

УДК 629.12.04

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНЕНИЯ НА МЕЛКОВОДЬЕ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОГРАФА С ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ ДАВЛЕНИЯ

© Д.Г. Грязин

Санкт-Петербургский Государственный институт точной механики и оптики (технический университет)

Поступила в редакцию 14 декабря 1998г.

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований метода измерения волнения на мелководье с помощью прибора, предназначенного для работы на глубоких акваториях. Предложенный метод расширяет область использования волномерных буёв с гидростатическим датчиком давления.

ВВЕДЕНИЕ

Метод измерения волнения с помощью буёв с датчиком гидростатического давления получил широкое распространение в практике проведения волновых измерений. На его основе разрабатывались буи, как выпускавшиеся серийно, например ГМ-16, так и созданные применительно к решению специализированных задач [1,2,3]. Эти волномерные буи (ВБ) имеют достаточно простую конструкцию и хорошо зарекомендовали себя во время эксплуатации.

Метод измерения параметров волнения, используемый при проведении работ с ВБ указанного класса, достаточно изучен, что позволяет производить оценку методических и инструментальных погрешностей результатов измерения. Однако одной из особенностей ВБ с датчиком гидростатического давления остаётся ограниченность его

применения на акваториях с малыми глубинами.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В рамках линейной теории гравитационных прогрессивных волн на глубокой воде [4] давление p , измеренное датчиком на глубине z , определяется выражением:

$$P = \rho g z + \rho g r e^{-kz} \cos \omega t,$$

где ρ — плотность воды, g — ускорение силы тяжести, r — амплитуда поверхностной волны, z — глубина погружения датчика, λ — длина волны, ω — угловая частота,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ — волновое число.}$$

Первый член правой части уравнения пред-

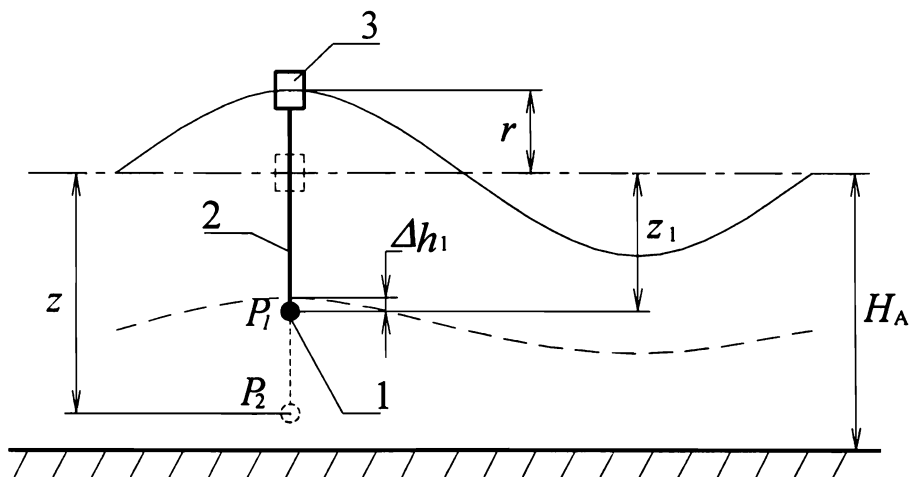


Рис. 1. Влияние гидродинамического давления на датчик, опущенный на коротком тросе.

ставляет собой гидростатическое давление на глубине z , а второй — гидродинамическое волновое давление, амплитуда которого убывает с глубиной по закону $\gamma_m = e^{-kz}$. В том случае, если глубина погружения датчика давления z велика по сравнению с длиной волны ($z > \lambda$), то амплитуда составляющей гидродинамического волнового давления $\delta_p = \rho g \gamma_m$ мала. На основании этого выражения можно сделать вывод о том, что при $z > \lambda/2$ погрешность измерения не превысит 4% [5].

В рассматриваемых устройствах датчик давления 1 (рис. 1) закреплён на нижнем конце кабельтроса 2, связывающего его с поверхностным поплавком 3. Таким образом, определение высот поверхностных волн этими волнографами основано на изменении гидростатического давления, вызванного только перемещением датчика вслед за поплавком, отслеживающим колебания поверхности волны. Амплитуда изменения гидростатического давления P_z на глубине z равна (рис. 1) $P_z = P_2 - P_1$. Размах изменения гидростатического давления связан с высотой измеряемой волны соотношением:

$$2P_z = \rho g h_n, \quad (1)$$

где h_n — высота волны, зарегистрированная прибором.

Выражение (1) определяет хорошо известный метод измерения волнения с помощью волномерного буйа с гидростатическим датчиком давления.

В общем случае $h_n \neq 2r$. При δ_p стремящемся к 0, h_n стремится к $2r$.

В том случае, если датчик закрепить на коротком тросе и поместить его на небольшую глубину, то на результат будет накладываться величина δ_p . Зависимость, связывающая измеренную амплитуду волны с истинной, примет вид:

$$r = \frac{h_n - \Delta h_1}{2},$$

где Δh_1 — размах волнового движения на глубине z .

Размах изменения давления, фиксируемый датчиком, будет связан с ординатами поверхностной волны соотношением:

$$2P_z = \rho g h_n = 2\rho g r - 2\rho g \gamma_m r = 2r\rho g(1 - \gamma_m), \quad (2)$$

где для мелководной акватории

$$\gamma_m = \frac{chK(H_\alpha - z)}{chKH_\alpha}, \quad (3)$$

где H_α — глубина акватории.

Как видно, при заглублениях датчика давления приходится принимать во внимание влияние гидродинамической составляющей волнового давления. При $z < \frac{\lambda}{2}$ высота поверхностных волн, по результатам измерения давлений, определится соотношением, вытекающим из (2)

$$2r = \frac{2P_z}{\rho g(1 - \gamma_m)} = \frac{h_n}{1 - \gamma_m}. \quad (4)$$

Выражение (4) определяет метод измерения нерегулярного волнения на акватории с ограниченной глубиной с помощью ВБ с датчиком давления на коротком тросе.

Измерение давления p_z на глубине z можно рассматривать как выходной процесс по отношению к процессу измерения ординат волны, и, следовательно, спектральные плотности входного и выходного процессов могут быть связаны, в соответствии с теоремой А.Н. Хинчина, через передаточную функцию $\phi_p(\omega)$:

$$S_p(\omega) = |\phi_p(\omega)|^2 S(\omega), \quad (5)$$

где $S_p(\omega)$ — частотный спектр измеряемых давлений, $S(\omega)$ — частотный спектр ординат давления.

Передаточная функция $\phi_p(\omega)$ изменения давления на глубине z с учётом (2) имеет вид:

$$\phi_p(\omega) = \frac{2P_z}{2r} = \rho g [1 - \gamma_m(\omega)], \quad (6)$$

где $\gamma_m(\omega)$ — передаточная функция изменения давления в зависимости от z и λ .

Спектральная плотность ординат волнения может быть получена из выражения, которое, на основании (5) и (6), при условии, что $\rho g = \gamma$, запишется:

Таблица. Результаты экспериментальных исследований.

№ Режима	1	2	3	4	5	6
Длина волны λ (м)	6,2	7,4	8,2	9	9,7	9,9
Высота волны по струнному волнографу (мм)	207	182	238	207	213	190
Высота волны, измеренная ВБ (мм)	194	162	208	182	182	155
Значение γ_m при $z = 3$ м	0,048	0,078	0,1	0,123	0,143	0,149
Высота волны, рассчитанная по формуле (4)	203	175	231	207	212	182

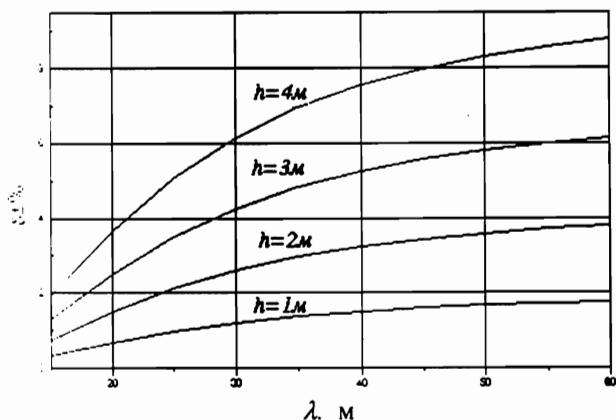


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности от длины волны при глубине акватории $H_a = 13$ м и длине кабель-троса 10 м.

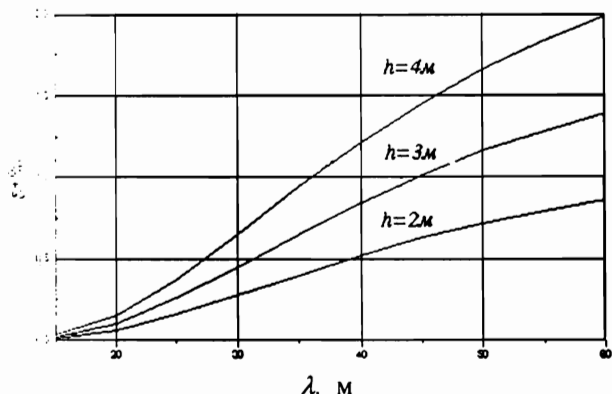


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности от длины волны при глубине акватории $H_a = 23$ м и длине кабель-троса 20 м.

$$S_{\xi}(\omega) = \frac{S_p(\omega)}{\gamma^2 [1 - \gamma_m(\omega)]^2}$$

После определения спектральной плотности возмущения возможно и вычисление его статистических характеристик.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предложенный метод был опробован в опытном бассейне лаборатории мореходности ЦНИИ им А.Н.Крылова. Для эксперимента использовался макет ВБ с известной амплитудно-частотной характеристикой вертикальной качки. Диаметр его корпуса составил 440 мм. Высота 500 мм, масса буя — 22 кг. Для измерения давления был использован датчик ИКД6 ТДа 0.4 с диапазоном 0,4 кгс/см², который был установлен в герметичную гондолу, заглублённую на 3 м. Глубина опытового бассейна, в котором проводился эксперимент, 4 м, а ширина 20 м.

Во время проведения эксперимента на каждом режиме измерения задавались период и высота гармонической волны. Задаваемые длины волн были взяты за пределами нелинейной области амплитудно-частотной характеристики вертикальной качки буя. Результаты эксперимента приведены в таблице. Сравнение значений высот волн, измеренных струнным волнографом, со значениями, откорректированными по результатам измерений ВБ, показывают удовлетворительную их сходимость. Расхождение полученных во время эксперимента значений высот волн, измеренных двумя приборами, можно объяснить погрешностью струнного волнографа, которая составляет 5%, а также предложенного метода измерений.

ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Необходимо отметить, что разработанный метод учитывает только значение γ_m соответствующее длине кабель-троса буя. Измерение γ_m при переходе датчика на другой горизонт во время подъема или спуска буя со склона волны в выражении (4) не учитывается. Таким образом, в измерениях будет присутствовать дополнительная методическая погрешность.

Для определения указанной погрешности обозначим значение γ_m на горизонте Z_1 (рис. 1) через γ_{m1} . Очевидно, что разность $\Delta = \gamma_m - \gamma_{m1}$ будет вызывать при расчёте по формуле (4) погрешность в измерении высоты волны. Анализ выражения (3) показывает, что величина Δ при подъеме буя относительно уровня тихой воды и при его спуске будет различной, причём при подъеме буя значение Δ будет больше. В связи с этим именно это значение следует брать при определении величины половины погрешности. Перейдём к анализу измерения амплитуд волн. В этом случае выражение (4) переписывается:

$$r = \frac{A_n}{1 - \gamma_m},$$

где A_n — амплитуда волны, измеряется прибором.

Изменение знаменателя дроби вызовет соответствующее изменение расчётной амплитуды волны на величину погрешности. Обозначим $B = 1 - \gamma_m$; $B_1 = 1 - \gamma_{m1}$, тогда выражение для относительной погрешности измерений будет иметь вид:

$$\delta_{\gamma_m} = \frac{B - B_1}{B} 100\%$$

или

$$\delta_{\gamma_m} = \frac{\gamma_{m1} - \gamma_m}{1 - \gamma_m} 100\%. \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе формулы (7) были произведены расчёты указанной методической погрешности. Их результаты представлены на рис. 2 и 3. Как видно

из рисунков, при измерении волн умеренной высоты, при условии, что длина кабель-троса близка к глубине акватории, методическая погрешность измерения имеет незначительную величину. Очевидно, что при использовании предложенного метода длина кабель-троса должна быть максимально приближена к глубине акватории. Степень приближения определяется исходя из того, чтобы датчик не оказался на грунте при прохождении бум подошвы волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Котт Ю.П.* // Океанология. 1972. Т.12, Вып.6. С.1117–1119.
2. *Заславский М.М., Серых В.Я.* // Океанология. 1988. Т.28, Вып.2. С.340–344.
3. *Грязин Д.Г.* // Судостроительная промышленность. Сер. Проектирование судов. 1991. Вып.18. С.57–62.
4. *Кочин М.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. Часть I. 1948. М. ОГИЗ. С.57–62.
5. *Киреев И.В., Свешников А.В., Сипович Б.В.* // Труды ГОИН. 1985. Вып. 163. С.95–107.

WAVE MEASUREMENT ON SHALLOW WATER USING THE WAVE RECORDER WITH A HYDROSTATIC PRESSURE SENSOR

D.G. Gryazin

Saint-Petersburg State Institute of Fine Mechanics and Optics (Technical University), St. Petersburg

We present the results of theoretical and experimental studies of the method of wave measurement in shallow areas of water with a device intended for working in deep areas of water. The method offered extends the range of usage of waverider buoys with a hydrostatic pressure sensor.