

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИНЕРЦИОННО-ДЕМПФИРУЮЩИЕ И ВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕ СИЛЫ И МОМЕНТЫ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКЕ ВОЛНОРЕЗНОГО КАТАМАРАНА НА ВСТРЕЧНОМ НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

О. И. Соломенцев, д-р техн. наук, проф. НУК;

Е. А. Кудинова, магистрант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрено определение дополнительных демпфирующих и восстанавливающих сил и моментов при продольной качке волнорезного катамарана, которые обусловлены периодическим входом в воду профилированного соединительного моста («центрального носа»). Приведены результаты соответствующих расчетов.

Ключевые слова: волнорезный катамаран, вертикальная качка, килевая качка, демпфирующие силы и моменты, восстанавливающие силы и моменты.

Анотація. Розглянуто визначення додаткових демпфівальних та відновлювальних сил і моментів при поздовжній хитавиці хвилерізного катамарана, які обумовлені періодичним входженням у воду профільованого з'єднувального мосту («центрального носа»). Наведено результати відповідних розрахунків.

Ключові слова: хвилерізний катамаран, вертикальна хитавиця, кильова хитавиця, демпфівальні сили та моменти, відновлювальні сили і моменти.

Abstract. Additional damping and restoring forces and moments during wave-piercing catamaran pitching have been considered. They are conditioned by water entry of the central bow of the wave-piercing catamaran. The results of corresponding calculations are analyzed.

Keywords: wave-piercing catamaran, heave, pitching, damping forces and moments, restoring forces and moments.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время быстроходные катамараны являются одним из перспективных типов судов. В некоторых случаях эти суда имеют профилированный соединительный мост (так называемый центральный нос, central bow [18]), который выполняет функцию демпфера. Катамаран с профилированным мостом, имея небольшую продольную качку, зрительно не следует за колебаниями волн, а разрезает их, поэтому такие катамараны и называют *волнорезными*. Корректное определение характеристик центрального носа — одна из наиболее важных задач при проектировании волнорезного катамарана.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Результаты предварительных исследований по влиянию «центрального носа» на продольную качку катамарана были изложены одним из авторов в 2005 г. в докладе на Международной конференции по скоростным судам [18]. Прочие исследования по данной тематике авторам неизвестны. Продолжая начатые в [18] исследования, необходимо разработать практические методы расчета дополнительных (обусловленных наличием «центрального носа») гидродинамических сил при продольной качке волнорезного катамарана и выявить влияние геометрических параметров «центрального носа» на их величины.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка простых приближенных методов для расчета дополнительных сил и моментов при продольной качке волнорезного катамарана, обусловленных периодическим входом в воду профилированного соединительного моста, и выявление зависимости этих сил от особенностей формы соединительного моста.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Периодический вход соединительного моста в воду может быть описан уравнениями продольной качки судна с изменяющейся формой [15]. Здесь в общем случае необходимо учесть влияние участка (зоны) А в середине моста и зоны Б для района, прилегающего к корпусу (рис. 1). Для зоны Б в первом приближении можно воспользоваться существующими рекомендациями в области влияния развала бортов в носовой части традиционных однокорпусных судов на продольную качку [9]. Пусть, далее, ордината волнения есть $r(t)$, ордината вертикальной качки — $z(t)$, ордината килевой качки — $\psi(t)$; ордината абсолютных вертикальных перемещений $Z(t)$ на расстоянии x от центра тяжести площади КВЛ, абсцисса которого есть x_p будет $Z(t) = z(t) + (x - x_p)\psi(t)$; ордината относительных перемещений $\zeta(t) = Z(t) - r(t)$ равна мгновенной осадке вошедшего в воду контура. Тогда на контур будут действовать погонные (на единицу длины) гидромеханические силы, определяемые следующим образом:

– гидростатическая сила, связанная с изменением погруженного объема (рис. 1),

$$f_{zr}(t) = -\rho g \int_0^{\zeta(t)} \eta_M(u) du \approx -C_{ГС} \rho g \eta_M \zeta = -C_{ГС} \rho g \eta_M (Z - r),$$

$C_{ГС}$ — линейризованный коэффициент гидростатической силы;

– демпфирующая сила, связанная с диссипацией (рассеиванием) энергии на единицу длины, $f_{zД}(t) = -2N_{zМ}(\zeta)\dot{\zeta} = -2N_{zМ}(\zeta)(\dot{Z} - \dot{r})$;

– инерционная сила $f_{zИ}(t)$, которая в соответствии с законами сохранения количества движения и сохранения энергии определится так:

$$f_{zИ}(t) = \frac{d(\lambda_{zМ}\dot{\zeta})}{dt} = f'_{zИ}(t) + f''_{zИ}(t);$$

$$f'_{zИ}(t) = -\lambda_{zМ}(\zeta)\ddot{\zeta};$$

$$f''_{zИ}(t) = -K_q \frac{d\lambda_{zМ}}{d\zeta} \dot{\zeta} = -K_q \frac{d\lambda_{zМ}}{d\zeta} \dot{\zeta}^2 = -K_p \frac{\rho \dot{\zeta}^2}{2} \zeta,$$

где $K_p = \frac{K_q}{\rho} \frac{d\lambda_{zМ}(\zeta)}{d\zeta}$ — коэффициент ударных давлений $p_{уд}$ при входе моста в воду, при этом $p_{уд} = -\frac{f''_{zИ}}{\zeta} = K_p \frac{\rho \dot{\zeta}^2}{2}$ (здесь авторы приближенно отождествили скорость соударения со скоростью относительных перемещений и пренебрегли так называемым эффектом П. Ф. Папковича).

В этом случае коэффициент K_q , учитывающий потери на брызгообразование, не следует из закона сохранения количества движения. Он вводится с целью согласовать результаты расчетов на основании закона сохранения количества движения и закона сохранения энергии, при этом $0,5 \leq K_q \leq 1$ [1].

Тогда после осреднения с учетом нерегулярности волнения и интегрирования по длинам ударов (длинам вхождения моста в воду) в его носовой и кормовой оконечностях полученные таким образом

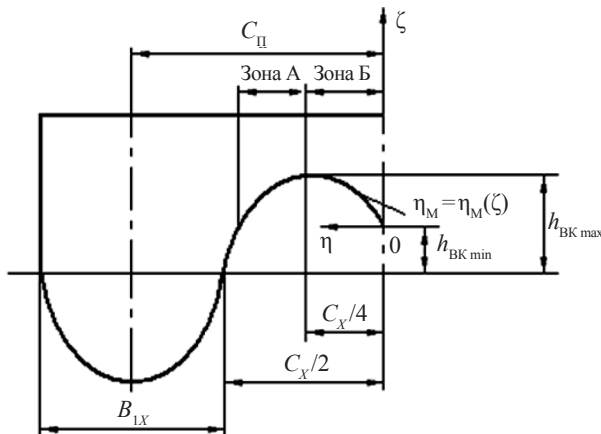


Рис. 1. К определению дополнительных сил и моментов при продольной качке волнорезного катамарана

силы добавляются в уравнения вертикальной качки, а после определения соответствующих моментов — и в уравнения килевой качки. При этом силы и моменты, в основе которых лежит сила f_{zr} , добавляются к восстанавливающим силам и моментам и к главным частям возмущающих сил и моментов. Силы и моменты, в основе которых сила $f_{zД}$, пренебрежимо малы. Силы и моменты, в основе которых сила $f'_{zИ}$, добавляются к инерционным силам и моментам и к инерционным составляющим дифракционных частей возмущающих сил и моментов. Силы и моменты, в основе которых сила $f''_{zИ}$, добавляются к демпфирующим силам и моментам и к демпфирующим составляющим дифракционных частей возмущающих сил и моментов.

Это происходит потому, что сила $f''_{zИ}$ связана со скоростями соответствующих перемещений, как и демпфирующие силы и моменты. В то же время эта сила, строго говоря, не является демпфирующей в общепринятом смысле (она связана с градиентом присоединенных масс, а не с рассеиванием энергии). Но, несмотря на это, условимся далее называть связанные с силой $f''_{zИ}$ добавки дополнительными демпфирующими силами и моментами. Именно эти силы и моменты и оказывают наибольшее влияние на продольную качку волнорезного катамарана по сравнению с катамараном, не имеющим профилированного соединительного моста. В то же время при решении аналогичной задачи для катамаранов с плоскостным мостом [12] вводимая добавка к демпфирующим силам и моментам представляла собой вихревое демпфирование — как и для случая продольной качки не имеющего хода катамарана с носовым подводным крылом [14]. В последнем случае при наличии хода надбавка к демпфированию имела циркуляционную природу [13].

Далее последовательно определим дополнительные демпфирующие (в указанном выше смысле), восстанавливающие и инерционные силы, связанные с входом моста в воду и добавляемые к соответствующим членам уравнений продольной качки.

Пусть контур соединительного моста, характеризуемый погонной (на единицу длины) присоединенной массой при вертикальных перемещениях $\lambda_{zМ}(\zeta) = C_{zМ} \rho \eta_M^2(\zeta)$ и линейризованным погонным коэффициентом демпфирования $2\tilde{N}_{zМ}(\zeta)$, вошел в воду из-за продольной качки на длине s_M (здесь ρ — плотность воды и $C_{zМ}$ — коэффициент присоединенной массы). Определим дополнительные нелинейные демпфирующие силы — обусловленную входом носовой оконечности моста в воду силу $F_{zД1}$ и входом в воду кормовой оконечности моста силу $F_{zД2}$. Для этого применим метод статистической линейризации квадратичного детектора по аналогии со статистической линейризацией демпфирования, связанного с периодическим входом в воду палубы при бортовой

качке низкобортного судна [5]. Тогда силы $F_{zД1}$ и $F_{zД2}$ (см. рис. 1) можно представить в виде [18]:

$$F_{zД1} = -2\Delta\tilde{N}_{z1}(D_{\zeta1}, D_{\dot{\zeta}1})\dot{\zeta}, \quad \dot{\zeta} > 0; \quad F_{zД1} = 0, \quad \dot{\zeta} < 0;$$

$$F_{zД2} = -2\Delta\tilde{N}_{z2}(D_{\zeta2}, D_{\dot{\zeta}2})\dot{\zeta}, \quad \dot{\zeta} > 0; \quad F_{zД2} = 0, \quad \dot{\zeta} < 0;$$

$$2\Delta\tilde{N}_{z1}(D_{\zeta1}, D_{\dot{\zeta}1}) = \frac{\rho\varepsilon_{П1}K_{P1}I_{11}(I_{21} - I_{31})\bar{s}_{M1}}{D_{\zeta1}};$$

$$2\Delta\tilde{N}_{z2}(D_{\zeta2}, D_{\dot{\zeta}2}) = \frac{\rho\varepsilon_{П2}K_{P2}I_{12}(I_{22} - I_{32})\bar{s}_{M2}}{D_{\zeta2}};$$

$$I_{11} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{\zeta1}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{\zeta}^2 |\dot{\zeta}| \exp\left(-\frac{\dot{\zeta}^2}{2D_{\zeta1}}\right) d\dot{\zeta} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} D_{\zeta1}^{1,5};$$

$$I_{21} = \sqrt{\frac{2}{\pi D_{\zeta1}}} \int_{\tilde{h}_{BK\min}}^{+\infty} \zeta \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2D_{\zeta1}}\right) d\zeta = \sqrt{\frac{2D_{\zeta1}}{\pi}} \exp\left(-\frac{u_1^2}{2}\right);$$

$$I_{31} = \tilde{h}_{BK\min} \sqrt{\frac{2}{\pi D_{\zeta1}}} \int_{\tilde{h}_{BK\min}}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2D_{\zeta1}}\right) d\zeta = \tilde{h}_{BK\min} [1 - 2\bar{\Phi}(u_1)];$$

$$I_{12} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{\zeta2}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{\zeta}^2 |\dot{\zeta}| \exp\left(-\frac{\dot{\zeta}^2}{2D_{\zeta2}}\right) d\dot{\zeta} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} D_{\zeta2}^{1,5};$$

$$I_{22} = \sqrt{\frac{2}{\pi D_{\zeta2}}} \int_{\tilde{h}_{BK\min}}^{+\infty} \zeta \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2D_{\zeta2}}\right) d\zeta = \sqrt{\frac{2D_{\zeta2}}{\pi}} \exp\left(-\frac{u_2^2}{2}\right);$$

$$I_{32} = h_{BK\min} \sqrt{\frac{2}{\pi D_{\zeta2}}} \int_{\tilde{h}_{BK\min}}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2D_{\zeta2}}\right) d\zeta =$$

$$= h_{BK\min} [1 - 2\bar{\Phi}(u_2)];$$

$$\bar{s}_{M1} = \frac{\bar{\lambda}}{2} \varphi_{\zeta}(u_1); \quad \bar{s}_{M2} = \frac{\bar{\lambda}}{2} \varphi_{\zeta}(u_2);$$

$$u_1 = \frac{\tilde{h}_{BK\min}}{(1 + \bar{\Delta}_{21})\sqrt{D_{\zeta1}}}; \quad u_2 = \frac{h_{BK\min}}{\kappa_{\zeta}(1 + \bar{\Delta}_{22})\sqrt{D_{\zeta1}}}; \quad \kappa_{\zeta} = \sqrt{\frac{D_{\zeta2}}{D_{\zeta1}}};$$

$$\tilde{h}_{BK\min} = h_{BK\min} - \Delta_1; \quad \varepsilon_{П1} = 0,5 \left(1,0 + \frac{1}{\sqrt{K_{P1}}}\right);$$

$$\varepsilon_{П2} = 0,5 \left(1,0 + \frac{1}{\sqrt{K_{P2}}}\right); \quad \varphi_{\zeta}(x) = [1 - 2\bar{\Phi}(x)] \exp\left(\frac{x^2}{2}\right);$$

$$\bar{\Phi}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy;$$

где $D_{\zeta1}$, $D_{\dot{\zeta}1}$ — дисперсии относительных перемещений и скоростей относительных перемещений в том сечении в носовой оконечности, где начина-

ется килевая линия соединительного моста; $D_{\zeta2}$, $D_{\dot{\zeta}2}$ — то же в сечении в кормовой оконечности, где заканчивается килевая линия соединительного моста; $\Delta\tilde{N}_{z1} = \Delta\tilde{N}_{z1}(D_{\zeta1}, D_{\dot{\zeta}1})$ — линеаризованный коэффициент вертикального демпфирования при входе носовой оконечности соединительного моста в воду; $\Delta\tilde{N}_{z2} = \Delta\tilde{N}_{z2}(D_{\zeta2}, D_{\dot{\zeta}2})$ — то же при входе кормовой оконечности соединительного моста в воду; $\varepsilon_{П1}$, $\varepsilon_{П2}$ — коэффициенты полноты площади эпюры продольного распределения гидродинамических давлений при ударах носовой и кормовой оконечностями соединительного моста соответственно [11]; K_{P1} , K_{P2} — коэффициенты ударных давлений при входе в воду носовой и кормовой оконечностей моста соответственно; $\zeta = \zeta(t)$, $\dot{\zeta} = \dot{\zeta}(t)$ — ординаты относительных перемещений и скоростей относительных перемещений от продольной качки; Δ_1 — статический подъем при продольной качке в носовой оконечности (в кормовой оконечности аналогичная величина принимается равной 0); $\bar{\Delta}_{21}$, $\bar{\Delta}_{22}$ — безразмерный динамический подъем при продольной качке в носовой и кормовой оконечностях; L , δ — длина катамарана и его коэффициент общей полноты; Fr — число Фруда по длине; l_M — длина соединительного моста; $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны; \bar{s}_{M1} — средняя в статистическом смысле длина вошедшей в воду носовой части «центрального носа» [6]; \bar{s}_{M2} — то же для кормовой части «центрального носа»; $\bar{\Phi}(x)$ — функция Лапласа от аргумента x .

Величины ζ , Δ_1 , $\bar{\Delta}_{21}$ и $\bar{\Delta}_{22}$ отсчитываются от КВЛ; они положительны выше КВЛ и отрицательны ниже КВЛ. Далее ограничимся более подробным описанием определения только величины $2\Delta\tilde{N}_{z1}(D_{\zeta1}, D_{\dot{\zeta}1})$ для погружения носовой оконечности моста. Такая же величина $2\Delta\tilde{N}_{z2}(D_{\zeta2}, D_{\dot{\zeta}2})$ для погружения кормовой оконечности моста находится аналогично. Нижние индексы «1» и «2» там, где это возможно, условимся опустить (в частности, вместо обозначений u_1 и u_2 будем применять обозначение u).

Для нахождения коэффициента $K_{P1} = K_P$, который определяется для поперечного сечения, отстоящего на $\bar{s}_M/3$ от начала килевой линии моста, введем в плоскости шпангоута волнорезного катамарана систему координат $\eta_0\zeta$, начало координат которых — в ДП катамарана на расстоянии $h_{BK\min}$ от КВЛ (см. рис. 1). В системе координат $\eta_0\zeta$ введем уравнение обвода моста $\eta_M = \eta_M(\zeta)$ — см. рис. 1.

Теперь указанный коэффициент будем искать из следующих соотношений:

$$K_P = K_{P0}(\gamma_M) K_q(\gamma_M) K_F(\gamma_M) \kappa_{FC};$$

$$K_{P0} = K'_{P0} = \kappa_s \pi \cdot \operatorname{tg} \gamma_M \left(\frac{\pi}{2\gamma_M} - 1 \right)^2$$

или $K_{P0} = K'_{P0} = \frac{\kappa_s \pi^3}{4 \operatorname{tg} \gamma_M} \left(1 - \frac{\gamma_M}{\pi} \right)^3$ — для круглоскулого «центрального носа»;

$K_{P0} = 2\kappa_s \{K'_{P0} \bar{\Phi}(u_3) + K''_{P0} [0,5 - \bar{\Phi}(u_3)]\}$ — для остро-
скулого «центрального носа»;

$$K''_{P0} = \frac{\sqrt{2B_\gamma}}{\sqrt[4]{\frac{\bar{\Delta}_M}{\tilde{y}_{CK}} - \frac{2}{\pi} \operatorname{tg} \gamma_M + \left[\frac{\sqrt{2\pi B_\gamma}(\gamma_M)}{2K'_{P0}} \right]^4}};$$

$K_q = 1 - \left(\frac{2\gamma_M}{\pi} \right)^{1,5}$ — для круглоскулого «центрально-
го носа»;

$K_q = 1 - \frac{1 - \cos \gamma_M}{2 - \cos \gamma_M}$ — для острокулого «центрального
носа»;

$$K_F \approx 1 - \frac{\operatorname{tg} Z_{SW}}{\operatorname{tg} \gamma_M}; \quad Z_{SW} = \phi_M + \Psi_X;$$

$$\Psi_X = 0,13 \left(0,01 + \frac{x_g}{L} \right) + 0,028 \sin(5,2Fr - 1,9);$$

$$\kappa_{FC} = 1,0, \quad Fr_{V1} \leq 1,0;$$

$$\kappa_{FC} = 1,0 + \kappa_{FM} \frac{Fr_{V1} - 1,0}{2}, \quad 1,0 \leq Fr_{V1} \leq 3,0;$$

$$\kappa_{FC} = \kappa_{FM}; \quad Fr_{V1} \geq 3,0;$$

$$\operatorname{tg} \gamma_M = \frac{\omega_M}{\eta_{M \max}^2}; \quad \omega_M = \int_0^{\zeta_{M \max}} \eta_M(\zeta) d\zeta; \quad \eta_{M \max} = \eta_M(\zeta_{M \max});$$

$$\zeta_{M \max} = \bar{\Delta}_M = \psi_\zeta(u) \sqrt{\frac{\pi}{2} D_\zeta}; \quad \psi_\zeta(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\varphi_\zeta(u)} - u \right) —$$

для круглоскулых обводов;

$$\zeta_{M \max} = \tilde{z}_{CK} \leq h_{BK \max} - h_{BK \min} — \text{для острокулых обводов};$$

$$\tilde{y}_{CK} = \frac{1}{\bar{s}_M} \int_0^{\bar{s}_{M1}} y_{CK}(x) dx; \quad \tilde{z}_{CK} = \frac{1}{\bar{s}_M} \int_0^{\bar{s}_{M1}} z_{CK}(x) dx;$$

$$\kappa_s = \cos \left(\frac{\pi}{3} \frac{2\eta_{M \max}}{\bar{s}_M} \right); \quad B_\gamma(\gamma_M) = \frac{2\pi}{4 + \pi} \sqrt{1 - \frac{2\gamma_M}{\pi}};$$

$$Fr_{V1} = \frac{v}{\sqrt{g^3 V_1}}.$$

Здесь γ_M — расчетный угол килеватости соединительного моста; K_{P0} — коэффициент ударных давлений, определенный по схеме Вагнера [7, 8]; K_F — поправка, учитывающая влияние продольной кривизны поверхности удара на силу удара [17]; K_q — поправка на наличие брызгообразования [1, 7]; κ_{FC} — поправка на продольное струйное обтекание [3]; κ_s — поправка на конечность длины удара [10]; Z_{SW} — угол соударения моста с водой в продольной плоскости на тихой воде; ϕ_M — угол между касательной к диаметральному батоксу «центрального носа» и следом основ-

ной плоскости в расчетном сечении; x_g — отстояние центра тяжести от миделя (положительное — в нос); Ψ_X — угол ходового дифферента; v, V_1 — скорость и объемное водоизмещение одного корпуса волно-резного катамарана; $\bar{\Delta}_M$ — среднее в статистическом смысле заглубление моста при продольной качке [4]; $y_{CK}(x)$ — отстояние слома скулы острокулого «центрального носа» от его ДП как функция положения расчетного сечения x ; $z_{CK}(x)$ — отстояние линии слома скулы от его килевой линии как функция положения расчетного сечения x .

Для носовой оконечности параметр $u_3 = u_{31} = \frac{\tilde{h}_{BK \min} - \Delta_1 + \tilde{z}_{CK}}{(1 + \bar{\Delta}_{21}) \sqrt{D_{\zeta 1}}}$ и для кормовой оконеч-

ности этот же параметр $u_3 = u_{32} = \frac{\tilde{h}_{BK \min} + \tilde{z}_{CK}}{(1 + \bar{\Delta}_{22}) \kappa_\zeta \sqrt{D_{\zeta 1}}}$.

Коэффициент κ_{FM} определяется по таблице в функции величины $K_{P^*} = K_{P0} K_q K_F$ [3].

Определение коэффициента κ_{FM}

K_{P^*}	> 14	12	10	< 8
κ_{FM}	2,5	1,5	1,2	1

На рис. 2 представлена графическая зависимость амплитуды безразмерной дополнительной вертикальной демпфирующей силы $F_{zД}$ от высоты волны 3%-й обеспеченности h_3 при различной обеспеченности P_D . Расчеты выполнялись при минимальном по ширине межкорпусного пространства вертикальном клиренсе $h_{BK \min} = 1,08$ м, что отвечает $\bar{h}_{BK \min} = \frac{h_{BK \min}}{L} = 0,0102$. При этом для случая входа в воду носовой оконечности принималось

$$F_{zД} = 2\Delta \tilde{N}_{zД} \sqrt{-2 \ln P_D D_{\zeta 0}}.$$

Расчет выполнялся для проектной проработки волнорезного катамарана водоизмещением $D = 2467$ т. Видно, что в условиях достаточно интенсивного волнения в сочетании с небольшой величиной параметра $\bar{h}_{BK \min}$ указанная сила может сравниться с весовым

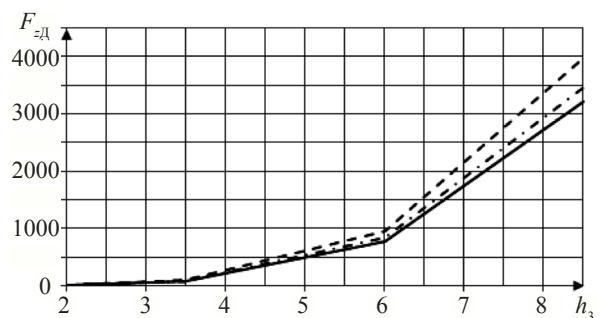


Рис. 2. Безразмерная дополнительная вертикальная демпфирующая сила при продольной качке волнорезного катамарана: — — — $P_D = 0,01$; - · - · - $0,02$; — — — $0,03$

водоизмещением волнорезного катамарана и даже пре-
взойти его. Этот результат согласуется с упомянуты-
ми в работе [16] данными натурных экспериментов.

Перейдем к рассмотрению дополнительных вос-
станавливающих сил и моментов. В отличие от демп-
фирующих сил и моментов эти величины остаются
линейными функциями линейных и угловых пере-
мещений при вертикальной и килевой качке соответ-
ственно. Средние приращения площади действующей
ватерлинии ΔS будут [2, 8]:

– для круглоскулых обводов

$$\Delta S \approx (1,4 - 1,6) \bar{s}_{M1} \eta_M (\bar{\Delta}_M);$$

– для остроскулых обводов

$$\Delta S \approx 4 \bar{s}_M \left\{ \frac{\bar{\Delta}_M}{\text{tg } \gamma_M} \bar{\Phi}(u_3) + \tilde{y}_{\text{СК}} [0,5 - \bar{\Phi}(u_3)] \right\}.$$

Средние приращения коэффициента продольной
остойчивости из-за входа в воду моста для обоих ти-
пов обводов [2, 8]:

$$\Delta K_{O\psi} = -\bar{F}_{zTC} \left\{ h_{\text{BK min}} + \frac{\bar{\Delta}_M}{4} - \frac{\bar{F}_{zTC}}{2\rho g(S + \Delta S)} - \frac{\rho g}{\bar{F}_{zTC}} \left[\bar{i}_{yF} + \Delta S \cdot l_X^2 \left(1 + \frac{\Delta S}{S + \Delta S} \right) \right] \right\};$$

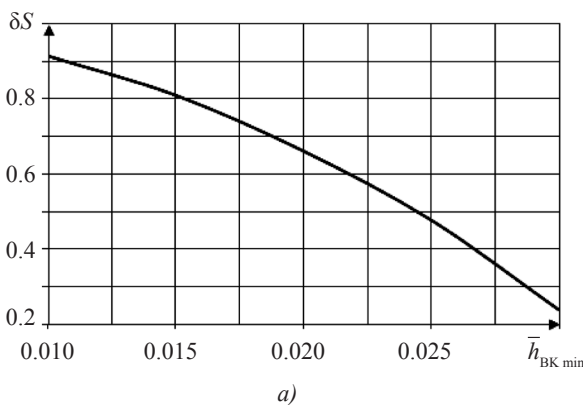
$$S = 2\alpha L B_1; \quad \bar{i}_{yF} \approx \frac{\bar{s}_M^3}{6} \frac{\bar{\Delta}_M}{\text{tg } \gamma_M};$$

$$\bar{F}_{zTC} \approx \rho g \bar{v}_M; \quad \bar{v}_M \approx \frac{1}{2} \bar{\Delta}_M \cdot \Delta S;$$

$$l_X = \frac{l_M}{2} - \frac{\bar{s}_{M1}}{2} - x_f - \Delta x_M \text{ — для носовой половины моста};$$

$$l_X = \frac{l_M}{2} - \frac{\bar{s}_{M2}}{2} + x_f + \Delta x_M \text{ — для кормовой половины моста}.$$

Здесь α — коэффициент полноты площади КВЛ;
 B_1 — ширина одного корпуса; S — площадь конструк-
тивной ватерлинии для обоих корпусов катамарана;



\bar{i}_{yF} — осредненный по процессу качки собственный
момент инерции дополнительной площади ватерли-
нии; ρ — плотность воды; x_f — абсцисса центра тяже-
сти площади ватерлинии (положительное направле-
ние оси x — в нос); F_{zTC} — дополнительная осредненная
по процессу качки гидростатическая сила, связанная
с входом моста в воду; Δx_M — горизонтальное про-
дольное смещение середины соединительного моста
относительно плоскости мидель-шпангоута для кор-
пусов, $\Delta x_M > 0$, если середина моста сдвинута в нос
от плоскости миделя, и $\Delta x_M < 0$ в противном случае.

В этих зависимостях, как и ранее, для но-
совой половины моста имеем $\bar{s}_M = \bar{s}_{M1}$, $\bar{\Delta}_M = \bar{\Delta}_{M1}$
и для кормовой половины моста $\bar{s}_M = \bar{s}_{M2}$, $\bar{\Delta}_M = \bar{\Delta}_{M2}$.
На рис. 3 приведены графические зависимости для

величин $\delta S = \frac{\Delta S}{S}$ (а) и $\delta K_{O\psi} = \frac{\Delta K_{O\psi}}{\rho g I_{yF}}$ (б) в функции па-

раметра $\bar{h}_{\text{BK min}} = \frac{h_{\text{BK min}}}{L}$, где $I_{yF} \approx \frac{\alpha^2 L^3 B_1}{6,65}$ — продоль-

ный момент инерции площади ватерлинии обоих кор-
пусов катамарана, а параметр $h_{\text{BK min}}$ отвечает рис. 1.
Расчеты выполнялись при интенсивности волнения,
характеризуемой высотой волны 3 %-й обеспеченно-
сти $h_3 = 6$ м.

Величины дополнительной присоединенной
массы при вертикальной качке $\Delta \lambda_z$ и дополнитель-
ного присоединенного момента инерции массы при
килевой качке $\Delta \lambda_\psi$, характеризующие ту часть до-
полнительных инерционных сил и моментов при
продольной качке, которая не связана с градиентом
присоединенных масс, с учетом соотношений [2, 8]
найдутся в виде

$$\Delta \lambda_z \approx K'_{p0} \frac{\rho \bar{v}_M}{2} \text{ — для круглоскулых обводов};$$

$\Delta \lambda_z = \rho \bar{v}_M \{ K'_{p0} \bar{\Phi}(u_3) + K''_{p0} [0,5 - \bar{\Phi}(u_3)] \}$ — для
остроскулых обводов;

$$\Delta \lambda_\psi \approx \Delta \lambda_z l_X^2; \quad K'''_{p0} = 1,07 \frac{\pi}{2} \left(1,0 - 2,19 \frac{\gamma_M}{\pi} \right) \left(1 - \frac{\gamma_M}{\pi} \right).$$

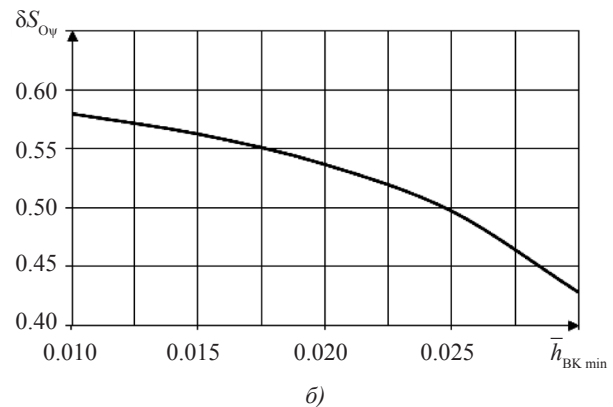


Рис. 3. Зависимости величин δS (а) и $\delta K_{O\psi}$ (б) от параметра $\bar{h}_{\text{BK min}}$

Пусть, далее, $n_z^{(0)}$ и $n_\psi^{(0)}$ — собственные частоты вертикальных и килевых колебаний без учета, а n_z и n_ψ — с учетом входа профилированной соединительной конструкции в воду. Тогда

$$n_z^{(0)} = \sqrt{\frac{\rho g S}{M + \lambda_z}}; \quad n_\psi^{(0)} \approx \sqrt{\frac{\rho g I_{yf}}{J_Y + \lambda_\psi}};$$

$$n_z = \sqrt{\frac{\rho g S(1 + \delta S)}{M + \lambda_z(1 + \delta \lambda_z)}}; \quad n_\psi \approx \sqrt{\frac{\rho g I_{yf}(1 + \delta K_{O\psi})}{J_Y + \lambda_\psi(1 + \delta \lambda_\psi)}};$$

$$\delta \lambda_z = \frac{\Delta \lambda_z}{\lambda_z}; \quad \delta \lambda_\psi = \frac{\Delta \lambda_\psi}{\lambda_\psi},$$

где M, J_Y — масса и собственный продольный момент инерции волнорезного катамарана; λ_z, λ_ψ — присоединенная масса при вертикальной качке и присоединенный момент инерции при килевой качке волнорезного катамарана без учета входа соединительного моста в воду.

Как следует из структуры приведенных выше расчетных формул, характер зависимостей величин $\delta \lambda_z$ и $\delta \lambda_\psi$ как от параметра $\bar{h}_{\text{БК min}}$, так и от угла γ_m качественно тот же, что и для величин δS и $\delta K_{O\psi}$. Это значит, что при входе соединительного моста в воду собственные частоты изменяются незначительно. В большинстве практически важных случаев допустимо принимать $n_y^{(0)} \approx n_y$ и $n_z^{(0)} \approx n_z$. А тогда получается, что изменения восстанавливающих и инерционных сил и моментов из-за входа в воду соединительного моста волнорезного катамарана не слишком сильно влияют на продольную качку. В то же время из-за входа в воду моста в уравнениях качки существенно изменяются демпфирующие силы, к которым добавляется та часть инерционных сил,

которая связана с градиентом присоединенных масс. Именно этот фактор оказывает основное влияние на продольную качку волнорезного катамарана.

ВЫВОДЫ

1. В работе предложены достаточно простые приближенные зависимости для определения дополнительных сил и моментов, обусловленных входом в воду профилированного соединительного моста волнорезного катамарана. Включение этих добавок в уравнения вертикальной и килевой качки дает возможность выполнить расчеты продольной качки волнорезного катамарана.

2. Сила инерционной природы, обусловленная градиентом присоединенных масс при входе в воду соединительного моста и прибавляемая к демпфирующим силам в уравнения вертикальной качки катамарана, на интенсивном волнении при достаточно низкой (но реальной) обеспеченности может достичь весового водоизмещения и даже превзойти его (см. рис. 2). Этот результат согласуется с приведенными в [16] данными натурных экспериментов.

3. В силу того что при входе в воду соединительной конструкции восстанавливающие и инерционные силы (моменты) изменяются примерно в одной пропорции, собственные частоты вертикальных и килевых колебаний при входе в воду профилированного соединительного моста изменяются слабо.

4. Определяющее влияние на связанное с входом соединительного моста в воду изменение характеристик продольной качки волнорезного катамарана оказывает дополнительный момент инерционной природы, связанный с градиентом присоединенных масс и прибавляемый в уравнениях килевой качки к демпфирующему моменту.

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] Герасимов, А. В. Расчет нерегулярной бортовой качки стабилизированного судна при выходе бортовых управляемых рулей на ограничители [Текст] / А. В. Герасимов // Судостроение. — 1971. — № 6. — С. 5–7.
- [3] Запольский, В. В. Определение гидродинамических нагрузок, действующих на корпус скоростного судна [Текст] / В. В. Запольский // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. — Л. : ЦНИИ «Румб», 1984. — Вып. 40.
- [4] Кондриков, Д. В. Численная оценка заливаемости по ряду показателей [Текст] / Д. В. Кондриков // Труды ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1973. — Вып. 182. — С. 61–73.
- [5] Кондриков, Д. В. К расчету бортовой качки судна при произвольном курсовом угле к волне [Текст] / Д. В. Кондриков // Труды ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1977. — Вып. 221. — С. 7–21.
- [6] Кондриков, Д. В. Оценка слеминга с позиций ограничения ускорений удара [Текст] / Д. В. Кондриков // Архитектурно-конструктивный тип, мореходные и ледовые качества судов : сб. науч. трудов ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1989. — С. 94–100.
- [7] Логвинович, Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами [Текст] / Г. В. Логвинович. — К. : Наукова думка, 1969. — 210 с.

- [8] Лукашевич, А.Б. Численное решение задачи о продольном движении судна на подводных крыльях на регулярном волнении с учетом ударов корпуса о воду [Текст] / А.Б. Лукашевич, А.В. Скафтымов // Сб. НТО им. акад. А.Н. Крылова. — Л. : Судостроение, 1976. — Вып. 242. — С. 162–177.
- [9] Методика определения изгибающего момента при ударе волн в развал бортов // Сб. нормативно-методических материалов Регистра СССР. — М.: В/О Мортехинформреклама, 1986. — Кн. 4. — С. 7–19.
- [10] Платонов, В.Г. Экспериментальное исследование влияния удлинения тела на гидродинамические давления при ударе его о воду [Текст] / В.Г. Платонов // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. — Л. : ЦНИИ «Румб», 1981. — Вып. 27. — С. 101–105.
- [11] Путов, Н.Е. Проектирование конструкций корпуса морских судов [Текст] / Н.Е. Путов. — Л. : Судостроение, 1977. — Ч. 2. — 424 с.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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 : Черномор. межобл. правление НТО им. акад. А.Н. Крылова, 1989. — С. 34–39.
- [15] Сухир, Э.Л. Уравнения движения в жидкости тела изменяющейся формы и их приложение к продольной качке судна на волнении [Текст] / Э.Л. Сухир // Судостроение и морские сооружения : респ. Межвед. науч.-техн. сборник. — Х. : ХГУ, 1966. — Вып. 2. — С. 20–24.
- [16] Foxwell, D. Advanced Hull Forms Break the Conventional Mould [Text] / D. Foxwell, R. Scott // Jane's Navy International. — 2003. — Vol. 108, nr 3.
- [17] Milwitzky, B.A. Generalized Theoretical and Experimental Investigation of the Motions and Hydrodynamic Loads, Experienced by V-Bottom Seaplanes During Step-Landing Impacts [Text] / B.A. Milwitzky // NACA Technical Notes. — Washington, 1948. — Nr 1516. — 22 p.
- [18] 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. Кудінова

Надійшла до редколегії 11.05.2012

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

Статтю розміщено у Віснику НУК №3, 2012