

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 53.082.25: 627.338

© Д. Г. Грязин

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОМЕРНОГО БУЯ

Предложен подход к оптимизации гидродинамических характеристик волномерного буя по минимальной длительности переходного процесса или по максимальной полосе пропускания частот. Указанная оптимизация рассмотрена на примере расчёта вертикальной качки цилиндрического буя. Предлагаемый подход к проектированию волнографа позволяет отойти от метода последовательных приближений при определении массо-габаритных характеристик буя, влияющих на амплитудно-частотную характеристику его качки, и перейти к целенаправленному расчёту указанных характеристик с помощью оценки степени успокоения.

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Очевидно, что колебания волномерных буйёв относительно профиля измеряемой волны являются источником методической погрешности измерений параметров волнения. Для уменьшения этой составляющей погрешности производят исследования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) буя по различным видам качки и определяют такие его массо-габаритные характеристики, при которых буй в области рабочих частот имеет АЧХ качки равную единице. Обычно определение указанных массо-габаритных характеристик производят методом последовательных приближений. При этом считается, что увеличение частоты собственных колебаний буя приводит к расширению диапазона измеряемых периодов волн.

Из теории автоматического управления известно [1], что увеличение полосы пропускания системы приводит к увеличению длительности переходного процесса. Это было подтверждено при экспериментальном исследовании АЧХ вертикальной качки буйёв. На рис. 1 представлены результаты этих исследований, проводившихся с использованием буйёв диаметром 0,44 м с различными массами и соответствующими им значениями собственной частоты  $\omega_c$ . Характеристики получены при относительной крутизне волны 1/40 (отношении высоты волны к её длине). Из рисунка видно, что диапазон частот  $\Delta = \omega_c - \omega_l$ , где  $\omega_l$  — верхняя граничная частота, при которой  $h_B/h_B \neq 1$ , увеличивается с увеличением  $\omega_c$ , здесь  $h_B$  и  $h_B$  амплитуда перемещений буя и амплитуда волны, соответственно. Расширение диапазона

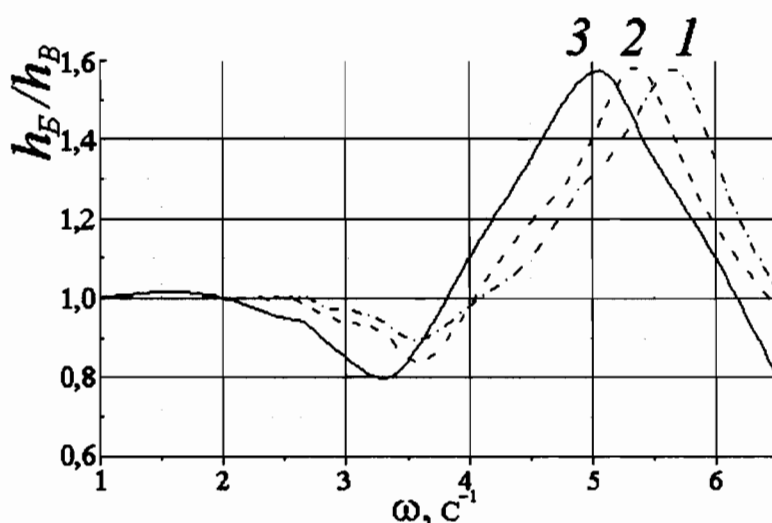


Рис. 1. Сравнение экспериментально полученных АЧХ вертикальной качки буйёв с различными массо-габаритными характеристиками: 1 —  $m = 22$  кг,  $\omega_c = 5,71$  с<sup>-1</sup>; 2 —  $m = 28$  кг,  $\omega_c = 5,42$  с<sup>-1</sup>; 3 —  $m = 36$  кг,  $\omega_c = 5,07$  с<sup>-1</sup>

АЧХ, при котором  $h_B/h_B \neq 1$  может быть достигнуто применением комплексных мер, направленных не только на выбор необходимых массогабаритных характеристик буёв, но и на применение дополнительных конструктивных элементов, демпфирующих колебания в области резонансных частот. Очевидно, что для реализации указанных мер необходимо определить оптимальные значения силы демпфирования колебаний.

Следует отметить, что при проектировании волномерных буёв, как правило, не учитываются особенности акватории, на которой будет работать прибор. Очевидно, что при работе в мелководной зоне буй будет больше подвержен влиянию ударных нагрузок от разрушающихся волн, по сравнению с работой в открытом море.

Таким образом, при проектировании волнографов целесообразно оптимизировать их гидродинамические характеристики, что позволит либо расширить полосу пропускания частот  $\Delta$ , либо уменьшить переходный процесс при возмущении.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Необходимо отметить, что относительно качки волномерный буй является колебательным звеном, а его качка может быть описана с помощью линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка.

Известно [1], что при синтезе динамических характеристик измерительных систем, возможна их оптимизация по минимуму длительности переходного процесса или по максимуму полосы пропускания частот. При этом задаются значением динамической погрешности  $\delta$ , за которое нелинейность АЧХ не должна выходить в рабочем диапазоне частот.

Из теории поверхностных волн известно, что развитое стационарное морское волнение при подходе к берегу существенно трансформируется.

Волны становятся более крутыми, а их гребни

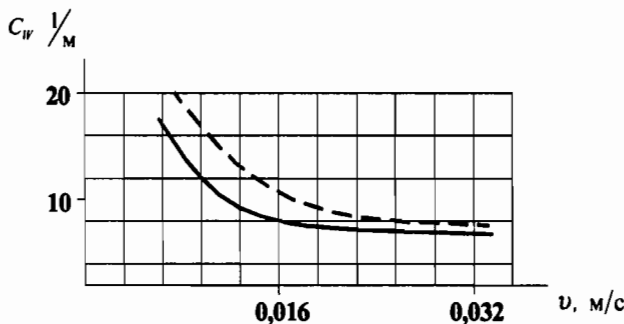


Рис. 2. Экспериментальная зависимость квадратичного коэффициента сопротивления от скорости колебаний буя  $\varnothing$  0,3 м. Характеристики получены при массе буя: — 21 кг; - - - - - 17 кг

обрушиваются. Воздействие таких волн на прибор приводит к возмущению буя на резонансных частотах по различным видам качки. В связи с этим представляется целесообразным при проектировании волнографа для измерений стационарного волнения оптимизировать его гидродинамические характеристики по максимуму полосы пропускания частот. При проектировании волномерного буя для измерения волнения в прибрежной зоне гидродинамические характеристики следует оптимизировать по минимуму длительности переходного процесса.

Рассмотрим оптимизацию гидродинамических характеристик на примере вертикальной качки цилиндрического буя. Уравнение качки этого вида в абсолютной системе координат имеет вид:

$$(m + \lambda)\ddot{\zeta} + W\dot{\zeta} + \rho g S \zeta = \rho g S r e^{-Kt} \cos \omega t,$$

здесь:  $m$  — масса буя,  $\lambda$  — присоединённая масса воды,  $W$  — коэффициент сопротивления,  $\rho$  — плотность воды,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $r$  — амплитуда волны,  $K = 2\pi/L$  — волновое число,  $L$  — длина волны,  $T$  — осадка буя,  $\zeta$  — мгновенное значение ординат вертикальных перемещений буя,  $\omega$  — круговая частота,  $S$  — площадь ватерлинии буя.

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$(m + \lambda)P^2 + WP + \rho g S = 0, \text{ или } P^2 + 2aP + \omega_c^2 = 0,$$

где:  $a = \frac{W}{2(m + \lambda)}$ ;  $\omega_c = \sqrt{\frac{\rho g S}{m + \lambda}}$  — круговая частота собственных колебаний.

Введём безразмерный коэффициент, называемый степенью успокоения

$$\xi = \frac{a}{\omega_c} = \frac{W}{2\sqrt{(m + \lambda)\rho g S}}. \tag{1}$$

Здесь  $W = 0,85 \omega_c r K_W$ ,  $K_W$  — квадратичный коэффициент сопротивления в размерности (кг/м), сомножитель  $\omega_c r = V$  — вертикальная скорость буя при его подъёме на волну или спуске с неё. Выражение для  $K_W$  имеет вид

$$K_W = C_W(m + \lambda),$$

где  $C_W$  — квадратичный коэффициент сопротивления в размерности (1/м).

Значения  $C_W$  определяются экспериментально из записей свободных колебаний буёв. Зависимость  $C_W$  от средней скорости колебаний для буя диаметром 0,3 м при различной его массе представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что указанная зависимость имеет существенно нелинейный характер.

Таким образом, выполнив расчёт степени успокоения реального буя, возможно с помощью изменения массогабаритных характеристик добиться

такого значения  $W$ , при котором значение  $\xi$  будет соответствовать оптимальному. Оптимальные значения степени успокоения при заданных значениях  $\delta$  приведены в [1].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе предложенных выражений был произведён расчёт степени успокоения вертикальной качки буя диаметром 0,3 м и массой 17 кг. Значения  $\lambda = 4$  кг,  $\omega = 5,7$  с<sup>-1</sup> были получены при экспериментальных исследованиях качки этого буя. Расчёты производились при скорости  $V = 0,032$  м/с, т.к. предполагалось, что наибольшие относительные колебания лежат в области значительных скоростей. Значение  $C_{\text{и}}$  составило 7,5, а  $W = 26,77$ , при этом  $\xi = 0,11$ . На основании результатов исследований, приведённых в [1] для оптимизации прибора по максимальной полосе пропускания при  $\delta = 0,1$ , необходимо обеспечить  $\xi = 0,54$ , а при оптимизации по минимальной длительности переходного процесса —  $\xi = 0,59$ . Указанные значения степени успокоения можно добиться не только изменением массо-габаритных характеристик буя, но и применением специальных демпфирующих элементов. Например, путём

установки на буй пружинного демпфера [2], конструкцию которого следует рассчитывать на скорость 0,032 м/с.

Аналогичным образом могут быть произведены расчёты для бортовых и килевых относительных колебаний буя. При этом используются лишь иные дифференциальные уравнения.

Предложенный подход к проектированию позволяет избежать многократного выполнения экспериментальных исследований АЧХ качки буёв и определения их необходимых характеристик методом последовательных приближений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Браславский Д.А.* Приборы и датчики летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 392 с.
2. *Грязин Д.Г., Ткалич В.Л.* // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 2. С. 88.

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

Материал поступил в редакцию 25.05.1999.

## OPTIMIZATION OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE WAVERIDER BUOY

D. G. Gryazin

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

The approach offered is designed to optimize hydrodynamic characteristics of the waverider buoy in terms of minimum duration of the transient process or the maximum frequency passband. The optimization is considered on the example of calculation of heaving of a cylindrical buoy. The proposed approach to designing a wave recorder allows one to abandon the method of successive approximation, to determine mass-size characteristics of the buoy influencing the amplitude-frequency characteristic of its heaving and go to the purposeful calculation of the specified characteristics by evaluating the degree of damping.