

УДК 629.12.073.249

© Д. Г. Грязин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БУЕВ НА ДЕМПФИРОВАНИЕ ИХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАЧКИ

Обсуждаются вопросы особенностей влияния дисковых демпферов и конструктивных размеров буев с малой площадью сечения по ватерлинии на их вертикальную качку. Производится сравнение их характеристик с характеристиками буя, имеющего форму прямого кругового цилиндра. На основании результатов выполненных исследований сделаны рекомендации по применению указанных конструктивных элементов при проектировании океанографических буев.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработкой морских гидрологических и океанографических буев занимаются на протяжении последних десятилетий ученые и инженеры многих государств. Интерес к их созданию вызван тем, что такие буи обычно используются в качестве носителей измерительной аппаратуры и позволяют решать многочисленные задачи, связанные с функционированием морских буровых платформ, плантаций аквакультуры, прогнозированием погоды, осуществлением морских перевозок, выполнением оперативных задач военно-морским флотом и т.д. Одной из существенных особенностей функционирования комплекса измерительных средств, размещенных на буюх, является то, что параметры их качки могут существенно влиять на точность результатов измерений. В тех случаях, когда с помощью буев производятся измерения морского волнения, наиболее значительное влияние на точность оказывает вертикальная качка буя. При решении других задач, например измерения градиентов физических полей морей и океанов, необходимо использовать буи, которые бы имели стабилизацию своего положения относительно уровня тихой воды, т.е. имели бы значительную вертикальную качку. Под вертикальной качкой буя будем понимать вертикальные колебания его корпуса относительно поверхности волны.

Для расширения диапазона работы волномерных буев в область высоких частот, т.е. диапазона, в котором АЧХ их вертикальной качки равна 1, следует увеличивать частоту собственных вертикальных колебаний буев  $\omega_c$  или задемпфировать эти колебания в области резонанса. Для увеличения  $\omega_c$  следует уменьшать массу буя и увеличивать его диаметр, однако уменьшение массы бывает затруднительным по конструктивным соображениям. К числу элементов, демпфирующих вертикальные колебания корпуса буя, следует отне-

сти дисковые и иные демпферы, устанавливаемые в нижней части буев. Уменьшить вертикальные колебания также можно путем выбора формы корпуса буя, для которой возмущающая сила была бы минимальной. Это буи с малой площадью сечения по ватерлинии (в дальнейшем — малой площадью ватерлинии). В случае применения этих элементов и надлежащего выбора формы корпуса вид АЧХ вертикальной качки будет существенно зависеть от площади демпфирующих элементов.

Исследованиям вертикальной качки буев занимались Ю.В. Корчмит [1], Ю.П. Котт [2], В.Б. Вайсбанд [3, 4] и др. ученые, выполнившие в своих работах детальный и качественный анализ качки буев различных конструкций, однако в их работах не нашел отражения вопрос влияния различных конструктивных элементов на вертикальную качку буя. Представляется целесообразным рассмотреть этот вопрос отдельно, т. к. результаты подобных исследований могут найти практическое применение при выборе конструкции корпуса волномерных и иных океанографических буев.

### АНАЛИЗ КАЧКИ ДЕМПФИРОВАННЫХ БУЕВ И БУЕВ С МАЛОЙ ПЛОЩАДЬЮ ВАТЕРЛИНИИ

Произведем расчет АЧХ вертикальных колебаний цилиндрического буя без демпфера и с демпферами различного диаметра. Установка указанных демпферов обычно производится в нижней части буя под его днищем [5].

В том случае, если мы пренебрежем дифракционными силами, уравнение вертикальной качки буя в абсолютной системе координат может быть записано в традиционной форме

$$(m + \lambda_{33})\ddot{\zeta}_g + W_B \dot{\zeta}_g + \rho g S \zeta_g = \rho g S r e^{-K_1 T} \cos \omega t. \quad (1)$$

Здесь  $W_B$  — коэффициент сопротивления движению (кг/с),  $K_1 = \omega^2/g$  — волновое число,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $T$  — осадка буя (м),  $m$  — масса буя (кг),  $\lambda_{33}$  — присоединенная масса воды при вертикальной качке (кг),  $\rho$  — плотность воды (кг/м<sup>3</sup>),  $S$  — площадь сечения по уровню ватерлинии буя (м<sup>2</sup>),  $\zeta_g$  — мгновенное значение ординат вертикальных перемещений буя (м),  $r$  — амплитуда волны (м),  $\omega$  — круговая частота.

Правую часть уравнения (1) составляет только главная часть возмущающих сил. Первый член левой части уравнения определяет инерционные силы, обусловленные массой буя и присоединенной массой воды. Второй — определяет силы сопротивления движению, состоящие из сил волнового сопротивления, сопротивления трения, характеризующегося вязкостью воды и др. Третий — восстанавливающие силы на тихой воде в рамках закона Архимеда, которые возвращают буй в прежнее положение после снятия приложенной к нему силы.

Решение уравнения (1) определяется системой

$$\begin{cases} a = \frac{CA\omega}{A^2\omega^2 + (B - \omega^2)^2} \\ b = \frac{C(B - \omega^2)}{A^2\omega^2 + (B - \omega^2)^2}, \end{cases}$$

$$\text{где } A = \frac{W_B}{m + \lambda_{33}}, \quad B = \frac{\rho g S}{m + \lambda_{33}}, \quad C = \frac{\rho g S r e^{-K_1 T}}{m + \lambda_{33}}.$$

Выражение для амплитуды вертикальной качки  $Z_0$ :

$$Z_0 = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (2)$$

Определение коэффициентов сопротивления  $W_B$  произведем на основе методики, предложенной в [6]. Значение коэффициента присоединенной массы жидкости найдем, исходя из того, что ее величина увеличивается на массу воды, находящейся между демпфером и буюм. Тогда

$$\lambda_{33\text{ДБ}} = \lambda_{33\text{Б}} + \lambda_{33\text{Д}},$$

где  $\lambda_{33\text{ДБ}}$  — присоединенная масса демпфированного буя,  $\lambda_{33\text{Б}}$  — присоединенная масса буя,  $\lambda_{33\text{Д}}$  — присоединенная масса демпфера. Для определения величины  $\lambda_{33\text{Б}}$  воспользуемся методикой, предложенной в [7]. Значение  $\lambda_{33\text{Д}}$  найдем, используя рекомендации Ю.В. Корчмита, из выражения

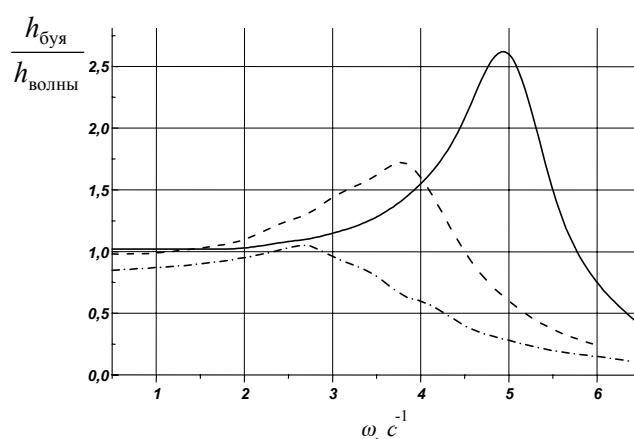
$$\lambda_{33\text{Д}} = \frac{8}{3} \rho R_{\text{Д}}^3 \left( 1 + 2.1 \sqrt{\bar{A} - 0.07} \right),$$

где  $R_{\text{Д}}$  — радиус диска демпфера, коэффициент  $\bar{A} = \frac{A_{\text{КД}}}{2R_{\text{Д}}}$ , причем  $A_{\text{КД}}$  — амплитуда колебаний буя с демпфером.

Выражение состоит из двух сомножителей, первый из которых  $\frac{8}{3} \rho R_{\text{Д}}^3$  характеризует присоединенную массу диска; сомножитель  $1 + 2.1 \sqrt{\bar{A} - 0.07}$  представляет собой поправку, учитывающую вихреобразования на кромке этого диска. Для определения этой поправки в первом приближении воспользуемся средней амплитудой волны, имеющей крутизну 1/40 в предполагаемой зоне резонанса. В этом случае  $\lambda_{33\text{Д}}$  для демпфера диаметром 0.44 м составит 34.1 кг, а для демпфера диаметром 0.34 м равна 16.8 кг.

Расчеты АЧХ вертикальной качки цилиндрического буя без демпфера и демпфированного буя произведены при диаметре буя 0.3 м и массе 21 кг, а их результаты представлены на рис. 1. Очевидно, что после установки на буй демпфирующего диска частота и амплитуда собственных колебаний буя уменьшаются.

Характеристики вертикальной качки буя с малой площадью ватерлинии, плавающего на поверхности воды, также будут существенно отличаться от характеристик классических цилиндрических буюв. Исследованием качки плавающих тел с малой площадью ватерлинии серьезно занимались применительно к задачам судостроения специалисты ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова [8], использование буюв с такой формой корпуса для задач океанологии было предложено В.Б. Вайсбандом (например, [3]). В своих работах автор ищет такую конструктивную форму буя, которая сводит к нулю величину возмущающей силы.



**Рис. 1.** Сравнение АЧХ вертикальной качки буя  $\varnothing$  0.3 м и массой 21 кг до и после установки на него демпфера различного диаметра.  
 — без демпфера;  
 - - - с демпфером  $\varnothing$  0.34 м;  
 - · - · с демпфером  $\varnothing$  0.44 м.

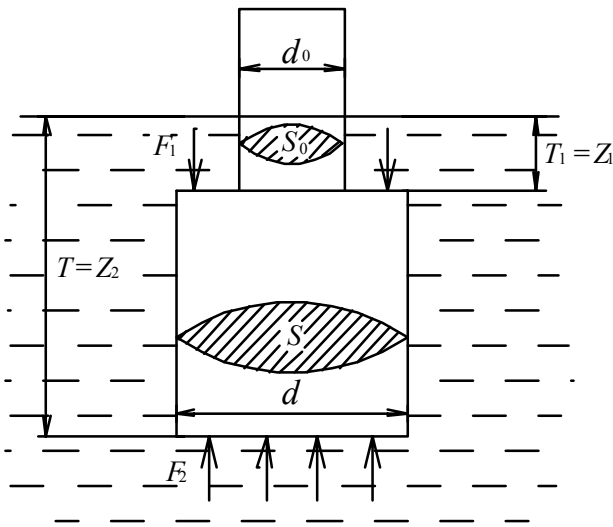


Рис. 2. Схема сил, действующих на демпфированный буй

В связи с чем предлагается форма буя, представленного на рис. 2.

Запишем дифференциальное уравнение вертикальной качки буя с малой площадью ватерлинии в абсолютной системе координат:

$$(m + \lambda_{33})\ddot{\xi}_g + W_B \dot{\xi}_g + \rho g S_0 \xi_g = \rho g S_0 r e^{-KT} \cos \omega t - \rho g r (e^{-KT_1} - e^{-KT})(S - S_0) \cos \omega t.$$

Здесь  $S$  и  $S_0$  — соответственно площади поперечного сечения большого и малого цилиндров корпуса буя,  $T$  и  $T_1$  — расстояния от уровня воды до доннышек этих цилиндров.

Структура этого уравнения аналогична структуре уравнения (1). Различие состоит в том, что правая часть содержит член, учитывающий форму буя с малой площадью ватерлинии. Решение этого уравнения аналогично предыдущему решению.

Уравнение вертикальной качки буя с малой площадью ватерлинии запишется в форме

$$Z_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2},$$

где

$$a_2 = \frac{A_2 \omega (C_2 - D_2)}{(B_2 - \omega^2)^2 + A_2^2 \omega^2}, \quad b_2 = \frac{(C_2 - D_2)(B_2 - \omega^2)}{(B_2 - \omega^2)^2 + A_2^2 \omega^2}.$$

$$\text{Здесь} \quad A_2 = \frac{W_B}{m + \lambda_{33}}, \quad B_2 = \frac{\rho g S_0}{m + \lambda_{33}},$$

$$C_2 = \frac{\rho g S_0 r e^{-KT}}{m + \lambda_{33}}, \quad D_2 = \frac{\rho g r (e^{-KT_1} - e^{-KT})(S - S_0)}{m + \lambda_{33}}.$$

На основе предложенной математической модели был произведен расчет АЧХ вертикальной качки буя с малой площадью ватерлинии. Значения  $W_B$  и  $\lambda_{33}$  для буя массой 36 кг с радиусом основной части 0.22 м рассчитывались аналогично значениям для демпфированных буюв. Графики АЧХ, построенные для буюв с различным отношением  $S_1/S$ , где  $S_1 = S - S_0$ , представлены на рис. 3. На том же рисунке для сравнения показана расчетная АЧХ вертикальной качки буя, имеющего форму прямого кругового цилиндра.

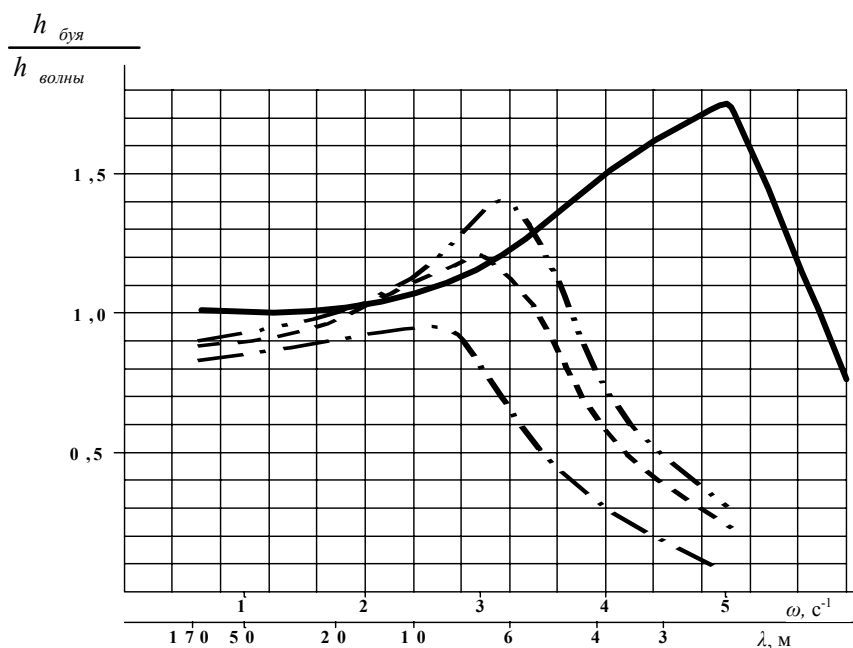
Из рисунка видно, что область характеристики обычного цилиндрического буя, при которой отношение  $h_{\text{буя}}/h_{\text{волны}} = 1$ , гораздо шире, чем у буя с малой площадью ватерлинии.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании результатов выполненных теоретических расчетов АЧХ вертикальной качки буюв с дисковыми демпферами можно сказать, что с увеличением диаметра демпфера резонансная частота колебаний уменьшается, при этом в области длинных волн характеристика смещается ниже значения  $h_{\text{буя}}/h_{\text{волны}} = 1$ . Это явление обусловлено увеличением присоединенной массы воды при увеличении площади демпфера. Отметим, что характер кривых для демпфированных буюв, представленных на рис. 1, подтверждается характером аналогичных графиков, построенных для буюв с другими массогабаритными характеристиками в работе [1].

Таким образом, применение классических демпферов с целью демпфирования частоты собственных вертикальных колебаний буюв для волномерных приборов представляется нецелесообразным. Демпфирование колебаний в области резонанса без значительного уменьшения  $\omega_c$  можно осуществить с помощью пружинного демпфера, предложенного в [7]. Предлагаемый пружинный демпфер в отличие от классических является элементом избирательного демпфирования, что позволяет ему выполнять свои функции только в зоне резонанса.

Сравнение результатов расчета АЧХ вертикальной качки буюв с малой площадью ватерлинии и обычных цилиндрических буюв (рис. 3) показывает, что при увеличении отношения  $S_1/S$  собственная частота качки и ее амплитуда в области резонанса уменьшаются. Таким образом, при уменьшении  $S_1/S$  АЧХ буя с малой площадью ватерлинии приближается к АЧХ обычного



**Рис. 3.** Сравнение расчетных АЧХ вертикальной качки цилиндрического буя и буюв с малой площадью ватерлинии при различных отношениях  $S_1/S$ .

— АЧХ цилиндрического буя  $\varnothing 0.44$  м и массой 36 кг;  
 АЧХ буюв с малой площадью ватерлинии при  $d=0.44$  м и массой 36 кг:  
 - · - · -  $S_1/S = 0.65$ , - - - - -  $S_1/S = 0.59$ ,  
 - · - · - -  $S_1/S = 0.44$

цилиндрического буя. Полученные передаточные функции вертикальной качки для буюв с малой площадью ватерлинии дают основание полагать, что такие бую не будут иметь вертикальной качки (т.е.  $h_{\text{бую}}/h_{\text{волны}} = 1$ ) лишь при определенной частоте. На всех иных частотах АЧХ будет отличаться от значения, равного единице. В связи с этим следует обратить внимание на спорность выводов, сделанных в работах В.Б. Вайсбанда [3, 4] о достоинствах буюв с малой площадью ватерлинии.

Результаты предлагаемых исследований позволяют сказать, что применение дисковых демпферов для стабилизации буюв с океанографической аппаратурой на борту представляется целесообразным только при работе в условиях волнения малой интенсивности. Использование буюв с малой площадью ватерлинии целесообразно лишь в некоторых случаях, когда необходимо стабилизировать контейнер с аппаратурой, подвешенный к бую на заданном горизонте измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчмит Ю.В. Вертикальная качка цилиндрических демпфированных буюв на морском волнении. Автореф. дис. ... канд. техн. наук Л.: Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1989. 20 с.
2. Котт Ю.П. Частотные характеристики поплавкового волнографа // Океанология. 1981. Т. 21, № 6. С. 1128–1133.
3. Вайсбанд В.Б. Качка стабилизированных буюв в условиях нерегулярного волнения // Метеорология и гидрология. 1988. № 7. С. 119–126.
4. Вайсбанд В.Б. О применении стабилизированных буюв для гидрометеорологических наблюдений в мелководных зонах морей и на крупных водоемах суши // Метеорология и гидрология. 1986. № 9. С. 115–119.
5. Грязин Д.Г., Ткалич В.Л. Устройство для демпфирования вертикальной качки волно-

- мерного буя // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 2. С. 88–90.
6. Грязин Д.Г. Оптимизация гидродинамических характеристик волномерного буя // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 4. С. 108–110.
7. Грязин Д.Г. Определение значений присоединенных масс воды при вертикальных колебаниях волномерных буюв // Научное приборостроение. 2000. Т. 10, № 2. С. 72–75.
8. Бородай И.К., Моренильшт В.А. и др. Прикладные задачи динамики судов на волнении. Л.: Судостроение, 1989. 264 с.
- Санкт-Петербургский Государственный институт точной механики и оптики (Технический Университет)*
- Материал поступил в редакцию 21.11.2000.

## STUDYING THE INFLUENCE OF BUOYS' STRUCTURAL ELEMENTS ON DAMPING OF THEIR HEAVING

**D. G. Griazin**

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

The questions of the influence of disk dampers and constructive dimensions of buoys with the small water-line section area on their heaving are discussed. The comparison of their characteristics with the characteristics of the buoy having the form of a straight circular cylinder is made. On the basis of the results the recommendations for application of the specified structural elements in designing oceanographic buoys are given.