

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ С ДВИЖУЩЕГОСЯ СУДНА

Н.А.Греков, Н.В.Салтанов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Институт Гидромеханики

НАН Украины

г. Киев, ул. Желябова, 8/4

E-mail: saltanov@ukrpost.net

Разнообразные гидрофизические явления (от мелкомасштабной до межгодичной изменчивости), имеющие пространственные масштабы от десятков сантиметров до размеров океана, могут изучаться с помощью измерительных комплексов, работающих на ходу судна. К настоящему времени разработано много комплексов, позволяющих измерять профили элементов водной среды с судов, работающих как на пониженных, так и на крейсерских скоростях. Исследуем известные методы измерения и выделим диапазоны их эффективного использования, а также рассмотрим динамику системы зондирования с движущегося судна для первого метода.

Первый метод. Он заключается в том, что гидрозонд буксируют за судном в поверхностном слое океана и периодически заглубляют его на определенную глубину путем сматывания кабель-троса, троса или фала. Циклические изменения глубины погружения гидрозонда можно делать на полном ходу судна и на разрезе любой длины,

значит, отсутствует ограничение на исследование больших пространственных масштабов. Однако, как и в предыдущем способе, зонд необходимо поднимать вверх, чтобы начать новый цикл измерения. Поэтому остается ограничение на минимальный интервал между зондированиями. Гидрозонд имеет механическую связь с судном, это дает возможность сделать его сложным, точным, приспособленным для комплексных измерений. К этой группе измерителей относятся гидрофизический буксируемо-зондирующий комплекс МГИ 4204 (Минизонд) [1] и гидрозонд с твердотельной памятью [2].

Рассмотрим более подробно динамику зондирования с движущегося судна для этого метода и проанализируем ее. Исследуем процесс погружения системы "трос-гидрозонд" с движущегося судна.

При исследовании процесса погружения системы "трос-гидрозонд" с движущегося судна будем предполагать, что скорость разматывания троса с лебедки равна сумме абсолютных значений скоростей носителя и зонда, так что натяжение троса у лебедки близко к нулю и трос кинематически приближенно отслеживает траекторию зонда.

Использование того обстоятельства, что кинематически трос приближенно отслеживает траекторию зонда, сводит задачу к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений [3]. При этом, если масса троса сравнима или превосходит массу зонда, то такая система в динамическом отношении является системой переменной массы. При сделанных допущениях в пренеб-

режении силой инерции элементов системы для безмерного времени τ погружения зонда на текущую безразмерную глубину ξ в одномерном случае получается следующая задача

$$\frac{d\tau}{d\xi} = \frac{\sqrt{\gamma_k + \gamma_\kappa (\xi + \bar{U}_0 \tau)}}{\sqrt{1 + \gamma_\omega \cdot \xi}},$$

$$\xi = 0, \quad \tau = 0; \quad (0 \leq \xi \leq 1)$$

$$\tau = \frac{U_* t}{H}; \quad \xi = \frac{Z}{H}; \quad \bar{U}_0 = \frac{U_0}{U_*}; \quad \gamma_\omega = \frac{\omega H}{W_*};$$

$$\gamma_k = \frac{K_* \rho \Sigma_* U_*^2}{2W_*};$$

$$\gamma_\kappa = \frac{\pi K_f \rho d H U_*^2}{2W_*}, \quad (1)$$

где t - время, Z - текущее заглубление зонда, U_0 - скорость судна, U_* - характерное значение скорости, H - глубина погружения зонда, W_* и ω - вес в воде зонда и единицы длины троса, ρ - плотность воды, K_* и Σ_* - коэффициент сопротивления и миделева площадь зонда, K_f и d - коэффициент сопротивления трения и диаметр троса. Если величина $\tau(\xi)$ найдена, то соответствующая вытравленная длина S троса определится выражением

$$\sigma = \xi + \bar{U}_0 \cdot \tau, \quad \sigma = \frac{S}{H}. \quad (2)$$

Пусть τ_n есть значение времени τ в момент достижения зондом глубины $\xi = 1$ ($Z = H$). Тогда из (2) и (1)

для соответствующих этой глубине вытравленной длины σ_n и скорости \bar{U}_c^H сматывания троса получаем следующие выражения

$$\sigma_n = 1 + \bar{U}_0 \cdot \tau_n, \quad (3)$$

$$\bar{U}_c^H = \frac{d\sigma}{d\tau} = \bar{U}_0 + \sqrt{\frac{1 + \gamma_\omega}{\gamma_k + \gamma_\kappa (1 + \bar{U}_0 \tau_n)}}, \quad (4)$$

при $\tau = \tau_n$.

На основе выражений (1), (3) и (4) были выполнены расчеты величин τ_n , σ_n и \bar{U}_c^H для следующего набора размерных параметров системы:

$$H = 500; 1000; 1500 \text{ (м)};$$

$$d = 0,004; 0,005; \text{ (м)};$$

$$U_* = 1 \text{ (м/с)}; \quad U_0 = 5 \div 10 \text{ (м/с)};$$

$$K_f = 0,003;$$

$$\omega = \frac{\pi (\rho_T - \rho) d^2}{4} \cdot g; \quad \rho_T = \rho; \quad 2\rho;$$

$$\rho = 10^3 \text{ (кг/м}^3\text{)};$$

$$g = 9,8 \text{ (м/с}^2\text{)}; \quad K_* = 0,4; \quad \Sigma_* = \frac{\pi D_*^2}{4};$$

$$D_* = 0,12 \text{ (м)};$$

$$W_* = 200 \text{ (н)}, \quad (5)$$

где ρ_T - плотность материала троса, g - ускорение силы тяжести, D_* - диаметр миделева сечения зонда. Остальные обозначения имеют тот же смысл, что и в соотношениях (1). Набору размерных параметров (5) соответствуют следующие значения безразмерных параметров γ_k , γ_κ и γ_ω , входящих в соотношения (1) - (4):

$$\gamma_k = 0,0113; \quad \bar{U}_0 = 5 \div 10; \quad (6)$$

Результаты расчетов представлены на рисунках 1-3.

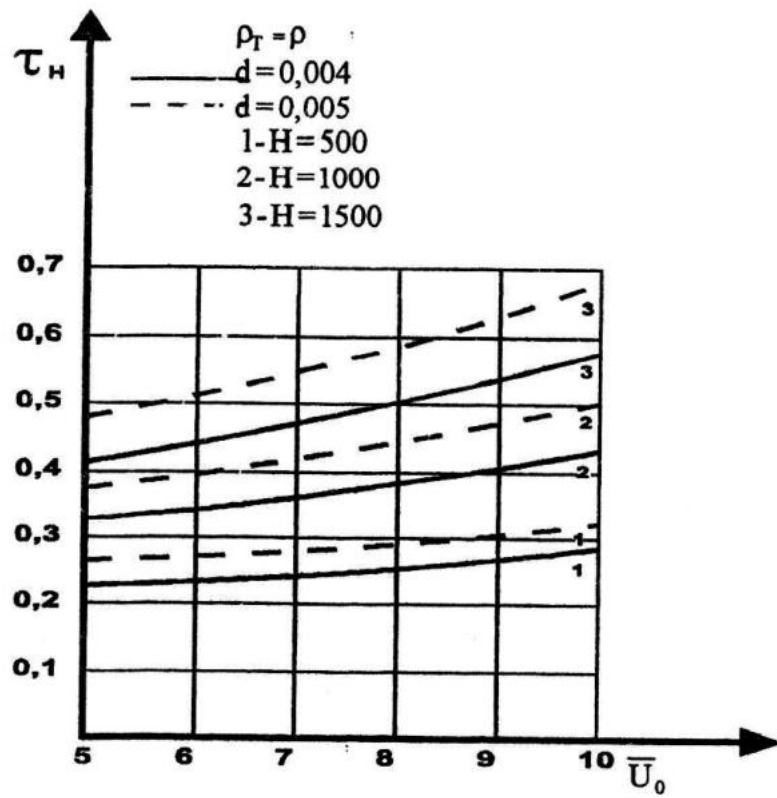


Рисунок 1

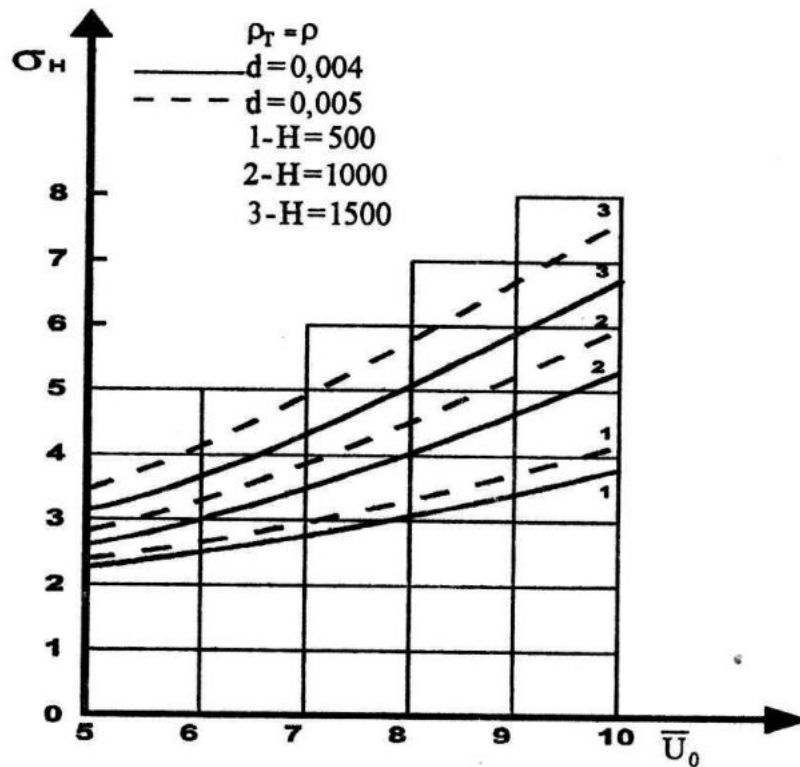


Рисунок 2

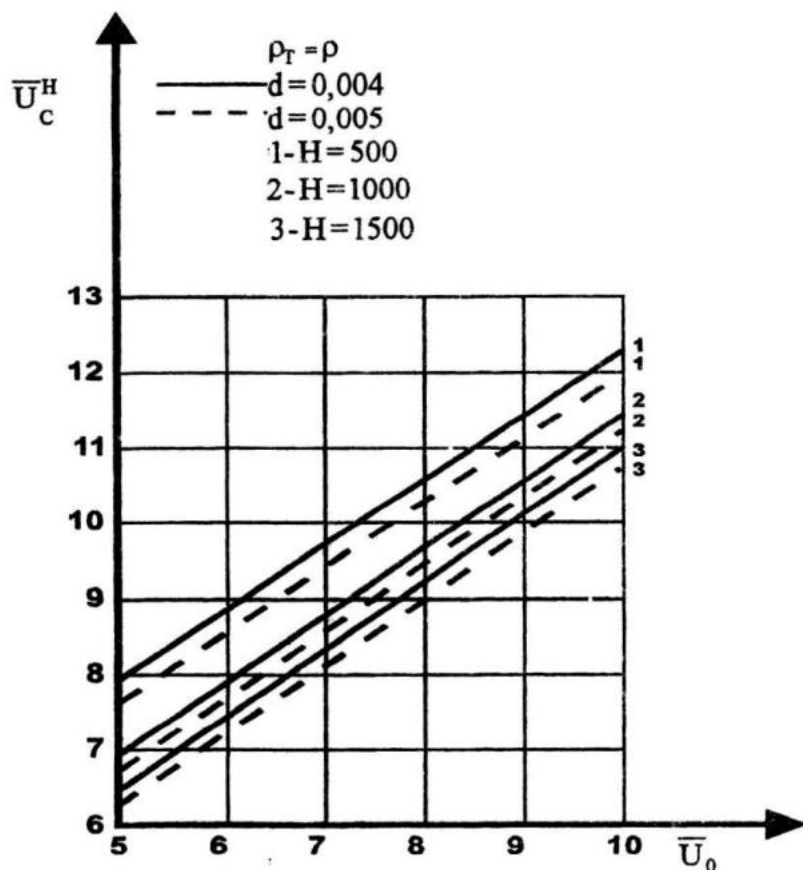


Рисунок 3

Можно видеть, что все три величины τ_H , σ_H и \bar{U}_C^H являются нарастающими функциями скорости \bar{U}_0 . При этом в рассматриваемом диапазоне изменения скорости зависимости величин τ_H и \bar{U}_C^H близки к линейным. В зависимостях же величины σ_H нелинейности проявляются заметнее. Большим глубинам H и диаметрам троса d соответствуют большие значения относительных времен τ_H и длин σ_H и, наоборот, меньшие значения скоростей \bar{U}_C^H . При $\gamma_\omega = 0$ эти особенности с очевидностью следуют непосредственно из выражений (1), (3) и (4), поскольку величина γ_k пропорциональна про-

изведению (dH). При $\rho_T = 2\rho$ с ростом глубины H кривые $\bar{U}_C^H(\bar{U}_0)$, соответствующие различным значениям диаметра d , сближаются более существенно, чем при $\rho_T = \rho$. При этом для $H = 1500$ м они практически сливаются. Как представляется, эта особенность обусловлена влиянием плавучести троса.

Оценим время приближения системы "трос-гидрозонд" к равновесному положению после стопорения лебедки.

В принятых выше предположениях после достижения зондом заданной глубины H вытравленная длина троса равна $L_H = H + U_0 t_H$, где, как отмечалось ранее, величина t_H есть время

достижения зондом глубины H . При этом одна часть троса длиной $U_0 t_H$ расположена близко к горизонту, а другая его часть длиной H расположена вертикально. После стопорения лебедки вертикально развитая часть троса начнет приближаться к его равновесному положению. Для оценки времени приближения вертикально развитой части троса к равновесному положению смоделируем ее жесткой системой "стержень-тело" с параметрами, соответствующими параметрам указанной части троса и зонда. Полагая, что в своей верхней части стержень закреплен шарнирно и выбирая в качестве обобщенной координаты угол β стержня с вертикалью, составим уравнение движения этой системы в форме уравнения Лагранжа второго рода [4]. В результате в пренебрежении инерционными слагаемыми будем иметь:

$$\begin{aligned}
 & - \left(1 + \frac{\gamma_n}{2} \right) \sin \beta + \frac{\gamma_n}{2} \left[\left(\bar{U}_0 \cos \beta - \frac{1}{2} \frac{d\beta}{d\tau} \right) + \right. \\
 & \left. + \mu_f^n \sqrt{\bar{U}_0^2 \sin^2 \beta + \left(\bar{U}_0 \cos \beta - \frac{1}{2} \frac{d\beta}{d\tau} \right)^2} \right] \times \\
 & \times \left(\bar{U}_0 \cos \beta - \frac{2}{3} \frac{d\beta}{d\tau} \right) + \\
 & + \gamma_k^n \left(\bar{U}_0 \cos \beta - \frac{d\beta}{d\tau} \right)^2 = 0, \\
 & \gamma_n = \frac{1}{\mu_f^n} \cdot \gamma_k; \quad \mu_f^n = \frac{\pi K_f}{K_n}; \\
 & \gamma_k^n = \frac{K_n^* \rho D \cdot l \cdot U_*^2}{2W_*}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Здесь K_n - коэффициент сопротивления троса, K_n^* - коэффициент сопро-

тивления зонда при боковом обтекании. l - длина зонда. Остальные обозначения имеют тот же смысл, что и в (1). Заметим, что при интегрировании по длине стержня, которое проводилось при получении уравнения Лагранжа второго рода, подкоренные выражения, содержащие текущую длину стержня, для упрощения выкладок были заменены их средними по длине стержня значениями. Пусть

$$K_n = 1,2; \quad K_n^* = 1,2; \quad l_* = 0,7(\text{м}). \quad (8)$$

Тогда для набора параметров (5) и (8) имеем

$$\mu_f^n = 0,0785; \quad \gamma_k^n = 0,252. \quad (9)$$

Пренебрегая множителями μ_f^n и γ_k^n , и опуская из-за громоздкости часть промежуточных выражений, окончательно определим момент времени, когда система "трос-гидрозонд" оказывается близкой к равновесному положению.

Как оказалось, например, для заданных выше параметров угол β отличается от равновесного на величину, составляющую 10 % его равновесного значения, в момент времени

$$\tau = \tau_* \cong \frac{1,5}{\bar{U}_0 \sqrt{1 - \delta_\beta^2}} \cong \frac{1,5}{\bar{U}_0}. \quad (10)$$

Угол β отличается от равновесного значения на величину, составляющую 1 % его равновесного значения, в момент времени

$$\tau = \tau_* \approx \frac{2,8}{\bar{U}_0 \sqrt{1 - \delta_\beta^2}} \approx \frac{2,8}{\bar{U}_c} \quad (11)$$

Как следует из (10) и (11), для того, чтобы система "стержень-тело" развернулась к равновесному положению от угла, составляющего 99 % его равновесного значения, необходимо почти столько же времени, сколько надо, чтобы указанная система развернулась от нулевого угла (т. е. от вертикали) до угла, составляющего 90 % его равновесного значения.

Конечно, представляют интерес задачи динамики выборки системы "трос-гидрозонд" на ходу судна с различными условиями, например: постоянном натяжении троса у лебедки; постоянной угловой скорости вращения барабана лебедки; постоянной намотки троса на барабан лебедки, разделы которых по возможности будут включаться в последующие сборники.

Второй метод. Измерения с помощью гидрозондов свободного падения разового действия выполняются на полном ходу судна, что снимает ограничения на изучения явлений больших пространственных масштабов. Электрическая связь между погружаемым устройством (ПУ) и бортовым устройством (БУ) осуществляется с помощью тонкого двужильного медного провода, изолированного от воздействия воды. После сбрасывания ПУ, которое по форме напоминает каплю, провод свободно сматывается с катушек пускового патрона, закрепленного на борту судна, и погружаемого устройства. При полном сматывании провода с одной из

катушек провод натягивается, рвется и ПУ тонет. Так как ПУ теряется безвозвратно, оно должно быть недорогим. При таком исполнении гидрозондов трудно получить высокую точность измерения распределенных параметров водной среды, так как в ПУ отсутствует датчик глубины, и глубина отсчитывается пропорционально времени погружения прибора. Из-за возможного запутывания и обрыва проводов эти измерители могут работать на судне последовательно, т.е. только после окончания работ одного ПУ запускается другой зонд. Это ограничивает возможность изучения малых пространственных масштабов. К числу этих измерителей относятся батитермографы разового действия Т-4, Т-6, Т-7 фирмы Sippican (США) и др. [5, 6, 7].

Третий метод. Измерения проводятся с помощью гидрозондов свободного падения и всплытия многократного действия на полном ходу судна. Гидрозонды этой группы имеют положительную плавучесть и заглубляются с помощью специального груза, который автоматически отсоединяется при достижении заданной глубины. Измеряемые элементы регистрируются на внутреннем регистраторе, размещенном в контейнере. Здесь нет ограничений на исследование малых пространственных масштабов, так как гидрозонды можно выбрасывать за борт через весьма короткие промежутки времени. Но в целом на выполнение разреза затрачивается много времени. Выпустив партию гидрозондов, судно возвращается в точки измерения, чтобы найти и выловить всплывшие на поверхность гидро-

зонды. В лучшем случае на проведение разреза затрачивается в три раза больше времени, чем прохождение его полным ходом. Так как зонды не имеют механической связи с судном, их легко потерять по разным причинам: не отделился своевременно балластный груз и гидрозонд не всплыл, не удалось найти всплывший гидрозонд в штормовом море и т.п. По опубликованным данным потери этих гидрозондов могут достигать до 50 % от числа выпущенных гидрозондов. Гидрозонды этого типа предназначены для комплексных измерений и стоят дорого. По изложенным выше причинам исследователи не рискуют делать данным методом разрезы большой протяженности, а это ограничивает возможности способа в изучении больших пространственных неоднородностей. Примером таких измерителей является система 7065 фирмы Bissett - Bergman [8].

Четвертый метод. Гидрозонд с подвижным крылом совершает челночные перемещения вверх-вниз по тросу между упорами-ограничителями, где и происходит механическое переключение угла наклона крыла. Работает прибор при пониженных скоростях судна, что ограничивает возможность исследования больших пространственных масштабов. Ограничены возможности этого метода также снизу со стороны малых масштабов, так как зонд должен вернуться наверх, чтобы начать новый цикл измерения. Траектория движения гидрозонда в слое воды имеет пилообразный вид. Для получения профиля океанических элементов необходимо усреднить данные измерений, получен-

ные при погружении и всплытии гидрозонда. Гидрозонды этого типа могут быть укомплектованы несколькими датчиками и выполнять комплексные измерения. Описанный метод отражен в патентах [9, 10].

Пятый метод. Он реализуется в комплексах с автоматически управляемыми по глубине ПУ. Эти комплексы сложнее ранее рассмотренных, так как содержат в ПУ кроме измерителей элементов водной среды еще и исполнительные механизмы системы управления рулями глубины. ПУ таких комплексов могут работать в нескольких режимах: буксироваться на заданной глубине, периодически погружаться и всплывать по заданной траектории, следовать по заданной изотерме. Для получения профилей океанографических элементов используется второй режим. В этом случае данные измерений, полученные при погружении и всплытии ПУ на одних и тех же горизонтах, усредняются. Метод имеет ограничение на исследование малых пространственных неоднородностей. Обладая инерционностью, система, состоящая из ПУ и кабель-троса, может совершать колебания в исследуемом слое с ограниченной частотой. Из-за больших динамических нагрузок работа автоматически управляемых систем происходит на пониженных скоростях судна, что ограничивает исследование больших пространственных неоднородностей. Увеличить скорость буксировки возможно, но при этом необходим спецкабель с обтекателями и, соответственно, спецлебедка больших размеров, что требует использования только

специализированных судов. В этой группе измерителей наиболее известны комплексы "Нырок", "Галс" и Batfish [11, 12, 13, 14].

Шестой метод. Метод заключается в следующем: на определенных горизонтах буксируют однотипные точечные измерители, затем по результатам измерений восстанавливают вертикальное распределение элементов. На этом принципе построены гирлянды зондов. На буксируемой кабеле или кабель-тросе через определенные отрезки длины укреплены датчики или многоканальные измерители. Связь с бортовым устройством осуществляется гальванически по многожильному кабелю или используется индуктивная связь с одножильным кабель-тросом. К недостаткам этого метода измерения следует отнести: большую дискретность измерения элементов по вертикали и сложность исполнения таких систем. Первый недостаток ограничивает возможности метода на изучение гидрофизических явлений малых пространственных масштабов. Так, например, инверсии температуры, имеющие значительную горизонтальную протяженность, могут остаться незамеченными исследователем. Метод очень сложен в постановке. Скорость буксировки гирлянды зондов не превышает $6 \div 8$ узлов. К числу таких измерителей относятся термисторные цепи [15].

Седьмой метод. Метод базируется на измерении средних характеристик слоя морской воды и их мгновенных значений на верхней и нижней границе слоя. Средние значения определяются с помощью распределенных первичных

преобразователей, мгновенные значения измеряются точечными датчиками. Профили элементов морской воды восстанавливаются по всей совокупности измерений с использованием наиболее подходящих теоретических моделей вертикальных распределений. Измерительные комплексы, основанные на этом принципе, привлекают простотой и надежностью в работе. С их помощью можно исследовать большие пространственные неоднородности элементов. Как и в предыдущем методе измерения с помощью точечных и распределенных датчиков могут быть выполнены как угодно часто. Но по этим измерениям нельзя получить тонкую вертикальную структуру поля. Следовательно, у этого метода имеются ограничения на исследование малых пространственных неоднородностей. Ограничены возможности этого метода для комплексных измерений. Если точечными датчиками измеряют большинство элементов водной среды, то распределенными преобразователями всего два параметра (среднюю температуру и средневзвешенную скорость звука в слое воды). К числу таких измерителей относится термохалинный буксируемый измерительный комплекс МГИ 4206 с распределенными датчиками температуры [16] и обратные эхолоты.

Восьмой метод. Метод измерения осуществляется следующим образом [17]. С движущегося судна спускают кабель-трос (трос) отрицательной плавучести, имеющий ограничитель на конце. По нему последовательно опускают гидрозонды, которые конструктивно выполнены в виде крыла. Число

гидрозондов в партии и периодичность их запуска определяются предварительно в зависимости от требуемой дискретности измерений. Горизонтальная составляющая скорости их перемещения по кабель - тросу соизмерима со скоростью движения судна. Следовательно, гидрозонд при движении в воде остается в одной географической точке и погружается вертикально. Данные измерений с движущихся гидрозондов передаются на борт судна по индуктивному или акустическому каналу связи и регистрируются в аналоговом или цифровом виде. Когда вся партия гидрозондов достигает конца кабель - троса, ее поднимают совместно с кабель - тросом на борт судна. Затем всю последовательность операций повторяют. Описанный метод позволяет проводить измерения профилей элементов водной

среды на разрезах в широком диапазоне расстояний между ними. Минимальное расстояние между соседними профилями лимитируется только пространственными размерами гидрозондов. Не существует ограничений у этого метода на исследование больших пространственных неоднородностей. Измерительные комплексы, построенные по этому принципу, работают на полном ходу судна. Однако при скорости судна < 6 узлов величина заглубления не превышает 150 метров.

Результаты проведенного анализа методов измерения вертикальных распределений параметров водной среды на ходу судна сведены в табл. 1. Здесь цифрами обозначены методы измерения в том порядке, как они перечислены: "1" - наличие признака, "0" - его отсутствие.

Таблица 1

№ п/п	Характеристика метода	Методы измерения вертикальных распределений параметров водной среды на ходу судна							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Отсутствие ограничений на исследование больших пространственных неоднородностей	1	1	0	0	0	0	1	1
2	Отсутствие ограничений на исследование малых пространственных неоднородностей	0	0	1	0	0	0	0	1
3	Работа на полном ходу судна (16 узлов до глубины 1000 м)	1	1	1	0	0	0	0	0
4	Вертикальное погружение	1	1	1	0	0	-	-	1
5	Сохранность погружаемого устройства (гидрозонда)	1	0	1	1	1	1	1	1
6	Комплексность измерений	1	0	1	1	1	1	0	1
7	Попутные измерения	1	1	0	1	1	1	1	1

Проведенный анализ контактных методов измерения вертикальных распределений элементов водной среды на ходу судна, несомненно, будет полезен для разработчиков аппаратуры систем контроля окружающей среды, а также для специалистов по планированию экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батаев А.В., Колтаков В.Н., Нечесин Е.Г., Шаповалов Ю.И. Результаты эксплуатации буксируемого зондирующего комплекса МГИ 4204 в 34-м рейсе НИС "Академик Вернадский". - Деп. ВИНТИ № 1169-В86 Деп. - 10 с.

2. Nagasaka K. et al. On a free fall and retrieval method for a small CTD. - *The Oceanogr. Mag.*, 1985, vol. 35, № 1-2, P. 31-34.

3. Saltanov N.V. Contour Dynamic Model of Line in Fluids // В кн.: "Морское и экологическое приборостроение". Сборник трудов международного научно-технического семинара, Севастополь, МГИ НАН Украины, 1995, с. 49-50.

4. Салтанов Н.В. Гибкие нити в потоках. Киев, Наукова думка, 1974, -140 с.

5. Saure C. Verhalten der Friefallprofilsond FRS. - *Ber. Inst. Meeresk. Christian-Alberchts - Univ. Kiel*, 1984, № 135, P. 1-68.

6. Sippican corporation. XBT System. - *Undersea technology*, 1967, vol. 8, № 3, p. 27.

7. Sippican corporation. Experimental bathythermograph prob. - *Oceanol. Internat.*, 1968, vol. 4, № 6, p. 55.

8. Bissett - Berman Corporation. *Measuring the ocean catalogue. New product development.* - 1965, February.

9. Патент США № 3404565, кл. 73-170, 1968.

10. Патент Японии № 55-43960, кл. В63С-8/42 НКИ 2123-3Д, 1980.

11. Буксируемый комплекс "Галс-2". - В кн.: Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. Киев, 1981, С. 241-243.

12. Маклаков А.Ф., Снежинский В.А., Чернов Б.С. Океанографические приборы. - Л.: Гидрометеиздат, 1975, - 384 с.

13. "Batfish" series 8500 programmable towed body. - Проспект фирмы Guildline instruments, Ltd, Ontario, Canada.

14. Dessurealt J.G. "Batfish". A depth controllable towed body for collecting oceanographic data. - *Ocean engineering*, 1971, № 3, P. 99-111.

15. Лямин Э.А., Науменко М.Ф., Пакка В.Т. и др. Опыт применения буксируемой гирлянды термисторов для исследования термической структуры моря. - *Океанология*, 1965, № 3, т. 5, С. 553-557.

16. Греков Н.А. Буксируемые комплексы с распределенными датчиками температуры для исследования деятельного слоя океана: Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. - Севастополь: МГИ АН УССР, 1985, - 161 с.

17. А.С. 1191735 (СССР). Способ измерения вертикальных распределений элементов морской воды на океанологических разрезах / Н.А.Греков, А.Ф.Иванов. - Оpubл. в Б.И., 1985, № 42, С. 158.