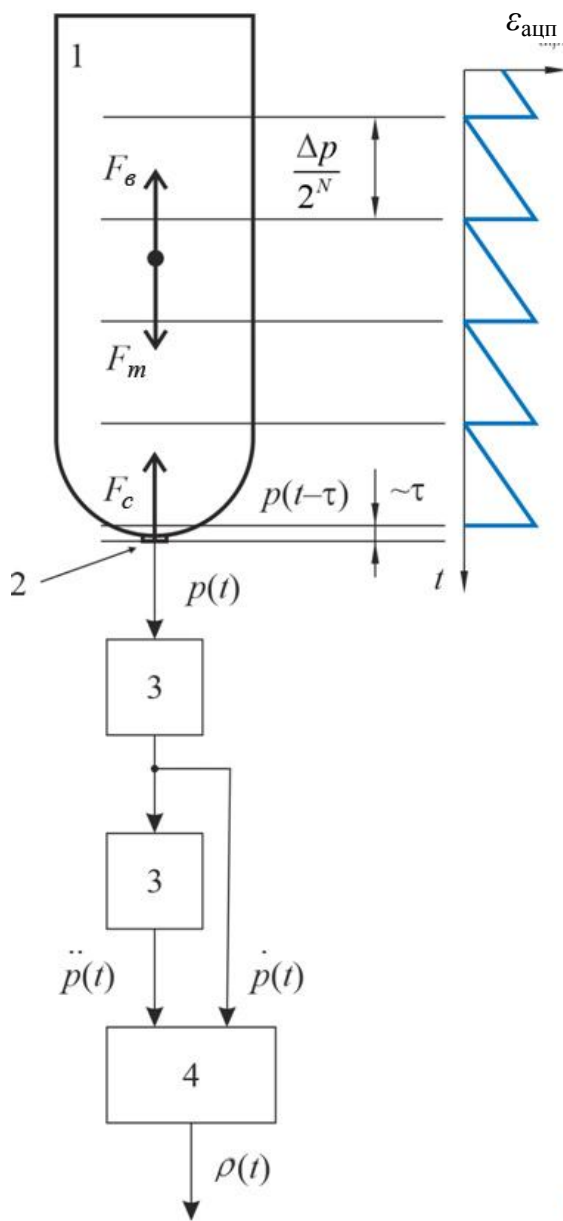


Рис. 1. Сущность метода динамических измерений плотности морской воды с использованием автономных зондов-профилографов. 1 — зонд, 2 — датчик давления, 3 — вычислитель производной, 4 — вычислитель плотности

для реализации требуется априорная информация о плотности морской воды на поверхности. Кроме того, предполагается использовать производные от давления, а дифференцирование усиливает высокочастотные шумы, в том числе шумы аналого-цифрового преобразования. Таким образом, встает

задача разработки модификации метода динамических измерений для определения вертикального профиля плотности с использованием датчика давления, не требующей априорной информации о плотности, а также обеспечивающей подавление шумов аналого-цифрового преобразования для снижения вызванной ими составляющей погрешности определения плотности морской воды. Решению этой задачи посвящено настоящее исследование.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

При погружении на автономный зонд-профилограф действует система сил [16], состоящая из силы тяжести

$$F_m = mg,$$

силы гидродинамического сопротивления

$$F_c = \frac{C_x S_m \rho}{2} \dot{z}(t)^2,$$

где z — глубина погружения зонда; $\dot{z}(t)$ — скорость движения зонда в морской воде, и суммарного давления со стороны окружающей морской среды, основная составляющая которого порождает выталкивающую архимедову силу

$$F_a = \rho g V_b.$$

В соответствии со вторым законом Ньютона, уравнение свободного погружения зонда записывается формулой

$$m\ddot{z}(t)^2 = mg - \rho g V_b - \rho \frac{C_x S_m}{2} \dot{z}(t)^2. \quad (2)$$

Датчик давления располагается в носовой части зонда, а измеряемое им давление равно

$$p(t) = p_a + \rho g z(t), \quad (3)$$

где p_a — атмосферное давление; при этом справедливо

$$\dot{p}(t) = \rho g \dot{z}(t) \text{ и } \ddot{p}(t) = \rho g \ddot{z}(t). \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) уравнение свободного погружения зонда (2) представляется нелинейным дифференциальным уравнением, связывающим $\dot{p}(t)$, $\ddot{p}(t)$ и ρ , а относительно ρ может быть рассмотрено алгебраическое уравнение второго порядка

$$\rho^2 \left(\frac{g^2 V_b}{m} \right) + \rho (-g^2) + \left(\frac{C_x S_m}{2mg} \dot{p}(t)^2 + \ddot{p}(t) \right) = 0,$$

имеющее решение

$$\rho(p) = \frac{m}{2V_b} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4V_b}{mg^2} \left(\ddot{p}(t) + \frac{C_x S_m}{2mg} \dot{p}(t)^2 \right)} \right). \quad (5)$$

Сравнивая с (1), легко убедиться, что (5) имеет более высокую вычислительную сложность, требует больше информации о конструкции и параметрах зонда, но не предполагает использование априорной информации о плотности морской воды.

Погрешность вертикального профилирования плотности $\rho(p)$ зависит от большого числа факторов: погрешности, с которой известно давление $p(t)$, погрешностей, с которыми в формуле (5) известны константы, точности выполнения арифметических операций и т.д. Поскольку единственным источником получаемой зондом информации о морской среде является датчик давления, рассмотрим преобразование сигнала давления более подробно (см. рис. 1). Из-за того, что датчик давления обладает инерционностью, за время отклика датчика давления τ зонд погрузится, формируя динамическую погрешность измерения давления $\varepsilon_{дин}$. В цифровом виде смена сигнала давления произойдет, только когда разница давлений на двух глубинах превысит шаг аналого-цифрового преобразования, формируя погрешность аналого-цифрового преобразования $\varepsilon_{ацп}$. Следовательно,

$$p(t) = p(t - \tau) + \Delta p \delta_p + \varepsilon_{дин} + \varepsilon_{ацп},$$

где Δp — диапазон измерения датчика давления, соответствующий диапазону изменения давления при вертикальном профилировании до заданной глубины; δ_p — приведенная погрешность датчика давления.

Динамическая погрешность $\varepsilon_{дин}$ может быть выражена, как

$$\varepsilon_{дин} = \frac{\partial p}{\partial z} \dot{z}(t) \tau. \quad (6)$$

Для медленно изменяющихся величин погрешность аналого-цифрового преобразования $\varepsilon_{ацп}$ носит гармонический характер, близкий к пилообразному с частотой

$$f_{ацп} = \frac{\dot{p}(t)}{\Delta p / 2^N}, \quad (7)$$

первая гармоническая составляющая которого —

$$\varepsilon_{ацп(1)} = \frac{\Delta p / 2^N}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{\dot{p}(t)}{\Delta p / 2^N} \right). \quad (8)$$

В силу (4), скорость $\dot{z}(t)$ движения зонда будет близкой к постоянной, зависящей от соотношения конструктивных параметров зонда V_b , S_m , C_x , m и плотности морской воды ρ

$$\dot{z}(t) \approx \sqrt{g \frac{2V_b}{C_x S_m} \left(\frac{m}{V_b} - 1 \right)}, \quad (9)$$

а изменение давления $p(t)$ будет носить характер близкого к линейному нарастания. Тогда в целях оценки величины погрешностей $\varepsilon_{дин}$ и $\varepsilon_{ацп}$ можно записать

$$\dot{z}(t) \approx v \text{ и } p(t) \approx 10^4 vt, \text{ и } \dot{p}(t) \approx 10^4 v, \quad (10)$$

где v — скорость профилирования.

Для обеспечения достоверности измерений датчиком давления необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$\varepsilon_{дин} < \Delta p \delta_p,$$

которое с учетом (6) и (10) можно представить в виде

$$10^4 v \tau < \Delta p \delta_p. \quad (11)$$

Прямое вычисление $\dot{p}(t)$ усилит $\varepsilon_{ацп}$ в X раз, где

$$X = \frac{2^{N+1} 10^4 \pi v}{\Delta p}. \quad (12)$$

Чтобы избежать усиления шумов аналого-цифрового преобразования, вычислители производных должны обладать свойством фильтрации, т.е. являться фильтрами-дифференциаторами. Учитывая реализацию на базе микроконтроллера, целесообразно использовать цифровые фильтры, например, фильтры-дифференциаторы с конечной импульсной характеристикой [17], модальные дифференциаторы на базе нормированных многочленов Баттерворта [18] или дифференцирующие фильтры с задержкой выходного сигнала [19].

Фильтры-дифференциаторы настраивают так, чтобы их амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ на частоте $f_{ацп}$ проходила ниже уровня $1/X$ (рис. 2). Чтобы обеспечить это условие требуется, чтобы

$$f_n = \frac{f_{ацп}}{2}, \quad (13)$$

что с учетом (7) и (10) позволяет записать:

$$f_n = 2^{N-1} 10^4 \frac{v}{\Delta p}. \quad (14)$$

В то же время при низких скоростях профилирования v граница полосы подавления частот f_n может оказаться близкой к диапазону рабочих частот $f_{раб}$. Чтобы это предотвратить должно соблюдаться условие

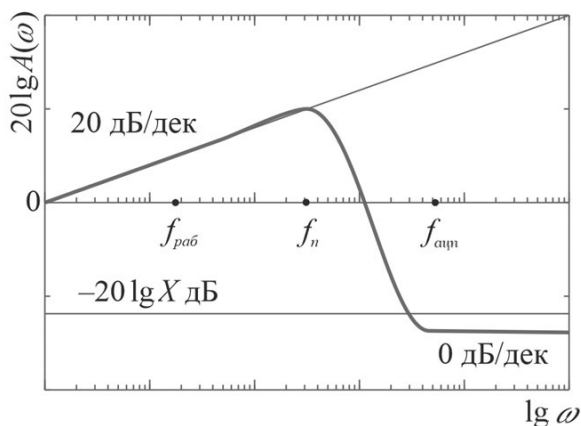


Рис. 2. Требуемая амплитудно-частотная характеристика фильтра-дифференциатора.

$$f_n > 2f_{раб}. \quad (15)$$

Поскольку $p(t)$ носит характер близкого к линейному нарастания, величину $f_{раб}$ можно оценить по времени отклика датчика давления:

$$f_{раб} = \frac{1}{\tau}.$$

В таком случае с учетом (6) и (10) условие (15) можно представить в виде

$$2^{N-1}10^4 \frac{v}{\Delta p} > \frac{2}{\tau}. \quad (16)$$

Анализируя (11) и (16) совместно, можно получить соотношение, определяющее диапазон скоростей профилирования v в котором обеспечивается наименьшая погрешность при преобразовании сигнала давления

$$\frac{\Delta p}{2^{N-2}10^4 \tau} < v < \frac{\Delta p \delta_p}{10^4 \tau}. \quad (17)$$

При выбранной v с учетом (9) и (10) конструктивные параметры V_b , S_m , C_x и m зонда выбирают из соотношения

$$\frac{1}{C_x S_m} (m - 1027 V_b) \approx 52 v^2. \quad (18)$$

Таким образом, выражения (5), (14), (17) и (18) составляют математическую основу модификации метода динамических измерений для определения вертикального профиля плотности морской воды, в которой используется один датчик давления, обеспечивается подавление шумов аналого-цифрового преобразования и снижение вызванной ими составляющей погрешности, а также не требуется априорная информация о плотности морской воды.

ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ

Описанная модификация метода динамических измерений для определения вертикального профиля плотности морской воды может быть реализована с помощью функциональной схемы, показанной на рис. 3.

Датчиком давления должен использоваться датчик в морском исполнении, например, с пьезокерамическими или емкостными керамическими чувствительными элементами [20] или изготовленный по технологии "кремний на сапфире" [21]. В качестве бортового микроконтроллера может использоваться 32-битный микроконтроллер, например семейства STM32, имеющий встроенный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 16-битные порты ввода-вывода и работающий совместно с разными типами устройств памяти, например флэш-памятью. В качестве устройства связи может быть использован радиомодем. При необходимости, вместо встроенного в бортовой

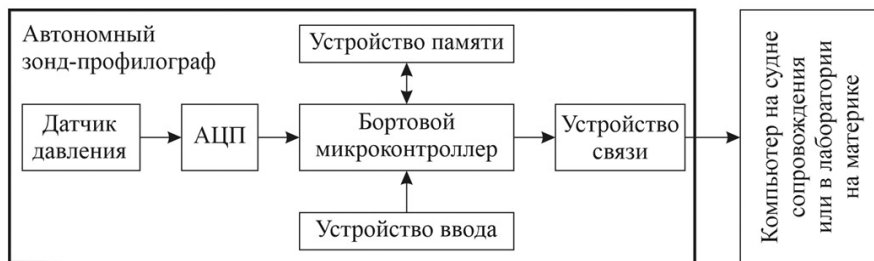


Рис. 3. Функциональная схема реализации метода.

микроконтроллер, можно использовать внешнюю микросхему аналого-цифрового преобразователя, например сигма-дельта АЦП разрядностью от 16 до 24, что дополнительно снизит шумы аналого-цифрового преобразования.

В качестве примера рассмотрим задачу получения вертикального профиля плотности морской воды на заданную глубину 1000 м. Этой глубине соответствует диапазон измерения датчика давления $\Delta p = 10$ МПа. При использовании датчика давления [21] приведенная погрешность составит $\delta_p = 0.25\%$, а время отклика $\tau = 1$ мс. При разрядности аналого-цифрового преобразователя $N = 24$ скорость профилирования v должна лежать в диапазоне от 0.238 до 25 м/с. Граница полосы подавления частот фильтра-дифференциатора в этом случае будет от 7.806 до 820 Гц, а при скорости профилирования $v = 1$ м/с составит $f_n \approx 33$ Гц.

Оценить рассчитанный диапазон скоростей профилирования можно путем сравнения с другими известными зондирующими системами. Например, зонды системы Argo [13] осуществляют профилирование со средней скоростью 0.1 м/с. Эта величина ниже левой границы рассчитанного диапазона скоростей профилирования v , т.е. профили-

рование с использованием разработанной модификации метода динамических измерений производится со значительно более высокими скоростями.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование предложенной модификации метода динамических измерений для определения вертикального профиля плотности морской воды выполнено методом компьютерного моделирования с использованием пакета прикладных программ MatLab Simulink.

Модель автономного зонда-профилографа в процессе свободного погружения показана в Приложении на рис. П1, там же дана модель измерения и вычислений на рис. П2. Вертикальный профиль плотности морской воды задан в виде 1-D Lookup Table по данным о реальном профиле плотности $\rho(p)$, полученным от зонда Argo: 77° северной широты, атмосферное давления принято 101.325 кПа. Параметры зонда, использованные при моделировании, показаны в табл.

Табл. Параметры автономного зонда-профилографа

v , м/с	V_b , м ³	S_m , м ²	C_x , безр.	m , кг	N , ед.	Δp , МПа	δ_p , %	τ , мс
1	5.655×10^{-3}	0.123	0.87	11.619	24	10	0.25	1

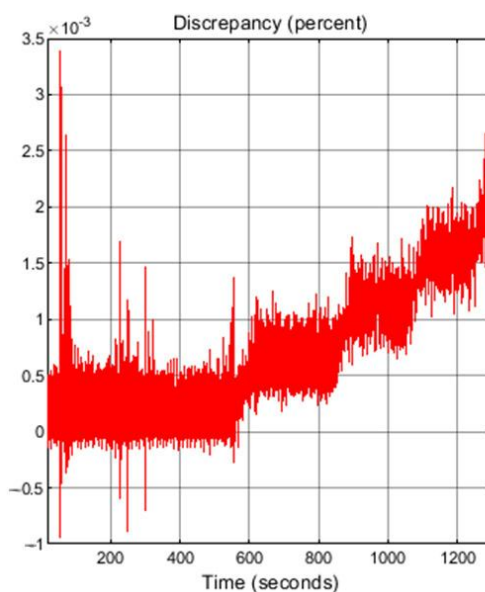


Рис. 4. Расхождение результата динамических измерений плотности морской воды.

В качестве фильтрующего элемента выбраны фильтры с конечной импульсной характеристикой, реализованные с помощью блока Variable Bandwidth FIR Filter. Настройка амплитудно-частотной характеристики фильтра производилась с использованием инструмента filterDesigner. В качестве оконной функции использовалось окно Хэмминга.

Моделирование работы предлагаемой модификации метода динамических измерений для определения вертикального профиля плотности морской воды показало высокую сходимость результатов. Для иллюстрации на рис. 4 приведены показания осциллографа Discrepancy (percent) (см. Приложение, рис. П2), отображающего расхождение в процентах между сигналами [Ro(t) model] и [Ro(t) measure], снимаемыми соответственно на выходе модели зонда и выходе модели измерения и вычислений.

Как можно видеть, несмотря на производимую фильтрацию сигнал [Ro(t) measure] содержит возникающие в результате аналогово-цифрового преобразования шумы, однако рассчитанного по (12) усиления в $X = 1.054 \times 10^5$ раз не наблюдается, а величина расхождения составляет доли процентов.

Следует дополнительно отметить, что полученное расхождение является ошибкой метода и не может рассматриваться в качестве погрешности динамических измерений в метрологическом смысле. Получение количественной оценки погрешности динамических измерений плотности морской воды для предлагаемой модификации метода является предметом отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модификация метода динамических измерений для определения вертикального профиля плотности морской воды с использованием автономного зонда-профилографа, оборудованного датчиком давления. В основу положен анализ математического описания движения автономного зонда-профилографа в поле гидростатического давления p при свободном погружении, на базе которого получено уравнение для определения $\rho(p)$, не требующее априорной информации о плотности.

Разработанная модификация предполагает вычисление первой и второй производных гидростатического давления. Для снижения эффекта усиления шумов при дифференцировании предложено использовать фильтры-дифференциаторы и дана рекомендация по определению границы полосы подавления частот в зависимости от скорости профилирования. В качестве фильтров предложены и апробированы цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой.

Проанализировано влияние скорости погружения зонда-профилографа на динамическую погрешность измерения давления и погрешность аналогово-цифрового преобразования. Выявлен диапазон скоростей профилирования, в котором снижено влияние указанных погрешностей. Для скорости профилирования $v = 1$ м/с приведены результаты моделирования, показывающие, что ошибка метода не превышает $5 \times 10^{-3}\%$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

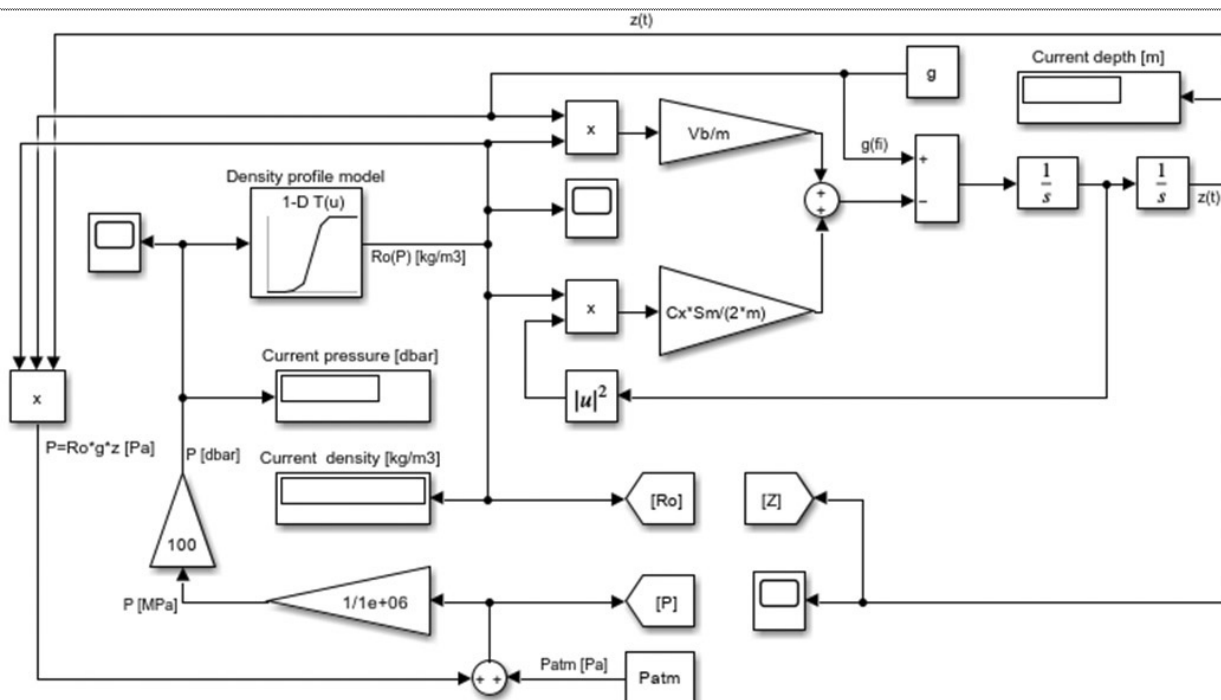


Рис. П1. Компьютерная модель в MatLab Simulink: модель погружения зонда.

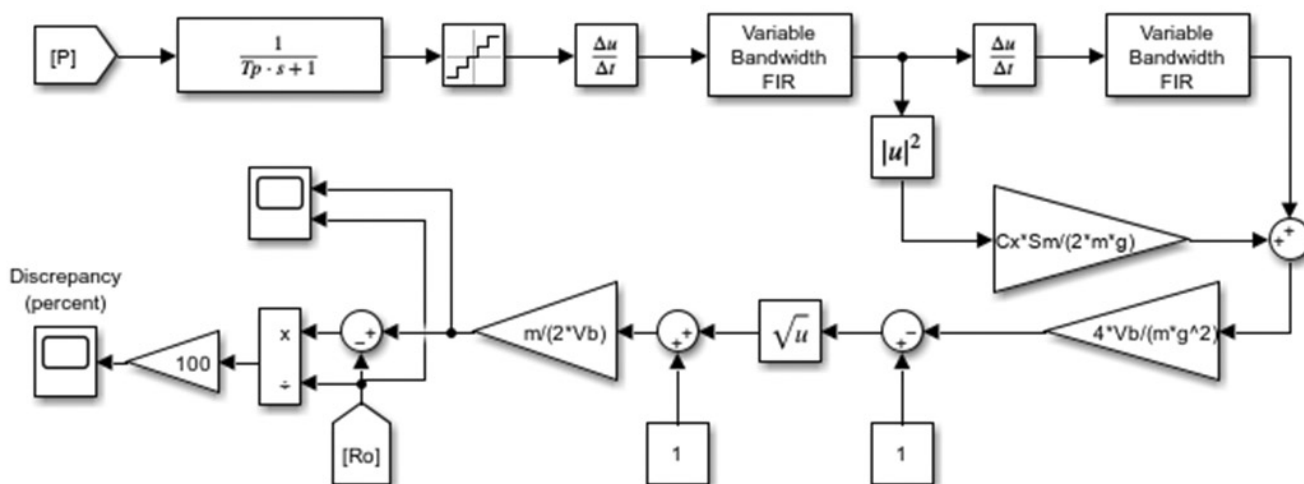


Рис. П2. Компьютерная модель в MatLab Simulink: модель измерения и вычислений.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС "Совершенствование технических средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод" (№ госрегистрации 124012700512-1).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Robinson E., Hosegood P., Bolton A. Dynamical oceanographic processes im-pact on reef manta ray behaviour: Extreme Indian Ocean Dipole influence on local internal

- wave dynamics at a remote tropical atoll // Progress in Oceanography. 2023. Vol. 218. Id. 103129. DOI: 10.1016/j.pocean.2023.103129
2. Johnson L., Siegel D.A., Thompson A.F., et al. Assessment of oceanographic conditions during the North Atlantic EXport processes in the ocean from RemoTe sensing (EX-PORTS) field campaign // Progress in Oceanography. 2024. Vol. 220. Id. 103170. DOI: 10.1016/j.pocean.2023.103170
 3. Tozawa M., Nomura D., Yamazaki K., et al. Oceanographic factors determining the distribution of nutrients and primary production in the subpolar Southern Ocean // Progress in Oceanography. 2024. Vol. 225. Id. 103266. DOI: 10.1016/j.pocean.2024.103266
 4. Xie Q., Gui D., Wang W., et al. Predictable oceanographic processes drive the formation of a distribution hotspot for Indo-Pacific humpback dolphins at a manmade harbor // Ocean & Coastal Management. 2024. Vol. 253. Id. 107160. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107160
 5. Chevallay M., Jeanniard du Dot T., Goulet P., et al. Spies of the deep: An animal-borne active sonar and bioluminescence tag to characterise mesopelagic prey size and behaviour in distinct oceanographic domains // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2024. Vol. 203. Id. 104214. DOI: 10.1016/j.dsr.2023.104214
 6. Аносов В.С., Калашиникова Е.В., Шарков А.М., Самотесов Ю.П. Выбор методов косвенного определения солености, скорости звука и плотности морской воды, в наибольшей степени отвечающих требованиям ВМФ // Навигация и гидрография. 2019. № 58. С. 54–61. URL: <https://gningi.ru/images/journal/nig58.pdf>
 7. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: calculation and use of thermodynamic properties. Paris: UNESCO, 2015. 196 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188170>
 8. Гайский В.А., Гайский П.В. Возможности измерения локальной плотности морской воды в зондирующих приборах // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1 (43). С. 61–67. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-61-67
 9. Гайский В.А. Измеритель плотности жидкости и его варианты. Патент РФ RU2792263C2, 21.03.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2792263C2/ru>
 10. Жемков Е.И. Метод и устройство гидростатического измерителя плотности морской воды // Материалы XII Международной научно-технической конференции "МСОИ-2011", 23-25 ноября 2011 г., в 2 т. М.: АПР, 2011. Т. 1 С. 95–97.
 11. Федотов Г.А. Новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 1. С. 58–65. URL: <https://hydrophysics.spbr.ru/jour/article/view/1141>
 12. Гусев Л.Б., Федотов Г.А. Способ измерения плотности морской воды с подвижного носителя гидрофизической аппаратуры. Патент РФ RU2747854C2, 17.05.2021. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2747854C2?ysclid=mfqszmn s2u898205723>
 13. Argo Program. URL: <https://www.aoml.noaa.gov/argo/> (дата обращения 07.08.2025).
 14. Краснодубец Л.А. Метод определения вертикального профиля плотности морской воды на основе измерений параметров движения неуправляемого автономного зонда // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 4 (30). С. 8–15. DOI: 10.33075/2220-5861-2017-4-8-15
 15. Краснодубец Л.А., Шишкин Ю.Е., Шаповалов О.Ю. и др. Морской автономный зонд-профилограф // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 1 (55). С. 42–52. URL: <https://msoe.ru/articles/2024/55-05/>
 16. Краснодубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В. Управление морскими буйами-профиломерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 69–79. URL: <https://xn--clagq7a.xn--plai/repository/issues/2012/04/06/>
 17. Солонина А.И. Моделирование цифровой обработки сигналов в MATLAB. Часть 9. Моделирование цифровых преобразователей Гильберта и дифференциаторов программными средствами и средствами GUI FDATool MATLAB // Компоненты и технологии. 2009. № 7 (96). С. 106–110. URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2009_07_106.pdf
 18. Дылевский А.В. Применение многочленов Баттерворта для построения модальных дифференциаторов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 1. С. 28–35. DOI: 10.17308/sait.2020.1/2577
 19. Зиатдинов С.И. Синтез дифференцирующего фильтра с линейной частотной характеристикой // Информационно-управляющие системы. 2015. № 4 (77). С. 119–121. URL: <https://i-us.ru/index.php/ius/article/view/4363>
 20. DMK-456 Датчик давления морского исполнения. URL: <https://xn--90ahjlpcccjdm.xn--plai/wp-content/uploads/2018/11/opisanie-dmk-456.pdf> (дата обращения 14.08.2025).
 21. APR3914 Subsea Pressure Transmitter. URL: <https://www.althensensors.com/uploads/products/datasheet/s/APR3914-Subsea-Pressure-Transmitter-en.pdf> (дата обращения 14.08.2025).

**Институт природно-технических систем,
г. Севастополь (Семыкина И.Ю., Краснодубец Л.А.)**

**Севастопольский государственный университет,
г. Севастополь (Краснодубец Л.А.)**

Контакты: Семыкина Ирина Юрьевна,
arinasemykina@gmail.com

Материал поступил в редакцию 20.08.2025

REFINEMENT OF METHOD OF SEAWATER DENSITY DYNAMIC MEASUREMENTS USING MARINE AUTONOMOUS PROBE-PROFILERS

I. Yu. Semykina¹, L. A. Krasnodubets^{1,2}

¹*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia*

²*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

The study described in the article relates to *in situ* determination of the vertical profile of seawater density ρ . Traditional density-determining methods by means of CTD parameters (conductivity, temperature, depth) have a multi-stage nature, complicating their use in real-time applications. A promising method is the dynamic measurements using a marine autonomous probe-profiler, which is equipped with only one pressure sensor and could determine the density profile at an order of velocity of 1 m/s. However, the current embodiment of this method requires knowing the seawater density on the surface. The objective of this study is to develop the refinement of the seawater density dynamic measurements method that does not require such information. The method is based on the analysis of the mathematical description of the probe-profiler motion in a field of hydrostatic pressure p during free immersion. It helps to obtain the equation for $\rho(p)$ that does not require a priori information about density. The method involves calculating the first and second derivatives of hydrostatic pressure. To reduce noise amplification because of differentiation, the use of filter-differentiators is proposed, and the frequency suppression band boundary that depends on the profiling velocity is determined. The influence of the probe-profiler immersion velocity on the dynamic error of pressure measurement and the analog-to-digital conversion error is analyzed. The range of profiling velocities has been obtained in which the influence of the indicated errors is reduced. Simulations were conducted to confirm the effectiveness of the proposed method refinement. The obtained results can be applied in determining the seawater density profile in oceanography, /fisheries, and underwater work.

Keywords: seawater density, autonomous probe-profiler, dynamic measurements, profiling velocity, filter-differentiator

REFERENCES

1. Robinson E., Hosegood P., Bolton A. Dynamical oceanographic processes im-pact on reef manta ray behaviour: Extreme Indian Ocean Dipole influence on local internal wave dynamics at a remote tropical atoll. *Progress in Oceanography*, 2023, vol. 218, id. 103129. DOI: 10.1016/j.pocean.2023.103129
2. Johnson L., Siegel D.A., Thompson A.F., et al. Assessment of oceanographic conditions during the North Atlantic EXport processes in the ocean from RemoTe sensing (EXPORTS) field campaign. *Progress in Oceanography*, 2024, vol. 220, id. 103170. DOI: 10.1016/j.pocean.2023.103170
3. Tozawa M., Nomura D., Yamazaki K., et al. Oceanographic factors determining the distribution of nutrients and primary production in the subpolar Southern Ocean. *Progress in Oceanography*, 2024, vol. 225, id. 103266. DOI: 10.1016/j.pocean.2024.103266
4. Xie Q., Gui D., Wang W., et al. Predictable oceanographic processes drive the formation of a distribution hotspot for Indo-Pacific humpback dolphins at a manmade harbor. *Ocean & Coastal Management*, 2024, vol. 253, id. 107160. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107160
5. Chevallay M., Jeanniard du Dot T., Goulet P., et al. Spies of the deep: An animal-borne active sonar and bioluminescence tag to characterise mesopelagic prey size and behaviour in distinct oceanographic domains. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2024, vol. 203, id. 104214. DOI: 10.1016/j.dsr.2023.104214
6. Anosov V.S., Kalashnikova E.V., Sharkov A.M., Samotesov Y.P. [The choice of methods for indirect determination of salinity, sound velocity and density of sea water that best meet the requirements of the NAVY]. *Navigatsiya i gidrografiya* [Navigation and hydrography], 2019, no. 58, pp. 54–61. (In Russ.). URL: <https://gningi.ru/images/journal/nig58.pdf>
7. IOC, SCOR and LAPSO, 2010: *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: calculation and use of thermodynamic properties*. Paris: UNESCO, 2015. 196 p. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188170>
8. Gaisky V.A., Gaisky P.V. [Possibilities of measuring the local density of seawater in probe instruments]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy* [Monitoring systems of environment], 2021, no. 1 (43), pp. 61–67. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-61-67 (In Russ.).
9. Gaisky V.A. Izmeritel' plotnosti zhidkosti i ego varianty. *Patent RF no. RU2792263C2*. [Patent for the liquid density meter and its variants]. Prioritet 21.03.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2792263C2/ru> (In Russ.).
10. Zhemkov E.I. [Method and device of a hydrostatic seawater density meter]. *Materialy XII Mezhdunarodnoi nauch-*

- no-tehnicheskoi konferentsii "MSOI-2011", 23–25 noyabrya 2011 g., v 2 t. [Proc. XII Int. sci.-tech. conf. "MSOI-2011". 23–25 Nov 2011. In 2 vol.] Moscow: APR Publ., 2011, vol. 1, pp. 95–97. (In Russ.).
11. Fedotov G.A. [New Modification of the Hydrostatic Method of the Sea-Water Density Determination]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2013, vol. 6, no. 1, pp. 58–65. (In Russ.). URL: <https://hydrophysics.spbrc.ru/jour/article/view/1141>
 12. Gusev L.B., Fedotov G.A. Sposob izmereniya plotnosti morskoi vody s podvizhnogo nositelya gidrofizicheskoi apparatury. Patent RF no. RU2747854C2. [Patent for the method for measuring seawater density from mobile hydrophysical equipment carrier]. Prioritet 17.05.2021. (In Russ.). URL: <https://patenton.ru/patent/RU2747854C2?ysclid=mfqszmn s2u898205723>
 13. *Argo Program*. URL: <https://www.aoml.noaa.gov/argo/> (accessed 07.08.2025).
 14. Krasnodubets L.A. [Method of determining the vertical profile of seawater density on the basis of measurements of the parameters of the movement of the uncontrollable autonomous probe]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy* [Monitoring systems of environment], 2017, no. 4 (30), pp. 8–15. DOI: 10.33075/2220-5861-2017-4-8-15 (In Russ.).
 15. Krasnodubets L.A., Shishkin Y.E., Shapovalov O.Y., et al. [Marine autonomous profiler probe]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy* [Monitoring systems of environment], 2024, no. 1 (55), pp. 42–52. (In Russ.). URL: <https://msoe.ru/articles/2024/55-05/>
 16. Krasnodubets L.A., Ziburdaev V.I., Alchakov V.V. [Control of marine buoys-profilemeters as a method for increasing representativeness of thermohaline measurements. Models of motion]. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal], 2012, no. 4, pp. 69–79. (In Russ.). URL: <https://xn--c1agq7a.xn--p1ai/repository/issues/2012/04/06/>
 17. Solonina A.I. [Modeling of digital signal processing in MATLAB. Part 9. Modeling of digital Hilbert converters and differentiators using software and GUI tools of FDA-Tool MATLAB]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2009, no. 7 (96), pp. 106–110. (In Russ.). URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2009_07_106.pdf
 18. Dylevskij A.V. [Application of the butterworth polynomials for the design of modal differentiators]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies], 2020, no. 1, pp. 28–35. (In Russ.). DOI: 10.17308/sait.2020.1/2577
 19. Ziatdinov S.I. [Differentiated filter with linear frequency characteristic]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2015, no. 4 (77), pp. 119–121. (In Russ.). URL: <https://ius.ru/index.php/ius/article/view/4363>
 20. *DMK-456 Datchik davleniya morskogo ispolneniya* [DMK-456 Marine Pressure Sensor]. URL: <https://xn--90ahjlpcccjdm.xn--p1ai/wp-content/uploads/2018/11/opisanie-dmk-456.pdf> (accessed 14.08.2025). (In Russ.).
 21. *APR3914 Subsea Pressure Transmitter*. URL: <https://www.althensensors.com/uploads/products/datasheets/APR3914-Subsea-Pressure-Transmitter-en.pdf> (accessed 14.08.2025).

Contacts: Semykina Irina Yurievna,
arinasemykina@gmail.com

Article received by the editorial office on 20.08.2025

INTRODUCTION

Data on the density distribution of seawater play a fundamental role in the study of dynamic processes in the world's oceans. Seawater density generally increases with depth; however, due to various factors such as seasonal temperature fluctuations, evaporation, and others, surface density increases may be observed in some zones, leading to the formation of thermohaline circulation. This circulation significantly influences large-scale ocean currents [1–3]. Information on the density profile of seawater is also important for studies of marine flora and fauna, as this parameter influences the distribution and migration of biological species [4, 5]. Furthermore, data on the density profile of seawater, in combination with other hydrological parameters, play a key role in assessing the effectiveness of technical means for implementing specialized marine tasks [6].

In practice, indirect methods for determining density based on in situ measurements of other seawater parameters are common. For example, the WOCE standard requires measuring seawater CTD parameters (conductivity, temperature, depth), processing them, and calculating seawater density using the TEOS-10 thermodynamic equation of state [7]. The main drawback of this method is the multi-stage nature of the procedure, which significantly complicates its application for determining seawater density in situ directly during vertical profiling.

Another common approach to determining seawater density is the use of hydrostatic pressure measurements. For example, to determine seawater density, studies [8, 9] propose using a tank containing a reference fluid, with differential pressure sensors placed in the upper and lower portions of the tank, and the density determined from the pressure difference measurements. However, this approach is inconvenient for operational profiling, since ensuring high-accuracy vertical density profiling requires hydrostatic equilibrium for each measurement, as well as information about the steady-state average temperature in the reservoir containing the reference fluid. Adherence to these conditions leads to significant inertia in the measurement channels, and consequently, during vertical profiling at high speeds, significant dynamic distortions in density measurements occur.

There are options for using hydrostatic pressure measurements that do not require a reservoir with a reference fluid. For example, studies [10–12] propose determining seawater density by the difference in pressures measured using a system of pressure sensors at several spatially separated points, for example, at the boundaries of a segment, at the nodes of a pyramid, etc. The advantage of this approach is the invariance of density measurements with respect to seawater temperature and vertical profiling velocity. How-

ever, obtaining the pressure difference by subtracting two pressure measurements obtained by spatially separated sensors typically introduces significant error.

Another approach to determining the seawater density profile is the use of dynamic measurements. This approach is being developed at the Institute of Natural and Technical Systems specifically for operational probing and involves the use of an autonomous profiling probe that has known design parameters and performs free vertical movement (immersion) at a speed of approximately 1 m/s, which is significantly higher than the profiling speed of the Argo program's CTD probes [13], which perform profiling during ascent, for which it takes 5–7 hours to ascend from a horizon of 2000 m.

In one implementation option of this approach [14], the vertical components of the probe's velocity and acceleration, as well as the depth, are continuously measured during the dive using an onboard navigation system, and the vertical density profile is determined from the dynamics of changes in these parameters. However, onboard navigation systems capable of measuring vertical velocity and acceleration, as well as dive depth with acceptable accuracy over hours-long vertical profiling, are extremely complex in design. Furthermore, this dynamic measurement method determines the seawater density profile as a function of depth, while modern oceanographic instruments determine hydrological characteristics in the ocean depth as a function of pressure.

To overcome these shortcomings, [15] proposed equipping an autonomous profiling probe with a pressure sensor. It is assumed that the shape and geometric parameters of the probe body remain constant. Pressure measurements are taken during the dive, when the environment is in a state of hydrostatic equilibrium. During the dive, the probe, if moving horizontally, only follows the water flow lines. Under such conditions, the horizontal forces acting on the probe are negligible compared to the vertical ones. Under conditions of hydrostatic equilibrium, the pressure change recorded by the profiler during the vertical movement of the probe in a stratified ocean is determined exclusively by the change in seawater density. The vertical profile of seawater density is then determined from the dynamics of pressure change, continuously measured during immersion, using the formula

$$\rho(p) = \rho_0 \left(2 - \frac{1}{g} (\ddot{p}(t) + a\dot{p}(t)^2) \right), \quad (1)$$

where ρ is the seawater density; p is the measured pressure; ρ_0 is the seawater density measured at the surface before the probe's immersion or the average value of seawater density for a specific region; g is the gravitational acceleration for the geographic latitude

and depth at which vertical profiling is being conducted; $\dot{p}(t)$ and $\ddot{p}(t)$ are the first and second derivatives of p with refer to time t , respectively, calculated by the difference method using a microcontroller; a is the design constant:

$$a = \frac{C_x S_m}{2V_b},$$

where V_b is the volume of the probe body; S_m is the cross-sectional area of the probe; C_x is the drag coefficient. The essence of the method for dynamically measuring seawater density using an autonomous profilograph probe equipped with a pressure sensor is shown in Fig. 1.

Fig. 1. The essence of the method of dynamic measurements of seawater density using autonomous profiling probes.

1 — probe, 2 — pressure sensor, 3 — derivative calculator, 4 — density calculator

The advantages of the described approach include determining the vertical profile of seawater density as a function of pressure using only a single pressure sensor. However, implementation requires prior information on the surface seawater density. Furthermore, it is proposed to use pressure derivatives, and differentiation amplifies high-frequency noise, including analog-to-digital conversion noise. Therefore, the challenge arises of developing a modification of the dynamic measurement method for determining the vertical density profile using a pressure sensor that does not require prior information on density and also suppresses analog-to-digital conversion noise to reduce the resulting error in seawater density determination. This study is devoted to solving this problem.

MATHEMATICAL APPARATUS

When an autonomous profilograph probe is submerging, it is subject to a system of forces [16] consisting of

$$F_m = mg,$$

hydrodynamic drag force

$$F_c = \frac{C_x S_m \rho}{2} \dot{z}(t)^2,$$

where z is the probe's immersion depth; $\dot{z}(t)$ is the probe's velocity in seawater, and the total pressure from the surrounding marine environment, the main

component of which generates the buoyant Archimedeian force

$$F_e = \rho g V_b.$$

In accordance with Newton's second law, the equation for the free immersion of the probe is written as follows:

$$m\ddot{z}(t)^2 = mg - \rho g V_b - \rho \frac{C_x S_m}{2} \dot{z}(t)^2. \quad (2)$$

The pressure sensor is located in the nose of the probe, and the pressure it measures is equal to

$$p(t) = p_a + \rho g z(t), \quad (3)$$

where p_a is atmospheric pressure; while it is fair

$$\dot{p}(t) = \rho g \dot{z}(t) \text{ и } \ddot{p}(t) = \rho g \ddot{z}(t). \quad (4)$$

Taking into account (3) and (4), the free-immersion equation of the probe (2) seems a nonlinear differential equation relating $\dot{p}(t)$, $\ddot{p}(t)$ and ρ . A second-order algebraic equation can be considered with respect to ρ

$$\rho^2 \left(\frac{g^2 V_b}{m} \right) + \rho (-g^2) + \left(\frac{C_x S_m}{2mg} \dot{p}(t)^2 + \ddot{p}(t) \right) = 0,$$

having a solution

$$\rho(p) = \frac{m}{2V_b} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4V_b}{mg^2} \left(\ddot{p}(t) + \frac{C_x S_m}{2mg} \dot{p}(t)^2 \right)} \right). \quad (5)$$

Comparing with (1), it is easy to see that (5) has a higher computational complexity, requires more information about the design and parameters of the probe, but does not assume the use of a priori information about the density of seawater.

The error in vertical density profiling $\rho(p)$ depends on a large number of factors: the error of the known pressure $p(t)$, the errors with which the constants in formula (5) are known, the accuracy of the arithmetic operations, etc. Since the only source of information obtained by the probe about the marine environment is the pressure sensor, we will consider the transformation of the pressure signal in more detail (see Fig. 1). Due to the fact that the pressure sensor has inertia, during the response time of the pressure sensor τ , the probe sinks, forming a dynamic pressure measurement error ε_{dyn} . In digital form, a change in the pressure signal will occur only when the pressure difference at two depths exceeds the analog-to-digital conversion step, creating an analog-to-digital conversion error ε_{aun} . Therefore,

$$p(t) = p(t - \tau) + \Delta p \delta_p + \varepsilon_{\text{dyn}} + \varepsilon_{\text{aun}},$$

where Δp is the pressure sensor's measurement range, corresponding to the range of pressure change during vertical profiling to a given depth; δ_p is the reduced error of the pressure sensor.

The dynamic error ε_{dyn} can be expressed as

$$\varepsilon_{\text{dyn}} = \frac{\partial p}{\partial z} \dot{z}(t) \tau. \quad (6)$$

For slowly changing quantities, the analog-to-digital conversion error ε_{ann} is harmonic in nature, close to a sawtooth with a frequency

$$f_{\text{ann}} = \frac{\dot{p}(t)}{\Delta p / 2^N}, \quad (7)$$

which first harmonic component is

$$\varepsilon_{\text{ann}(1)} = \frac{\Delta p / 2^N}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{\dot{p}(t)}{\Delta p / 2^N}\right). \quad (8)$$

By virtue of (4), the probe's velocity $\dot{z}(t)$ will be close to constant, depending on the ratio of the probe's design parameters V_b , S_m , C_x , m to the density of sea-water ρ

$$\dot{z}(t) \approx \sqrt{g \frac{2V_b}{C_x S_m} \left(\frac{m}{\rho} - 1\right)}, \quad (9)$$

and the change in pressure $p(t)$ will be nearly linear. Then, to estimate the magnitude of the errors ε_{dyn} , and ε_{ann} , we can write

$$\dot{z}(t) \approx v \quad \text{and} \quad p(t) \approx 10^4 vt, \quad \text{and} \quad \dot{p}(t) \approx 10^4 v, \quad (10)$$

where v is the profiling velocity.

To ensure the reliability of pressure sensor measurements, it is necessary to satisfy the condition

$$\varepsilon_{\text{dyn}} < \Delta p \delta_p,$$

which, taking into account (6) and (10), can be represented as

$$10^4 v \tau < \Delta p \delta_p. \quad (11)$$

Direct calculation of $\dot{p}(t)$ will amplify ε_{ann} by a factor of X , where

$$X = \frac{2^{N+1} 10^4 \pi v}{\Delta p}. \quad (12)$$

To avoid amplifying analog-to-digital conversion noise, derivative calculators must have filtering properties, i.e., act as differentiating filters. Considering the microcontroller-based implementation, it is advisable to use digital filters, such as finite-pulse-response differentiating filters [17], modal differentiators based

on normalized Butterworth polynomials [18], or differentiating filters with output signal delay [19].

Differentiating filters are configured so that their amplitude-frequency characteristic $A(\omega)$ at the frequency f_{ann} is below the level of $1/X$ (Fig. 2). To ensure this condition, it is required that

$$f_n = \frac{f_{\text{ann}}}{2}, \quad (13)$$

which, taking into account (7) and (10), allows us to write:

$$f_n = 2^{N-1} 10^4 \frac{v}{\Delta p}. \quad (14)$$

Meanwhile, at low profiling rates v , the frequency suppression band boundary f_n may be close to the operating frequency range $f_{pa\delta}$. To prevent this, condition must be met:

$$f_n > 2f_{pa\delta}. \quad (15)$$

Fig. 2. Required amplitude-frequency characteristic of the differentiator filter

Since $p(t)$ has a nearly linear increase, the value of $f_{pa\delta}$ can be estimated from the response time of the pressure sensor:

$$f_{pa\delta} = \frac{1}{\tau}.$$

In this case, taking into account (6) and (10), condition (15) can be represented as

$$2^{N-1} 10^4 \frac{v}{\Delta p} > \frac{2}{\tau}. \quad (16)$$

By analyzing (11) and (16) together, we can obtain a relationship that determines the range of profiling velocities v that ensures the smallest error in pressure signal conversion:

$$\frac{\Delta p}{2^{N-2} 10^4 \tau} < v < \frac{\Delta p \delta_p}{10^4 \tau}. \quad (17)$$

For a selected v , taking into account (9) and (10), the design parameters V_b , S_m , C_x and m of the probe are selected from the relationship

$$\frac{1}{C_x S_m} (m - 1027 V_b) \approx 52 v^2. \quad (18)$$

Thus, expressions (5), (14), (17), and (18) form the mathematical basis for a modification of the dynamic measurement method for determining the vertical pro-

file of seawater density. This modification uses a single pressure sensor, suppresses analog-to-digital conversion noise, reduces the resulting error component, and does not require a priori information on seawater density.

IMPLEMENTATION OPTION

The described modification of the dynamic measurement method for determining the vertical density profile of seawater can be implemented using the functional diagram shown in Fig. 3.

Fig. 3. Functional diagram of the method implementation

The pressure sensor should be a marine-grade sensor, for example, with piezoceramic or capacitive ceramic sensing elements [20] or manufactured using silicon-on-sapphire technology [21]. The on-board microcontroller can be a 32-bit microcontroller, such as the STM32 family, with an integrated 12-bit analog-to-digital converter (ADC), 16-bit I/O ports and compatibility with various memory devices, such as flash memory. A radio modem can be used as the communication device. If necessary, instead of the built-in on-board microcontroller, you can use an external analog-to-digital converter chip, for example, a sigma-delta ADC with a bit depth of 16 to 24, which will further reduce the noise of the analog-to-digital conversion.

As an example, consider the problem of obtaining a vertical density profile of seawater at a given depth of 1000 m. This depth corresponds to a pressure sensor measurement range of $\Delta p = 10$ MPa. When using a pressure sensor [21], the reduced error will be $\delta_p = 0.25\%$, and the response time $\tau = 1$ ms. With an analog-to-digital converter resolution of $N = 24$, the profiling velocity v should lie in the range from 0.238 to 25 m/s. The filter-differentiator's frequency rejection band in this case will be from 7.806 to 820 Hz, and at a profiling velocity of $v = 1$ m/s, it will be $f_n \approx 33$ Hz.

The calculated range of profiling velocities can be estimated by comparison with other known probing systems. For example, the Argo system's probes [13] perform profiling at an average velocity of 0.1 m/s. This value is below the left boundary of the calculated range of profiling velocities v , i.e., profiling using the developed modification of the dynamic measurement method is performed at significantly higher velocities.

MODELING RESULTS

The study of the proposed modification of the dynamic measurement method for determining the vertical density profile of seawater was performed using computer modeling and the MatLab Simulink software package.

A model of an autonomous profiling probe during free diving is shown in the Appendix, Fig. II1, along with a measurement and calculation model in Fig. II2. The vertical seawater density profile is defined as a 1-D lookup table based on the actual density profile $\rho(p)$ obtained from the Argo probe: 77° N-latitude, atmospheric pressure is set to 101.325 kPa. The probe parameters used in the modeling are shown in Table.

Tab. Parameters of the autonomous profilograph probe

Finite impulse response filters implemented using the Variable Bandwidth FIR Filter block were selected as the filter element. The filter's amplitude-frequency response was adjusted using the filterDesigner tool. A Hamming window was used as the window function.

Simulation of the proposed modification of the dynamic measurement method for determining the vertical density profile of seawater demonstrated high convergence of the results. For illustration purposes, Fig. 4 shows the Discrepancy (percent) oscilloscope readings (see Appendix, Fig. II2), which display the discrepancy in percentage between the [Ro(t) model] and [Ro(t) measure] signals, respectively, obtained at the output of the probe model and the output of the measurement and calculation model.

Fig. 4. Discrepancy in the results of dynamic measurements of seawater density.

As can be seen, despite the filtering, the [Ro(t) measure] signal contains noise resulting from the analog-to-digital conversion. However, the gain of $X = 1.054 \times 10^5$ calculated using (12) is not observed, and the discrepancy is only a fraction of a percent.

It should be further noted that the resulting discrepancy is a method error and cannot be considered a metrological error in dynamic measurements. Quantifying the error in dynamic seawater density measurements for the proposed modification of the method is the subject of a separate study.

CONCLUSION

This paper proposes a modification of the dynamic measurement method for determining the vertical profile of seawater density using an autonomous profilograph probe equipped with a pressure sensor. The study is based on an analysis of the mathematical description of the motion of an autonomous profiling probe in a hydrostatic pressure field p during free immersion. This analysis yields an equation for determining $\rho(p)$ that does not require a priori density information.

The developed modification involves calculating the first and second derivatives of hydrostatic pressure. To reduce the effect of noise amplification during differentiation, the use of differentiating filters is proposed, and a recommendation is given for determining the frequency rejection band boundary depending on the profiling speed. Digital filters with finite impulse response are proposed and tested as filters.

The effect of the profiling probe's immersion speed on the dynamic pressure measurement error and the error of analog-to-digital conversion is analyzed. A range of profiling speeds is identified that minimizes

the impact of these errors. For a profiling velocity of $v=1$ m/s, the simulation results show that the method error does not exceed $5 \times 10^{-3}\%$.

APPENDIX

Fig. II1. Computer model in MatLab Simulink: probe immersion model

Fig. II2. Computer model in MatLab Simulink: measurement and calculation model