

УДК 629.5.022.25
С 60

ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВОЛНОРЕЗНОГО КАТАМАРАНА ОТ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКИ

О. И. Соломенцев, д-р техн. аук, проф. ;
Е. А. Кудинова, магистрант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрено определение относительных перемещений и скоростей относительных перемещений от продольной качки для волнорезного катамарана на встречном нерегулярном волнении в случае, когда модуль соответствующей передаточной функции аппроксимируется приближенным аналитическим выражением. Учен вход в воду профилированного соединительного моста.

Ключевые слова: волнорезный катамаран, продольная качка, относительные перемещения, профилированный соединительный мост.

Анотація. Розглянуто визначення відносних переміщень та швидкостей відносних переміщень від поздовжньої хитавиці для хвилерізного катамарана на зустрічному нерегулярному хвилюванні у випадку, коли модуль відповідної передаточної функції апроксимується приблизною аналітичною залежністю. Береться до уваги вхід у воду профільованого з'єднувального мосту

Ключові слова: хвилерізний катамаран, поздовжня хитавиця, відносні переміщення, профільований з'єднувальний міст.

Abstract. In this article the approximate formulas are determined for the relative motions of a wave-piercing catamaran due to heave and pitch on irregular sea. The special condition is approximation of the proper transfer function module with approximate analytic dependence. «Central bow» is considered.

Keywords: wave-piercing catamaran, longitudinal motions, relative bow motions, «central bow».

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для практической реализации основанного на исследовании [14, 16] алгоритма расчета продольной качки волнорезного катамарана на встречном нерегулярном волнении необходимо иметь возможность найти относительные перемещения и скорости относительных перемещений волнорезного катамарана от продольной качки с учетом периодического входа соединительного моста в воду. Это связано с тем, что те дополнительные силы и моменты при продольной качке, которые в максимальной степени определяют различие между характеристиками качки обычного и волнорезного катамарана, определяются в функции дисперсий относительных перемещений и скоростей относительных перемещений [14, 16].

Реализуя метод статистической линеаризации применительно к продольной качке [16], приходится применять последовательные приближения. В этом случае в тех приближениях, которые следуют за первым, относительные перемещения от продольной качки находятся по результатам решения соответствующей системы уравнений предшествующего приближения. Но для построения первого приближения значения относительных перемещений и их скоростей должны быть получены каким-то иным путем, который не был бы связан с решением системы уравнений продольной качки. Кроме того, для самых предварительных

расчетных оценок иногда приходится ограничиваться только первым приближением, не выполняя достаточно трудоемкого решения системы уравнений продольной качки волнорезного катамарана на встречном волнении. Получение такого приближения и представляет собой решаемую в данной работе проблему.

В основе приближенных зависимостей должны лежать известные соотношения теории качки корабля на нерегулярном волнении для дисперсии относительных перемещений D_{ζ} и дисперсии скоростей относительных перемещений $D_{\dot{\zeta}}$. Если интересоваться только результатами интегрирования по частотам (только дисперсиями D_{ζ} и $D_{\dot{\zeta}}$), но не видом подынтегральной функции, то можно выполнять интегрирование не по кажущимся, а по истинным частотам. Тогда приходим к соотношениям вида

$$D_{\zeta} = \int_0^{\infty} |\Phi_{\zeta}(\omega)|^2 S_r(\omega) d\omega \approx \zeta_{\max}^2 h_3^2 \frac{\omega_{\max}}{\omega_c} \int_0^{\infty} |\bar{\Phi}_{\zeta}(\bar{\omega})|^2 \bar{S}_r(\bar{\omega}) d\bar{\omega};$$

$$D_{\dot{\zeta}} = \int_0^{\infty} |\Phi_{\dot{\zeta}}(\omega)|^2 S_r(\omega) d\omega \approx \int_0^{\infty} |\Phi_{\zeta}(\omega)|^2 S_r(\omega) \omega_k^2(\omega) d\omega \approx$$

$$\approx \zeta_{\max}^2 h_3^2 \frac{\omega_{\max}^3}{\omega_c} \int_0^{\infty} |\bar{\Phi}_{\zeta}(\bar{\omega})|^2 \bar{S}_r(\bar{\omega}) \bar{\omega}_k^2(\bar{\omega}) d\bar{\omega};$$

$$\bar{S}_r(\bar{\omega}) = \frac{\omega_c S_r(\bar{\omega})}{h_3^2}; \quad \bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_{\max}};$$

$$\bar{\omega}_k(\bar{\omega}) = \frac{\omega_k(\bar{\omega})}{\omega_{\max}} = \bar{\omega} + \frac{\bar{\omega}^2 \omega_{\max} v}{g}; \quad |\bar{\Phi}_\zeta(\bar{\omega})| = \frac{|\Phi_\zeta(\bar{\omega})|}{\zeta_{\max}},$$

где ω — истинная частота элементарной гармоник нерегулярного волнения; $\omega_k(\omega)$ — кажущаяся частота элементарной гармоник нерегулярного волнения, для встречного волнения $\omega_k(\omega) = \omega + \frac{\omega^2 v}{g}$; v — скорость хода судна; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $|\Phi_\zeta(\omega)|$ — модуль передаточной функции относительных перемещений от продольной качки в расчетном поперечном сечении; $|\bar{\Phi}_\zeta(\bar{\omega})|$ — то же в дважды нормированной форме; $|\Phi_\zeta(\omega)|$ — модуль передаточной функции скоростей относительных перемещений от продольной качки в расчетном поперечном сечении, приближенно $|\Phi_\zeta(\omega)| \approx |\Phi_\zeta(\omega)| \omega_k(\omega)$ [3]; ζ_{\max} , ω_{\max} — максимальная ордината модуля передаточной функции относительных перемещений в расчетном сечении и отвечающая ей частота; $S_r(\omega)$ — спектральная плотность волновых ординат; $\bar{S}_r(\bar{\omega})$ — то же в дважды нормированной форме.

Приближенность рассматриваемых далее методов состоит в том, что модуль передаточной функции $|\Phi_\zeta(\omega)|$ рассчитывается здесь не на основе решения системы уравнений продольной качки судна, а на основе тех или иных приближенных аппроксимаций с привлечением экспериментальных данных. Здесь можно задаться дважды нормированной спектральной плотностью $\bar{S}_r(\bar{\omega}_*)$, $\bar{\omega}_* = \bar{\omega} \frac{\omega_{\max}}{\omega_c}$ в форме Барлинга. После этого возможно аппроксимировать дважды нормированный модуль передаточной функции $|\Phi_\zeta(\omega)|$ с таким расчетом, чтобы интеграл по всему диапазону истинных частот от дважды нормированных псевдоспектров относительных перемещений $\bar{S}_\zeta^*(\bar{\omega}) = |\bar{\Phi}_\zeta(\bar{\omega})|^2 \bar{S}_r(\bar{\omega})$ и скоростей относительных перемещений $\bar{S}_\zeta^*(\bar{\omega}) = |\bar{\Phi}_\zeta(\bar{\omega})|^2 \bar{S}_r(\bar{\omega}) \bar{\omega}_k^2(\bar{\omega})$ мог быть взят в конечном виде (через гамма-функции [8, 9, 11] или через функции Макдональда [4]). Здесь в общем случае нужно учитывать граничное условие на коротких волнах вида

$$\lim_{\bar{\omega} \rightarrow \infty} |\bar{\Phi}_\zeta(\bar{\omega})| = \frac{1}{\zeta_{\max}} \neq 0. \quad (1)$$

Различные подходы к учету этого условия в связи с выбором аппроксимирующей зависимости для $|\bar{\Phi}_\zeta(\bar{\omega})|$ рассмотрены в [4, 9, 12].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для однокорпусных судов зависимости для определения ζ_{\max} и ω_{\max} приведены в [1, 2] и обобщены в работе автора [11] на случай больших скоростей. Для катамаранов, если соединительный мост не входит в воду и нет подводного крыла, взаимодействие корпусов влияет на величину ζ_{\max} только при значительных коэффици-

ентах общей полноты. Для скоростных катамаранов при соблюдении указанных условий отмеченное влияние может считаться для первого приближения отсутствующим [2, 11]. Влияние взаимодействия корпусов на величину ω_{\max} также может приближенно считаться отсутствующим [13]. Влияние на величину ζ_{\max} входа в воду соединительной конструкции для катамаранов с плоскостным мостом экспериментально исследовалось в [5] и теоретически в [8]. При теоретическом анализе вводилась линейризованная вихревая надбавка к демпфированию килевой качки, влияние вертикальной качки, а также изменчивость сил и моментов иных категорий не учитывались. Взаимосвязь между амплитудно-частотными характеристиками относительных перемещений и килевой качки принималась по приближенным соотношениям [3, 5]. Хотя по удовлетворительно согласующимся между собой теоретическим [8] и экспериментальным [5] данным снижение ζ_{\max} при входе плоскостного моста в воду и получается значительным, при взаимодействии моста с водой в этом случае возникают большие ударные нагрузки. Это и не позволяет практически применить — в отличие от волнорезных катамаранов — такой способ уменьшения относительных перемещений.

Влияние носового подводного крыла на величину ζ_{\max} теоретически рассмотрено в [9] при наличии хода и в [10] при его отсутствии. В первом случае вводилась линейная циркуляционная надбавка к демпфированию килевой качки, а во втором случае — аналогичная квадратичная вихревая надбавка. Взаимосвязь между амплитудно-частотными характеристиками относительных перемещений и килевой качки принималась так же, как и в предыдущем случае. Несмотря на большое количество упрощающих допущений, согласование расчета и эксперимента в обоих случаях получилось приемлемым [9, 10]. Причины этого объяснены в работе [14], а также далее.

Возможные подходы к аппроксимации величины $|\bar{\Phi}_\zeta(\bar{\omega})|$ и определение дисперсий относительных перемещений и их скоростей как для катамаранов, так и для традиционных судов рассмотрены в [4, 8, 12]. В то же время аналогичные приближенные зависимости для волнорезных катамаранов в известной литературе отсутствуют, и их получение и составление нерешенную часть общей проблемы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — получение таких приближенных зависимостей для дисперсий относительных перемещений и скоростей относительных перемещений волнорезного катамарана с учетом входа в воду профилированного соединительного моста, которые не требовали бы решения системы дифференциальных уравнений продольной качки.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Имея целью приближенно оценить влияние периодического входа соединительного моста волнорезного

катамарана в воду на дисперсии относительных перемещений и скоростей относительных перемещений, введем следующие упрощающие допущения.

1. Максимальная ордината амплитудно-частотной характеристики относительных перемещений ζ_{\max} и отвечающая ей частота ω_{\max} для корпуса в составе волнорезного катамарана в предположении отсутствия входа моста в воду и без учета дополнительного развала бортов (рис. 1, зона Б) может быть определена по формулам [1, 2, 11] как для однокорпусного судна.

2. Влияние входа в воду моста (зона А на рис. 1) и дополнительного развала бортов (зона Б на рис. 1) на частоту ω_{\max} в первом приближении может не учитываться.

3. Влияние входа в воду моста (зона А на рис. 1) на параметр ζ_{\max} учитывается путем введения на основе работы [14] поправок в определение коэффициента динамичности килевой качки, который вычисляется при частоте $\omega = \omega_{\max}$ и затем по упрощенным зависимостям (без учета вертикальной качки) связывается с параметром ζ_{\max} на основе приближенных зависимостей [3, 5, 7].

4. Влияние входа в воду соединительного моста на возмущающие силы и моменты при продольной качке в первом приближении может не учитываться.

5. Влияние входа в воду дополнительного развала борта (зона Б на рис. 1) учитывается в соответствии с Методикой [6].

6. При определении дисперсий относительных перемещений и скоростей относительных перемещений примем за основу спектральную плотность в форме Барлинга с коэффициентами Второго Международного конгресса по конструкции судов, а также аппроксимацию дважды нормированной передаточной функции относительных перемещений в форме

$$|\overline{\Phi}_{\zeta}(\overline{\omega})| = \overline{\omega}^{-2n_{\zeta}} \exp\left[-\frac{n_{\zeta}}{2}(\overline{\omega}^{-4} - 1)\right]. \quad (2)$$

7. С некоторой погрешностью в безопасную сторону будем пренебрегать различиями в конфигурациях погруженной части «центрального носа» при входе в воду носовой и кормовой его частей, выполняя все расчеты только для носовой его части.

Теперь рассмотрим подробнее обоснование весьма существенного в данной задаче допущения 3. При входе моста в воду в уравнениях продольной качки изменяются в общем случае все категории действующих при качке сил и моментов — инерционные, демпфирующие, восстанавливающие и возмущающие.

Изменения инерционных (пропорциональных ускорениям при качке) и восстанавливающих сил и моментов учитываются в уравнениях качки через изменения соответствующих собственных частот. Эти частоты определяются как квадратные корни

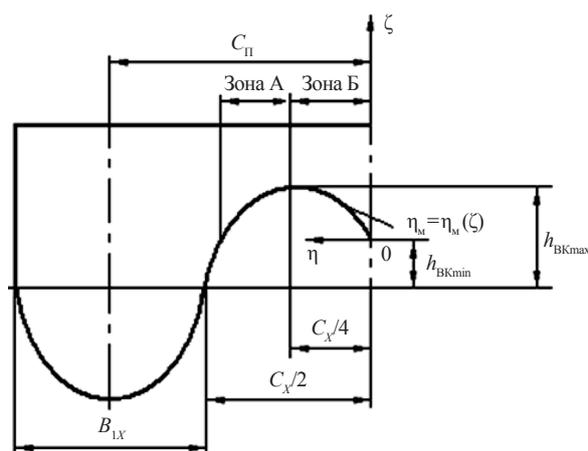


Рис. 1. Расчетное поперечное сечение волнорезного катамарана

из отношения коэффициента восстанавливающей силы (момента) к коэффициенту инерционной силы (момента). А указанные коэффициенты изменяются при входе моста в воду примерно в одной и той же пропорции, из-за чего собственные частоты при входе моста в воду изменяются не слишком сильно. Влияние же той части инерционной силы и отвечающего ей момента при входе в воду моста, которые связаны с градиентом присоединенных масс и скоростью колебаний и проявляются как надбавка к демпфирующим силам (моментам) в уравнениях качки, оказывается определяющим [14]. Соответствующие силы и моменты поэтому далее условно рассматриваются как дополнительные демпфирующие силы и моменты. Величины же собственно демпфирующих (т. е. связанных с рассеиванием энергии) дополнительных сил и моментов при входе в воду моста получаются незначительными. Незначительным оказывается и вклад вертикальной качки в общий баланс относительных перемещений.

Остановимся далее на обосновании допущения 4. Пусть $f_z^{(0)}$ — амплитудное значение возмущающей силы при вертикальной качке и $m_{\psi}^{(0)}$ — амплитудное значение возмущающего момента при килевой качке при отсутствии входа моста в воду. Обе эти величины отнесены к соответствующим инерционным коэффициентам ($M + \lambda_{z0}$ для вертикальной качки, $J_y + \lambda_{\psi 0}$ для килевой качки; здесь M , J_y — масса и продольный момент инерции массы одного корпуса катамарана как однокорпусного судна, λ_{z0} , $\lambda_{\psi 0}$ — присоединенная масса и присоединенный момент инерции масс одного корпуса катамарана как однокорпусного судна, вычисленные без учета входа в воду соединительного моста). Тогда на основании метода относительного движения и предполагая, что редуцированные коэффициенты к главным и к дифракционным частям возмущающих сил κ_z и моментов κ_{ψ} одинаковы,

величины $f_z^{(0)}$ и $m_\psi^{(0)}$ на регулярном волнении с амплитудой r_0 и с частотой ω определим в виде

$$f_z^{(0)} = \kappa_z r_0 \sqrt{(n_{z0}^2 - q_{z0} \omega^2)^2 + 4\mu_z^2 n_{z0}^2 \omega^2};$$

$$m_\psi^{(0)} = \kappa_\psi k r_0 \sqrt{(n_{\psi 0}^2 - q_{\psi 0} \omega^2)^2 + 4\mu_\psi^2 n_{\psi 0}^2 \omega^2};$$

$$k = \frac{\omega^2}{g}; \quad q_{z0} = \frac{\lambda_{z0}}{M + \lambda_{z0}}; \quad q_{\psi 0} = \frac{\lambda_{\psi 0}}{J_Y + \lambda_{\psi 0}},$$

где n_{z0} , $n_{\psi 0}$ — частоты собственных вертикальных и килевых колебаний волнорезного катамарана, вычисленные без учета входа соединительного моста в воду; μ_z , μ_ψ — безразмерные коэффициенты демпфирования вертикальной и килевой качки.

Те же величины с учетом входа соединительного моста в воду определяются как

$$f_z = \kappa_z r_0 \sqrt{(n_z^2 - q_z \omega^2)^2 + 4(\mu_z + \Delta\mu_z)^2 n_z^2 \omega^2};$$

$$m_\psi = \kappa_\psi k r_0 \sqrt{(n_\psi^2 - q_\psi \omega^2)^2 + 4(\mu_\psi + \Delta\mu_\psi)^2 n_\psi^2 \omega^2};$$

$$q_z = \frac{\lambda_{z0}(1 + \delta\lambda_z)}{M + \lambda_{z0}(1 + \delta\lambda_z)}; \quad q_\psi = \frac{\lambda_{\psi 0}(1 + \delta\lambda_\psi)}{J_Y + \lambda_{\psi 0}(1 + \delta\lambda_\psi)},$$

где n_z , n_ψ — частоты собственных вертикальных и килевых колебаний волнорезного катамарана, вычисленные с учетом входа соединительного моста в воду [14]; $\Delta\mu_\psi$ — половина линеаризованного безразмерного коэффициента демпфирования килевой качки, которая приходится на один корпус катамарана; $\delta\lambda_z$, $\delta\lambda_\psi$ — безразмерные добавки к инерционным коэффициентам уравнений качки, вычисленные согласно [14].

Здесь $n_{z0} \approx n_z$ и $n_{\psi 0} \approx n_\psi$ [14]. Величины q_z и q_ψ увеличиваются по сравнению с q_{z0} и $q_{\psi 0}$, а к коэффициентам демпфирования μ_z и μ_ψ добавляются величины $\Delta\mu_z$ и $\Delta\mu_\psi$. Однако структура расчетных зависимостей для возмущающих сил и моментов, как следует из приведенных формул, такова, что указанные поправки в значительной степени взаимно компенсируются. Это имеет место, несмотря на то, что, как увидим ниже, величина $\Delta\mu_\psi$ по сравнению с величиной μ_ψ может быть значительной. Поэтому в приближенных расчетах допустимо принимать $f_z \approx f_z^{(0)}$ и $m_\psi \approx m_{\psi 0}$. И только если частота набегающего волнения ω равна частоте нулевого возмущения $\omega_0 = \frac{n_\psi}{\sqrt{q_\psi}}$, когда $n_\psi^2 - q_\psi \omega_0^2 = 0$ и, в соответствии с выводами гидродинамической теории качки, $\mu_\psi \approx 0$ [15], имеем $m_\psi = m_{\psi 0} \approx 2\sqrt{q_\psi} \kappa_\psi k r_0 n_\psi^2 \Delta\mu_\psi$ и роль надбавки $\Delta\mu_\psi$ получается существенной. Однако это имеет место только в очень узком частотном диапазоне, на несущих малую энергию коротких волнах [15], и практически всегда $\omega_0 > \omega_{\max}$, что и позволяет пренебречь этим фактором в приближенных оценках.

Рассмотрим теперь обоснование допущения 6. Формула (2) не учитывает условия (1). Учет этого условия возможен [4, 9, 12], но приведет к необоснованному (в силу малой точности исходных данных) усложнению расчетных зависимостей. Более правильно здесь сохранить соотношение (1), но для приближенной компенсации отсутствия учета условия (1) искать коэффициент n_ζ в формуле (2) по статистической формуле вида [8, 12]

$$n_\zeta \approx 1,4(\zeta_{\max} - 1).$$

Тогда дисперсии относительных перемещений D_ζ и скоростей относительных перемещений $D_{\dot{\zeta}}$ для волнорезного катамарана по аналогии с [7, 8, 12], но с учетом входа в воду соединительного моста («центрального носа») приближенно определяются следующим образом:

$$\sqrt{D_{\zeta 0}} \approx K \bar{\zeta}_{\max} \frac{L}{100} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} I_\zeta(K);$$

$$\sqrt{D_{\dot{\zeta} 0}} = K \bar{\zeta}_{\max} \omega_{\max} \cdot \frac{L}{100} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{2}{\pi} [I_{\zeta 1}(K) + 2\sqrt{2\pi} \text{Fr} I_{\zeta 2}(K) + 2\pi \cdot \text{Fr}^2 I_{\zeta 3}(K)]};$$

$$I_\zeta(K) = 4 \exp(n_\zeta) \bar{\omega}_{\max}^{4n_\zeta} \int_0^\infty \bar{\omega}^{-4n_\zeta - 5} \exp\left(-\frac{\Pi_\omega}{\bar{\omega}^4}\right) d\bar{\omega} =$$

$$= \frac{\bar{\omega}_{\max}^{4n_\zeta(K)} \exp[n_\zeta(K)] \Gamma[n_\zeta(K) + 1]}{\Pi_\omega^{n_\zeta(K) + 1}(K)},$$

$$I_{\zeta 1}(K) = 4 \exp(n_\zeta) \bar{\omega}_{\max}^{4n_\zeta} \int_0^\infty \bar{\omega}^{-4n_\zeta - 3} \exp\left(-\frac{\Pi_\omega}{\bar{\omega}^4}\right) d\bar{\omega} =$$

$$= \frac{\bar{\omega}_{\max}^{4n_\zeta(K)} \exp[n_\zeta(K)] \Gamma\left(n_\zeta(K) + \frac{1}{2}\right)}{\Pi_\omega^{n_\zeta(K) + \frac{1}{2}}(K)},$$

$$I_{\zeta 2}(K) = 4 \exp(n_\zeta) \bar{\omega}_{\max}^{4n_\zeta} \int_0^\infty \bar{\omega}^{-4n_\zeta - 2} \exp\left(-\frac{\Pi_\omega}{\bar{\omega}^4}\right) d\bar{\omega} =$$

$$= \frac{\bar{\omega}_{\max}^{4n_\zeta(K)} \exp[n_\zeta(K)] \Gamma\left(n_\zeta(K) + \frac{1}{4}\right)}{\Pi_\omega^{n_\zeta(K) + \frac{1}{4}}(K)},$$

$$I_{\zeta 3}(K) = 4 \exp(n_\zeta) \bar{\omega}_{\max}^{4n_\zeta} \int_0^\infty \bar{\omega}^{-4n_\zeta - 1} \exp\left(-\frac{\Pi_\omega}{\bar{\omega}^4}\right) d\bar{\omega} =$$

$$= \frac{\bar{\omega}_{\max}^{4n_\zeta(K)} \exp[n_\zeta(K)] \Gamma[n_\zeta(K)]}{\Pi_\omega^{n_\zeta(K)}(K)},$$

$$\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gL}}; \quad \Pi_\omega(K) = n_\zeta(K) \bar{\omega}_{\max}^4 + \frac{0,177}{a^2};$$

$$\bar{\omega}_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_L}; \quad a \approx \frac{10h_3}{L}; \quad \omega_L = \sqrt{\frac{2\pi g}{L}};$$

$$n_{\zeta}(K) \approx 1,4(K\bar{\zeta}_{\max} - 1); \quad K = K_A K_B = K_A(D_{\zeta}, D_{\xi})K_B(D_{\zeta});$$

$$K_A \approx \sqrt{\frac{1 + (K_{\psi} C_{\psi})^2 - 2K_{\psi} C_{\psi} \cos\left(k_{\max} \frac{L}{2} - \delta_{\psi}\right)}{1 + C_{\psi}^2 - 2C_{\psi} \cos\left(k_{\max} \frac{L}{2} - \delta_{\psi}\right)}};$$

$$K_B = 1,0 - 0,05\text{Fr}(1,0 + A_{\text{Fr}}\text{Fr}) \left(\frac{K_{FL} - 1}{K_{FL}}\right)^2 \left(\frac{\sqrt{\frac{\pi}{2} D_{\zeta}}}{H_{f1}}\right)^2;$$

$$K_{\psi} = \frac{\Psi_{0K}}{\Psi_0} = \sqrt{\frac{[n_{\psi v}^2 - \omega_{\max}^2]^2 + 4\mu_{\psi}^2 n_{\psi}^2 \omega_{\max}^2}{[n_{\psi v}^2 - \omega_{\max}^2]^2 + (2\mu_{\psi} + \Delta\tilde{\mu}_{\psi})^2 n_{\psi}^2 \omega_{\max}^2}}; \quad (3)$$

$$C_{\psi} = k_{\max} \frac{L}{2} \cdot \frac{k_1 \left(1 - \frac{B_1}{L} k_2\right)}{\pi \sqrt{1 + 6,5 \frac{L}{\lambda_{\max}} \left(1 - \frac{\omega_{\max}^2}{n_{\psi}^2}\right)^2}};$$

$$\text{tg } \delta_{\psi} = 2,55 \sqrt{\frac{L}{\lambda_{\max}}} \left(1 - \frac{\omega_{\max}^2}{n_{\psi}^2}\right);$$

$$k_1 = 3,8 \left(\frac{\lambda_{\max}}{L}\right)^{3,5 - \frac{2\lambda_{\max}}{L}} - 1,6[1 - \cos \pi(\alpha - 0,5)]^{1,5};$$

$$k_2 = 1,2 \left(\frac{L}{\lambda_{\max}}\right)^{\frac{2L}{\lambda_{\max}} - 0,6} + 0,9 \sin 1,25\pi(\alpha - 0,6);$$

$$n_{\psi v} = \sqrt{n_{\psi}^2 - \frac{\lambda_z v^2}{J_y + \lambda_{\psi}}}; \quad n_{\psi} = \sqrt{\frac{\rho g I_{yf}}{J_y + \lambda_{\psi}}};$$

$$I_{yf} \approx \frac{\alpha^2 L^3 B_1}{13,3}; \quad \lambda_{\max} = \frac{2\pi g}{\omega_{\max}^2};$$

$$2\mu_{\psi} \approx \frac{0,4}{\omega_{\max} (1 + q_{\psi} \delta \lambda_{\psi})} \sqrt{\frac{2\pi g}{L}} \left(1 + \frac{g\text{Fr}}{\bar{r} L \omega_{\max}^2}\right);$$

$$\bar{r}_y = \sqrt{\bar{r}_y^{(0)} (0,07 + 0,20\delta)}; \quad \bar{r}_y^{(0)} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{J_y}{M}};$$

$$\Delta\tilde{\mu}_{\psi} = \frac{\Delta\tilde{N}_{\psi}}{2[J_y + \lambda_{\psi} (1 + \delta \lambda_{\psi})] n_{\psi}};$$

$$\Delta\tilde{N}_{\psi} = \Delta\tilde{N}_z(D_{\zeta 0}, D_{\xi 0}) \left(\frac{l_M}{2} - \frac{\bar{s}_M}{3} - x_g - \Delta x_M\right)^2;$$

$$A_{\text{Fr}} = \text{Fr} + 0,05, \quad \text{Fr} \leq 0,25; \quad A_{\text{Fr}} = 1,05 - 3,0\text{Fr}, \quad \text{Fr} \geq 0,25.$$

Здесь L — длина судна-катамарана; B_1 — ширина одного корпуса судна-катамарана; I_{yf} — продольный момент инерции площади ватерлинии одного корпуса катамарана; Ψ_{0K}, Ψ_0 — амплитуды килевой качки на регулярном волнении, характеризуемом длиной волны λ_{\max} , с учетом и без учета входа в воду профилированного соединительного моста; n_{ψ} — собственная частота килевой качки; δ_{ψ} — сдвиг по фазе амплитуд килевой качки по отношению к амплитудам набегающих волн [7]; δ — коэффициент общей полноты катамарана; α — коэффициент полноты площади КВЛ катамарана; K_{FL} — отношение площади верхней палубы (палубы полубака) в пределах участка А (см. рис. 1) к площади КВЛ на участке от носовой оконечности до четвертого теоретического шпангоута; H_{f1} — высота надводного борта на первом теоретическом шпангоуте; $\Delta\tilde{N}_z = \Delta\tilde{N}_z(D_{\zeta}, D_{\xi})$ — линеаризованный коэффициент вертикального демпфирования при входе соединительного моста в воду, зависящий от дисперсий D_{ζ} и D_{ξ} , а также от величин вертикальных клиренсов $h_{\text{BKmax}}, h_{\text{BKmin}}$ (см. рис. 1) [14]; $\bar{r}_y^{(0)}, \bar{r}_y$ — безразмерные (в долях длины) продольные радиусы инерции, вычисленные без учета и с учетом присоединенных масс соответственно, связь между \bar{r}_y и $\bar{r}_y^{(0)}$ принята по [1]; l_M — длина соединительного моста; Δx_M — горизонтальное продольное смещение середины соединительного моста относительно плоскости мидель-шпангоута для корпусов, $\Delta x_M > 0$, если середина моста сдвинута в нос от плоскости миделя, и $\Delta x_M < 0$ в противном случае; \bar{s}_M — средняя в статистическом смысле длина вошедшей в воду части «центрального носа» [14].

Если в формуле (3) можно принять $\cos\left(k_{\max} \frac{L}{2} - \delta_{\psi}\right) \approx \cos \pi = -1$, то приходим к приближенному соотношению [5]

$$K_A \approx \frac{1 + K_{\psi} C_{\psi}}{1 + C_{\psi}}.$$

Здесь безразмерный коэффициент демпфирования килевой качки μ_{ψ} определен на основе приближенных зависимостей [7]. Результаты, близкие к результатам выполненных расчетов, получаются и при использовании известных графиков А. З. Салькаева.

По результатам расчетов параметр $M_{\psi} = 1 + \frac{\Delta\mu_{\psi}}{2\mu_{\psi}}$ может колебаться в зависимости от формы соединительного моста, величин горизонтального и вертикального клиренсов и интенсивности волнения от 1 (чему отвечает отсутствие входа моста в воду) до 2,5...3,0. Зависимость параметров $\kappa_{\zeta} = \sqrt{\frac{D_{\zeta}(M_{\zeta})}{D_{\zeta}(1)}}$ и $\kappa_{\xi} = \sqrt{\frac{D_{\xi}(M_{\xi})}{D_{\xi}(1)}}$ от $M_{\psi} = 1 + \frac{\Delta\mu_{\psi}}{2\mu_{\psi}}$ показана на рис. 2

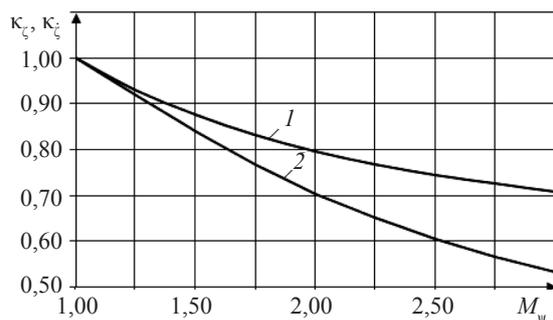


Рис. 2. Зависимость величин κ_{ξ} и κ_{ζ} от M_{ψ} : 1 — $\kappa_{\xi}(M_{\psi})$; 2 — $\kappa_{\zeta}(M_{\psi})$

ВЫВОДЫ

1. Получены приближенные зависимости для дисперсий относительных перемещений и скоростей относительных перемещений волнорезного катамарана с учетом входа в воду профилированного соединительного моста которые не связаны с решением системы уравнений продольной качки.

2. Эти зависимости могут быть использованы или как первый этап построения схемы последовательных приближений в процессе решения системы дифференциальных уравнений продольной качки волнорезного катамарана, или как метод приближенной оценки характеристик качки судна данного архитектурно-конструктивного типа.

3. Вклад вертикальной качки в общий баланс относительных перемещений получается небольшим, поэтому, как и в предыдущих исследованиях [8–10], в качестве экстраполятора использован коэффициент динамичности килевой качки.

4. Влияние входа в воду профилированного соединительного моста на частоты собственных вертикаль-

ных и килевых колебаний невелико [14]. Соответственно, влияние данного фактора на главные части возмущающих сил и моментов при вертикальной и килевой качке также малозначительно. Влияние входа моста в воду на демпфирующую составляющую дифракционных частей возмущающих сил и моментов заметное, на инерционную составляющую — несколько менее значительное. Однако следующая из метода относительного движения и гидродинамической теории качки структура амплитуд суммарных возмущающих силы и момента такова, что совокупное влияние входа в воду соединительного моста на амплитуду силы (момента) малозначительно.

5. Дополнительный коэффициент демпфирования килевой качки $\Delta\mu_{\psi}$, который определяется по схеме статистической линеаризации квадратичного детектора [16], может колебаться в достаточно широких пределах в зависимости от горизонтального и вертикального клиренсов, угла килеватости соединительного моста «центрального носа» и интенсивности волнения. Соответственно параметр $M_{\psi} = 1 + \frac{\Delta\mu_{\psi}}{2\mu_{\psi}}$ также может колебаться в достаточно широких пределах — от 1 (чему отвечает отсутствие входа моста в воду и $\Delta\mu_{\psi} = 0$) до 2–3.

6. Зависимости параметров $\kappa_{\xi} = \sqrt{\frac{D_{\xi}(M_{\xi})}{D_{\xi}(1)}}$ и $\kappa_{\zeta} = \sqrt{\frac{D_{\zeta}(M_{\zeta})}{D_{\zeta}(1)}}$ от $M_{\psi} = 1 + \frac{\Delta\mu_{\psi}}{2\mu_{\psi}}$, приведенные на рис. 2, показывают существенное снижение относительных перемещений и скоростей относительных перемещений при входе моста в воду, причем для скоростей указанное снижение получается более существенным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бойцов, Г. В. Прочность и конструкция корпуса судов новых типов [Текст] / Г. В. Бойцов, О. М. Палий. — Л. : Судостроение, 1979. — 360 с.
- [2] Бородай, И. К. Мореходность судов [Текст] / И. К. Бородай, Ю. А. Нецветаев. — Л. : Судостроение, 1982. — 288 с.
- [3] Волкова, Е. Б. Об определении кинематических параметров носовой оконечности судна на регулярном волнении [Текст] / Е. Б. Волкова, Е. А. Павлинова // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — Л. : Судостроение, 1971. — Вып. 264. — С. 26–34.
- [4] Гамалий, В. В. Расчет и опытная проверка диаграмм штормового плавания судов [Текст] / В. В. Гамалий, Е. Н. Каменская, А. А. Петров // Перспективные типы морских транспортных судов, их мореходные и ледовые качества : сб. науч. трудов ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1990. — С. 63–76.
- [5] Кандель, Ф. Г. Определение ударного изгибающего момента для катамарана [Текст] / Ф. Г. Кандель // Судостроение. — 1976. — № 6. — С. 7–11.
- [6] Методика определения изгибающего момента при ударе волн в развал бортов [Текст] / О. А. Осипов // Сб. нормативно-методических материалов Регистра СССР. — М. : В/О «Мортехинформреклама», 1986. — Кн. 4. — С. 7–19.
- [7] Павлинова, Е. А. Приближенные формулы для оценки продольной качки в расчетах слеминга [Текст] / Е. А. Павлинова // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — Л. : Судостроение, 1971. — Вып. 264. — С. 16–26.

- [8] **Соломенцев, О.И.** Определение статистических характеристик относительных перемещений двухкорпусного судна на встречном волнении // Автоматизированное проектирование и конструкции судов : сб. науч. трудов НКИ. — Николаев : НКИ, 1986. — С. 58–72.
- [9] **Соломенцев, О.И.** Оценка влияния установки подводного крыла на мореходность двухкорпусного судна при его проектировании [Текст] / О.И. Соломенцев // Совершенствование судовых устройств : сб. науч. трудов НКИ. — Николаев : НКИ, 1987. — С. 73–86.
- [10] **Соломенцев, О.И.** О влиянии носового подводного крыла на мореходность катамарана в отсутствие хода [Текст] / О.И. Соломенцев // Особенности проектирования судов перспективных архитектурно-конструктивных типов. — Николаев : Черноморское межобластное правление НТО им. акад. А.Н. Крылова, 1989. — С. 36–40.
- [11] **Соломенцев, О.И.** Расчет характеристик мореходности двухкорпусного судна на встречном волнении на разных иерархических уровнях проектирования [Текст] / О.И. Соломенцев // Морские технологии : сб. науч. трудов НКИ. — Николаев : НКИ, 1992. — С. 76–86.
- [12] **Соломенцев, О.И.** О форме аппроксимирующей зависимости для модуля передаточной функции относительных перемещений при продольной качке судов на встречном волнении [Текст] / О.И. Соломенцев // Программные и аппаратные средства вычислительной техники и автоматизированных систем : сб. науч. трудов НКИ. — Николаев : НКИ, 1992. — С. 31–43.
- [13] **Соломенцев, О.И.** Расчет длины волны, соответствующей максимальной ординате амплитудно-частотной характеристики относительных перемещений для катамарана [Текст] / О.И. Соломенцев // Морские технологии : сб. науч. трудов НКИ. — Николаев : НКИ, 1993. — С. 103–109.
- [14] **Соломенцев, О.И.** Дополнительные инерционно-демпфирующие и восстанавливающие силы и моменты при продольной качке волнорезного катамарана на встречном нерегулярном волнении [Электронный ресурс] / О.И. Соломенцев, Е. А. Кудинова // Электронне видання «Вісник НУК». — Миколаїв : НУК, 2012. — № 3. — Режим доступа: <https://www.ev.@nuos.edu.ua>.
- [15] **Motora, S.** On Wave Excitationless Ship Forms [Text] / S. Motora, T. Koyama // Selected papers from the Journal of the Society of Naval Architects of Japan. — 1969. — Vol. 3. — P. 75–81
- [16] **Solomyentsev, O.I.** Motions of the High-Speed Wave-piercing Catamaran on the Irregular Head Waves [Text] / O. I. Solomyentsev, S. O. Slobodyan // International Conference of Fast Ships: Malek Ashtar University of Technology. — Shiraz, 2005. — 12 p.

© О.И. Соломенцев, О.А. Кудинова

Надійшла до редколегії 01.06.12

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р. техн. наук, проф. *В.О. Некрасов*

Статтю розміщено у Віснику НУК №4, 2012