

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 531.787:627.338

© Д. Г. Грязин

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОНСТРУКЦИИ ВОЛНОМЕРНОГО БУЯ С ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ ДАВЛЕНИЯ

Предложены результаты теоретических исследований влияния различных возмущающих факторов на пространственное движение волномерного буйа с гидростатическим датчиком давления. Разработана методика расчёта массо-габаритных характеристик указанного прибора, который апробирован при проектировании двух волнографов. Материал может быть полезен специалистам, занимающимся разработкой и эксплуатацией средств измерения морского волнения.

### ВВЕДЕНИЕ

Измерение морского волнения с целью определения его спектральных и статистических характеристик является традиционной задачей для отраслей техники, связанных с морем. Указанные характеристики необходимы при проектировании гидротехнических сооружений, испытаниях судов, эксплуатации морских буровых платформ. Кроме того, измерения параметров волнения производятся и при проведении исследовательских работ на акваториях морей и океанов. Одним из наиболее распространённых приборов, используемых для этих целей, является волномерный буй (ВБ) с гидростатическим датчиком давления. Это обстоятельство обусловлено тем, что этот прибор является простым и надёжным средством измерения. Он состоит из буйковой части, кабель-троса и массивной гондолы с датчиком давления, опущенной на глубину более половины длины измеряемой волны. Несмотря на то, что метод измерения, используемый в этом приборе, хорошо известен [1], методике расчёта его конструкции уделялось до сих пор мало внимания.

Проектирование конструкции этого волномерного буйа условно можно разделить на следующие этапы:

1. Выбор длины кабель-троса.
2. Определение массы гондолы с датчиком давления.
3. Расчёт габаритов буйка.
4. Расчёт погрешности измерений.
5. Корректировка расчёта конструкции в зависимости от полученного значения погрешности измерения.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ КАБЕЛЬ-ТРОСА

Выбор глубины погружения датчика определяется, исходя из диапазона периодов измеряемых волн, а также допустимой погрешности измерения. При этом могут быть использованы выражения, приведённые в [2]. Заметим, что система буй-

кабель-трос-груз представляет собой задемпфированный математический маятник, т.к. кабель-трос можно считать нерастяжимым, а размеры груза пренебрежимо малыми по сравнению с длиной троса. Определение степени демпфирования такого маятника представляется затруднительным, поэтому для ориентировочных расчётов примем период колебаний указанной системы  $T_M = 2\pi\sqrt{L/g}$ , где  $L$  — длина троса.

Длина кабель-троса должна выбираться таким образом, чтобы  $T_M$  находился вне зоны периодов измеряемых волн. В противном случае прибор может попасть в зону резонанса, что отразится на его метрологических характеристиках.

Расчёт массы гондолы с датчиком давления (груза) следует производить, исходя из скорости дрейфа буйа, в результате которого происходит отклонение троса от вертикали, вследствие чего датчик поднимется на меньшую высоту.

### РАСЧЁТ СКОРОСТИ ДРЕЙФА БУЯ

Следует отметить, что дрейф буйа обуславливается воздействием волн, ветра и течения. Будем полагать, что в условиях открытого моря скорость дрейфа от течения мала по сравнению с дрейфом от воздействия двух других факторов. Из теории поверхностных волн известно [3], что частицы воды в волне совершают вместе с орбитальным ещё и поступательное движение, которое приводит к поверхностному течению. Скорость этого течения зависит от периодов и высот волн, а результаты её расчёта приводятся в [3].

Скорость дрейфа буйа, обусловленную ветровой нагрузкой, оценим, исходя из следующих предположений. Давление ветра  $P_B$  на надводную часть корпуса буйа равно

$$P_B = S_H P_{уд}, \quad (1)$$

где  $S_H$  — площадь надводной части, нормальная к направлению потока;  $P_{уд}$  — удельное давление ветра.

Исходя из принципа равновесия сил, действующих на систему (принципа Даламбера), будем считать, что давление  $P_B$  уравновешено давлением  $P_C$  от силы сопротивления движению. Выражение для давления, обусловленного сопротивлением движению подводной части буя и подвесных элементов, имеет вид:

$$P_C = 0,5 \rho V_{ДВ}^2 (C_{НС} S_n + C_{Н2} A_T + C_{Н1} L d_T), \quad (2)$$

где  $A_T$  — площадь сечения гондолы в вертикальной плоскости,  $d_T$  — диаметр троса,  $C_{НС}$ ,  $C_{Н1}$ ,  $C_{Н2}$  — гидродинамические коэффициенты сопротивления, соответственно, подводной части буя, троса и гондолы;  $S_n$  — площадь подводной части буя, нормальная к направлению потока;  $V_{ДВ}$  — скорость движения буя от ветровой нагрузки.

Приравняв правые части выражений (1) и (2), получим

$$V_{ДВ} = \sqrt{\frac{S_H P_{УД}}{0,5 \rho (C_{НС} S_n + C_{Н2} A_T + C_{Н1} L d_T)}},$$

где  $C_{Н1} = 1,2$ ;  $C_{Н2} = 0,7$  [4].

Для определения удельного давления воспользуемся выражением  $P_{УД} = C_A Q_x$ , предложенным в [5], где  $C_A$  — аэродинамический коэффициент лобового сопротивления ветру,  $Q_x$  — скоростной напор ветра на высоте  $X$ .

Вычисление скоростного напора на основании закона кинетической энергии производится по формуле  $Q_x = Q_0 K(X)$ , где функция

$$K(X) = (V(X)/V_{10})^2, \quad (3)$$

$V(X)$  — скорость ветра на горизонте  $X$ ,  $Q_0 = 0,5 \rho_B V_{10}^2$ ,  $\rho_B = 1,225 \text{ кг/м}^3$  — плотность воз-

духа.

Преобразовав выражение (3), получим для скорости на рассчитываемом горизонте  $X$ :  $V(X) = V_{10} \sqrt{K(X)}$ . Коэффициент изменения скоростного напора с высотой может быть определён из выражения

$$K(X) = [1 + 2,5 \sqrt{C_{10}} \ln(X/10)]^2. \quad (4)$$

Значение коэффициента  $C_{10}$  в формуле (4) определяется эмпирической зависимостью [6]:  $C_{10} = (0,71 + 0,071 V_{10}) \cdot 10^{-3}$ . Отметим, что использование логарифмической зависимости изменения скорости ветра с высотой при расчёте  $V(X)$  на малых высотах (менее 5 м) правомерно лишь для значительных скоростей ветра.

На основе предложенной методики произведём расчёт скорости дрейфа буёв двух типов. Первый — диаметром 0,34 м, массой 27 кг, с площадью подводной части 0,1 м<sup>2</sup> и площадью надводной части 0,092 м<sup>2</sup>. Второй — диаметром 0,44 м, массой 22 кг, с площадью подводной части 0,066 м<sup>2</sup> и площадью надводной части 0,092 м<sup>2</sup>. Расчёт гидродинамических коэффициентов  $C_{НС}$  и  $C_A$  для цилиндрических тел, произведённый по методике, предложенной в [6], показывает, что значения коэффициентов в диапазоне скоростей ветра 10–20 м/с для буёв диаметром 0,3–0,5 м и массой 20–40 кг остаются постоянными (либо докризисный, либо транскритический режимы) и составляют  $C_{НС} = 0,55$ ,  $C_A = 0,96$ . Таким образом, зависимость изменения удельного давления ветра  $P_{УД}$  от его скорости на высоте 10 м для буёв с указанными характеристиками в заданном диапазоне скоростей также может считаться линейной. График зависимости  $P_{УД} = f(V_{10})$  представлен на рис. 1, на том же

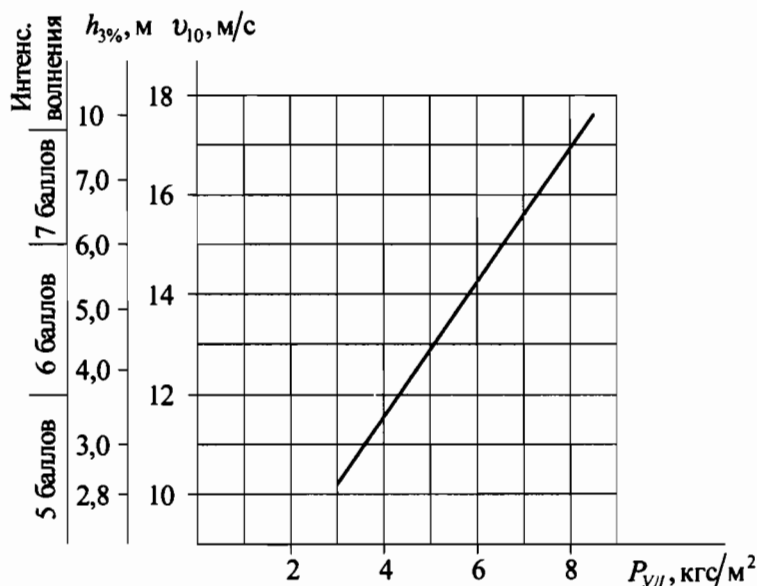


Рис. 1. Зависимость удельного давления на корпус буя от скорости ветра для буёв  $\varnothing$  0,3–0,5 м и массой 20–40 кг

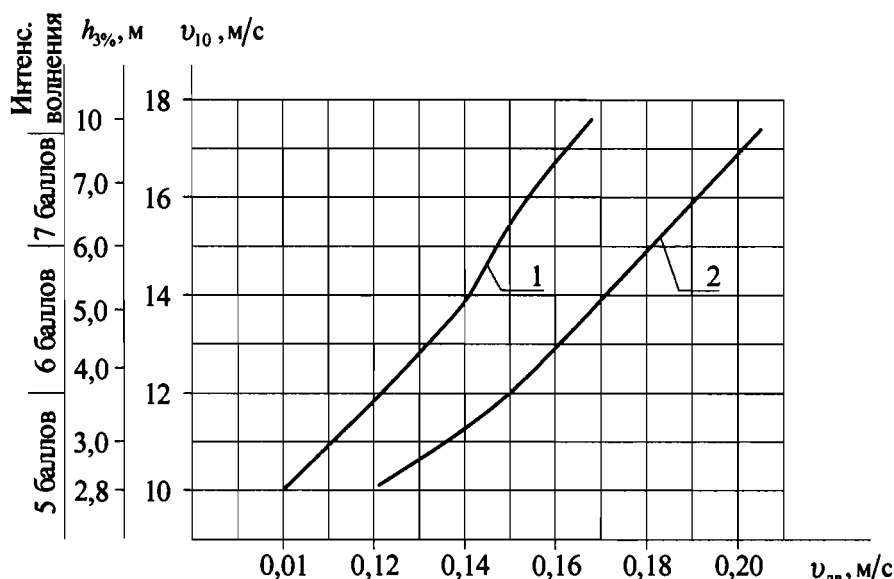


Рис. 2. Зависимость скорости ветрового дрейфа буйев двух типов от скорости ветра. 1 — кривая для буйа I-го типа; 2 — кривая для буйа II-го типа

рисунке по оси ординат отложена соответствующая  $V_{10}$  интенсивность волнения, взятая из соотношений по Пирсону–Московитцу [7]. На рис. 2 представлена зависимость  $V_{дв} = f(V_{10})$ , рассчитанная для буйев обоих типов. Очевидно, что при расчёте отклонения кабель-троса буйа от вертикального положения необходимо использовать максимальное значение скорости дрейфа  $V$ , которое определится как  $V = V_{дв} + V_{дл}$ .

При расчёте скорости дрейфа буйа от воздействия волн  $V_{дл}$  следует задаться значением высоты волны  $h$ , затем определить средний период волн из зависимости, предложенной в [8], затем оценить относительную длину волны и определить  $V_{дл}$  из [3]. Расчёты показывают, что для буйа первого типа  $V = 0,324$  м/с, а для буйа второго типа  $V = 0,32$  м/с.

### РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛУБИНЫ УСТАНОВКИ ДАТЧИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ДРЕЙФА

Для выполнения этого расчёта необходимо оценить форму катенарной кривой, по которой располагается кабель-трос под действием этих сил. Заметим, что скорость волнового течения затухает с глубиной  $Z$  подобно скорости орбитального движения частиц воды в волне. Уменьшение скорости волнового течения происходит по закону [3]  $\gamma_B = e^{-KZ}$ , где  $K = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны. Таким образом, при расчёте углов отклонения кабель-троса от вертикали следует учитывать относительную составляющую скорости движения, которая определится как  $V_{дл.отн} = V_{дл} - V_{дл\gamma_B}$ . Результаты расчёта, выполненного в соответствии с методикой, изложенной в [9], показывают, что при скорости дрейфа на волнении шесть баллов для буйа первого типа, имеющего кабель-трос диаметром 4 мм и груз массой 14 кг, датчик поднимется на 0,14 м. В том случае, если кабель-трос имеет диаметр 8 мм, подъём составит 0,48 м (рис. 3). Сравнение ре-

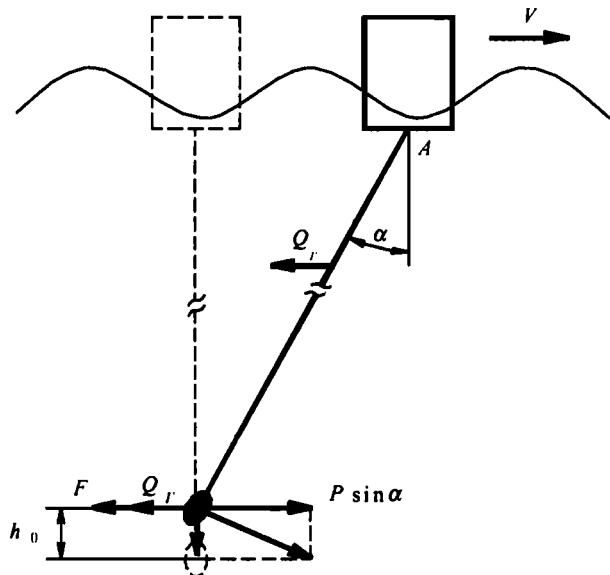


Рис. 3. Отклонение кабель-троса с грузом при дрейфе буйковой части ББ

зультатов с экспериментальными данными показывает хорошее соответствие расчёта  $h_0$  между расчётным и экспериментально полученным значением  $h_0$ . Так, при записи волнения интенсивностью шесть баллов с помощью волномерного буя «Дельфин», имеющего кабель-трос диаметром 8 мм, средняя линия волнограммы сместилась на 0,5 м [10].

### РАСЧЁТ МАССЫ ГОНДОЛЫ

Определим выражение для ориентировочного расчёта массы гондолы. Для этого будем считать кабель-трос отклонённым по прямой линии (рис.3), а не по катенарной кривой. Угол отклонения троса от вертикали  $\alpha$  определится из равенства моментов сил гидродинамического сопротивления и проекции силы тяжести груза на горизонтальную ось  $P \sin \alpha = F$ , где  $P$  — неуравновешенная часть веса гондолы и троса. Сила гидродинамического сопротивления  $F$  будет состоять из сопротивления троса  $Q_T$  и сопротивления гондолы  $Q_G$ , выражения для которых приведены в [9] и имеют вид:

$$Q_G = 0,5\rho C_{H2} A_G V^2, \quad Q_T = 0,5\rho C_{H1} d V^2 L,$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $C_{H1}$  и  $C_{H2}$  — коэффициенты нормального сопротивления для троса и гондолы, обтекаемых водой перпендикулярно образующим,  $L$  — длина троса.

Для троса, находящегося под углом  $\alpha$  к набегающему потоку, можно записать  $C_{H1} = C'_{H1} \cdot \cos^2 \alpha$ , где  $C'_{H1}$  — гидродинамический коэффициент сопротивления троса, находящегося под углом к набегающему потоку. Учитывая малые скорости дрейфа  $V$ , при которых угол  $\alpha$  будет близок к нулю, примем  $\cos^2 \alpha = 1$ . Составим уравнение моментов сил, действующих в точке  $A$  (рис. 3).

$$LP \sin \alpha = 0,5\rho L V^2 \left( \frac{C_{H1} d_T L}{X_Y} + C_{H2} A_G \right), \quad (5)$$

где  $X_Y$  — плечо, на котором приложена результирующая силы сопротивления троса.

Расчёт значений угла  $\alpha$  для тросов диаметром 4 и 8 мм произведем на основе результатов расчёта  $h_0$  (рис. 3) для катенарной линии, выполненного в [9]. Тогда  $\alpha_4 = 4,79$ ,  $\alpha_8 = 8,88$ . Выразив  $X_Y$  из выражения (5) и выполнив расчёт при указанных значениях  $\alpha$ , получим  $X_{Y4} = 0,88$ ;  $X_{Y8} = 0,95$ . Таким образом, для тросов в заданном диапазоне диаметров можно принять  $X_Y = 0,91$ . Выражение (5) преобразуется к виду

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{\rho V^2}{2P} \left( \frac{C_{H1} d_T L}{0,91} + C_{H2} A_G \right) \right]. \quad (6)$$

Заметим, что величина вертикального отклонения груза  $h_0$ , как видно из рис. 3, может быть также определена из выражения  $h_0 = L(1 - \cos \alpha)$ , откуда

$$\alpha = \arccos(1 - h_0/L). \quad (7)$$

Приравнявая правые части формул (6) и (7), получим

$$\begin{aligned} \arcsin \left[ \frac{\rho V^2}{2P} \left( \frac{C_{H1} d_T L}{0,91} + C_{H2} A_G \right) \right] &= \\ &= \arccos \left( 1 - \frac{h_0}{L} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначим:

$$\beta = 1 - \frac{h_0}{L}, \quad A_0 = \frac{\rho V^2}{2} \left( \frac{C_{H1} d_T L}{0,91} + C_{H2} A_G \right), \quad \alpha_0 = \frac{A_0}{P}.$$

Тогда  $\arcsin \alpha_0 = (\pi/2) - \arcsin \beta$  и, следовательно, выражение (8) преобразуется к виду

$$\arcsin(\alpha_0 \sqrt{1 - \beta^2} + \beta \sqrt{1 - \alpha_0^2}) = \pi/2.$$

Домножив обе части уравнения на  $P$ , получим:

$$P^2(1 - \beta^2) - 2A_0 P \sqrt{1 - \beta^2} + A_0^2 = 0.$$

После преобразования имеем:

$$P^2 - \frac{2A_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} P + \frac{A_0^2}{1 - \beta^2} = 0. \quad (9)$$

Обозначим  $b_k = \frac{2A_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ ,  $c_k = \frac{A_0^2}{1 - \beta^2}$ .

Поскольку  $b_k$  и  $c_k$  — коэффициенты приведённого квадратного уравнения (9) вида

$P^2 - b_k P + c_k = 0$ , то число его действительных решений зависит от дискриминанта  $D_C$ :

$$D_C = b_k^2/4 - c_k. \quad (10)$$

В случае, если  $D_C = 0$ , то имеется одно решение уравнения, что подтверждается подстановкой  $c_k$  и  $b_k$  в выражение (10). Таким образом, решение уравнения (9) имеет вид

$$P = b_k/2. \quad (11)$$

Подставляя в формулу (11) выражение для  $b_k$  и  $c_k$ , получим формулу для веса гондолы вместе с тросом

$$P = \frac{L\rho V^2 (C_{H1} d_T L + 0,91 C_{H2} A_G)}{1,82 \sqrt{2Lh_0 - h_0^2}}.$$

После определения  $P$  необходимо произвести расчёт массы гондолы по формуле

$$m_f = \frac{P}{g} - m_T + \rho(Ld_s + B_f),$$

где  $B_f$  — объём гондолы,  $d_s$  — площадь поперечного сечения троса,  $m_T$  — масса троса.

### ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП РАСЧЁТА

После выбора марки кабель-троса и определения массы гондолы переходят к расчёту линейных размеров буйковой части ВБ, которая зависит от массы прибора. Масса буя состоит из массы всех его составляющих элементов. Для точного определения  $h_0$ , обусловленного дрейфом буя, производят расчёт катенарной кривой в соответствии с методикой, изложенной в [9]. Исходя из требований к частотной характеристике буя производят расчёт АЧХ его вертикальной качки на основе выржений, приведённых в [11].

После расчёта диаметра и массы ВБ необходимо произвести теоретическую оценку погрешности измерений, методика которой предложена в [2]. По результатам проведённых расчётов и их сопоставлению с техническим заданием производят корректировку массы или габаритов буйкового волнографа и повторяют расчёт.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Необходимо отметить, что указанная методика расчёта характеристик ВБ может быть использована для буйковых волнографов любого типа путём внесения изменений в расчёт, связанных с отличием формы корпуса проектируемого прибора от цилиндрической или отсутствием кабель-троса.

При проектировании ВБ следует обратить внимание на оптимальный выбор диаметра кабель-троса и массы гондолы, которые впрямую связаны с частотой собственных вертикальных колебаний прибора. Так, для смещения зоны резонанса в область верхних частот необходимо выбирать трос возможно большего диаметра, а для уменьшения угла его отклонения от вертикали во время дрейфа диаметр троса необходимо уменьшать или увеличивать массу груза. Это, в свою очередь, приведёт к смещению резонансной зоны АЧХ вертикальной

качки в область более низких частот. Указанное противоречие делает затруднительной разработку универсального прибора, имеющего высокие метрологические характеристики как при измерении интенсивного волнения, так и при измерении малых высот волн.

Предложенный метод был применён при проектировании двух волнографов, предназначенных для использования при проведении натуральных мореходных испытаний судов — волномерного буя «Дельфин» [2, 10] и волномерного буя «Нептун».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глуховский Б.Х. Исследование морского ветрового волнения. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. 284 с.
2. Грязин Д.Г. // Известия Вузов. Приборостроение. 1993. № 9–10. С. 45–51.
3. Луговский В.В. Динамика моря. Л.: Судостроение, 1976. 199 с.
4. Берто Г.О. Океанографические буи. Л.: Судостроение, 1979. 215 с.
5. Галенин Б.Г. и др. Ветер, волны и морские порты. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 263 с.
6. Трещевский В.Н., Волков Л.Д., Короткин А.И. Аэродинамический эксперимент в судостроении. Л.: Судостроение, 1976. 190 с.
7. Гирс И.В., Русецкий А.А., Нецветаев Ю.А. Испытания мореходных качеств судов. Справочник. Л.: Судостроение, 1977. 191 с.
8. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. 287 с.
9. Грязин Д.Г. // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 2. С. 59–63.
10. Труб М.С., Грязин Д.Г., Андреев И.Н. // Судостроительная промышленность. Сер. Проектирование судов. Тематический сборник. Вып. 18. Судостроение, 1991. С. 43–57.
11. Грязин Д.Г. // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 1. С. 82–86.

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

Материал поступил в редакцию 25.05.1999.

## CALCULATION PROCEDURE TO DESIGN A WAVERIDER BUOY WITH A HYDROSTATIC PRESSURE SENSOR

D. G. Gryazin

*Saint-Petersburg State Institute of Fine Mechanics and Optics (Technical University)*

The paper offers the results of theoretical studies to evaluate the influence of different disturbing factors on spatial motion of a waverider buoy with a hydrostatic pressure sensor. A method is designed to calculate mass-size characteristics of this instrument, which has been used when designing two wave recorders. This material may be useful to specialists involved in the development and usage of facilities for sea wave measurement.