

DOI 10.15589/jnn20150501

УДК 629.5.022.25

С60

**ENGINEERING ESTIMATE OF ROLL AMPLITUDES
OF SMALL WATERPLANE AREA VESSELS IN MAIN RESONANCE MODE****ПРОЕКТНАЯ ОЦЕНКА АМПЛИТУД
БОРТОВОЙ КАЧКИ СУДОВ С МАЛОЙ ПЛОЩАДЬЮ ВАТЕРЛИНИИ
В РЕЖИМЕ ОСНОВНОГО РЕЗОНАНСА****Oleh I. Solomentsev**

solomen@mksat.net

ORCID: 0000-0002-5106-6486

Liliia Yu. Kondratieva

muschil@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2788-9116

О. И. Соломенцев

д-р техн. наук, проф.

Л. Ю. Кондратьева

асп.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. A simple approximate method for estimating the roll amplitudes in irregular beam waves for small waterplane area twin hull vessels (SWATH) has been developed in the article. There are considered two SWATH types: with struts along all vessel (SWATH type A) and with struts on the bow and stern ends of the vessel (SWATH type B). Roll periods and frequencies for both types of SWATH's were calculated according to the known empirical data. It was taken into account that intensive parametric (subharmonic) roll of SWATH may be excluded by selecting the appropriate SWATH main elements. Corrective coefficients for the wave exciting moment, which take into account not only finite length of waves compared with the SWATH dimensions, but also diffraction part of the exciting moment, were calculated according to the relative motion method. The wave roll damping non-dimensional coefficient was found with the help of the Haskind-Newman relation. The viscous roll damping was determined using the experimental data with the second statistic linearization method. For the more exact determination of the ordinate of the roll amplitude and frequency characteristic in the first resonance mode, it was necessary to consider the damping step connected with the added masses gradient when one of the hulls came out of water. Dispersions of the SWATH (both types) roll in the main resonance mode were determined.

Keywords: small waterplane area twin hull vessel; roll; Haskind–Newman relation; relative motion method.

Аннотация. Получены практические приближённые зависимости для определения дисперсии бортовой качки СМПВ в режиме основного резонанса. Использовались разделение волнового возмущения на главную и дифракционную части, а также соотношение Хаскинда–Ньюмана для расчёта.

Ключевые слова: судно с малой площадью ватерлинии; бортовая качка; соотношение Хаскинда–Ньюмана для плоской задачи; метод относительного движения.

Анотація. Отримані практичні наближені залежності для визначення дисперсії бортової хитавиці СМПВ в умовах основного резонансу. Використовувалися розділення хвильового збурення на головну та дифракційну частини, а також співвідношення Хаскінда–Н'юмана для плоскої задачі.

Ключові слова: судно з малою площею ватерлінії; бортова хитавиця; співвідношення Хаскінда–Н'юмана для плоскої задачі; метод відносного руху.

REFERENCES

- [1] Batuev A. D. *Koeffitsient soprotivleniya, prisoedinenny moment inertsi i vozmushchayushchiy moment tsilindricheskogo katamarana s bolshim klirensom* [Coefficient of resistance, added mass moment of inertia and exciting moment of cylindrical catamaran with a large clearance]. *Trudy KTIRPiKH — Proceedings KTIRPiH*, 1972, issue 44, pp. 50–60.
- [2] Batuev A. D. *K vyboru glavnykh razmereniy promyslovykh katamaranov s uchetom bortovoy kachki* [On the selection of the main dimensions of fishing catamarans considering the roll]. *Trudy KTIRPiKH — Proceedings KTIRPiH*, 1975, issue 59, pp. 96–103.

- [3] Batuev A. D. *Raschetnaya otsenka kazhushchegosya krena sudna s maloy ploshchadyu vaterlinii* [Estimation of the seeming heel of small waterplane area vessel]. *Trudy KTIRPiKH — Proceedings KTIRPiKH*, 1981, issue 93, pp. 30–38.
- [4] Boyko A. P. *Osobennosti resheniya zadachi proektirovaniya sudna s maloy ploshchadyu vaterlinii* [Specific features of solving the problem of designing a vessel with small waterplane area]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2009, no. 2, pp. 10–17.
- [5] Kovalenko B. P. *Vliyanie formy shpangoutov na parametry kachki* [Influence of the shape of frame on the parameters of roll]. *Trudy TSNII morskogo flota — Proceedings of the Central Research Institute of the Marine Fleet*, 1973, issue 182, pp. 98–105.
- [6] Orlov Yu. F., Ukrainskiy B. S., Popov I. F. *Reduktsionnye koeffitsienty k glavnoy chasti vozmushchayushchey sily bortovoy i poperechno-gorizontальной kachki pontonov pryamougolnoy i tsilindricheskoy formy* [Reduction coefficients to the main part of the exciting force board and transverse-horizontal roll of pontoons of rectangular and cylindrical form]. *Trudy GIIVT — Proceedings GIIVT*, 1974, issue 133, part 2, pp. 20–38.
- [7] Boroday I. K., Vilenskiy G. V., Morenschildt V. A. *Prikladnye zadachi dinamiki sudov na volnenii* [Applied problems of the dynamics of vessels in waves]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989. 262 p.
- [8] Rakhmanin N. N., Prytkov Yu. K. *Kachka polupogruzhennykh burovykh platform* [Roll of submerged drilling platforms]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978, pp. 97–105.
- [9] Sevastyanov N. B. *Ostoychivost promyslovykh sudov* [Stability of fishing vessels]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1970. 200 p.
- [10] Solomentsev O. I. *O dvukh metodakh rascheta bortovoy kachki katamarana* [On two methods of calculating the catamaran roll]. *Nauchno-tehnicheskii sbornik Registra SSSR — Scientific and Technical Collection of USSR Register*, Leningrad, Transport Publ., 1986, issue 15, pp. 10–20.
- [11] Solomentsev O. I. *O strukture differentsialnykh uravneniy vertikalnoy i bortovoy kachki SMPV s nelineynym dempfirovaniem* [On the structure of differential equations of heaving and roll of SWATH with nonlinear damping]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*, 2011, pp. 141–150.
- [12] Solomentsev O. I., Telyaga L. S. *Nelineynoe dempfirovanie intensivnoy bortovoy kachki katamarana i sudna s auttriggerami* [Nonlinear damping of intensive roll of the catamaran and the vessel with outriggers]. *Zb. nauk. prats NUK — Collection of scientific publications of NUS*. Nikolaev, NUK Publ., 2011, issue 4, pp. 3–14.
- [13] Shaposhnikov V. M. *Metod rascheta volnovykh nagruzok, deystvuyushchikh na dvukhkorpusnye suda s maloy ploshchadyu vaterlinii (SMPV)* [Method of calculation of wave loads acting on the vessels small waterplane area twin hull (SWATH)]. *Sbornik NTO im. akad. A.N. Krylova — Collection of STS named after academician A. N. Krylov*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989, issue 465, pp. 58–71.
- [14] Shevelev G. G. *O yavlenii subgarmonicheskoy bortovoy kachki dvukhkorpusnogo sudna s maloy ploshchadyu vaterlinii* [On phenomenon of subharmonic roll of the small waterplane area twin hull vessel]. *Sbornik NTO im. akad. A.N. Krylova — Collection of STS named after academician A.N. Krylov*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978, issue 278, pp. 56–66.
- [15] Murtedjo M., Djatmiko E.D. Prediction of Motion Characteristics of SWATH Type Floating Structure Using Two Dimensional Frank Close-fit Technique, *Jurnal Mekanikal*, 2004, issue 18, pp. 46–65.
- [16] Numata E. Experimental Study of SWATH Model Rolling in Beam Waves, Davidson Laboratory, *Report SIT-DL-81-9-2200*, Hoboken, 1981. 34 p.
- [17] Rathje H., Schellin T.E. Dependence of SWATH Ship response on Waves on Choice of Viscous Coefficients, *11th International Workshop of Water Waves and Floating Bodies*, Hamburg, 1996. 4 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В процессе выбора главных элементов судов с малой площадью ватерлинии (СМПВ) необходимо учитывать влияние принимаемых проектных решений на динамику судна на волнении, в частности на амплитуды бортовой качки. Корпуса судов СМПВ состоят из трех конструктивных частей: палуба — платформа, стойки и подводные корпуса, что в несколько раз увеличивает число параметров судна и значительно усложняет расчет их динамики на волнении. Поэтому

актуальной представляется разработка достаточно простой приближенной методики расчёта бортовой качки на реальном нерегулярном волнении в положении лагом к волнам, которое соответствует аварийному состоянию судна, потерявшего ход в условиях волнения.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В работах [7, 15, 17] рассмотрены схемы расчёта бортовой качки СМПВ, не рассчитанные на начальные стадии проектирования, в работах [15–17] содержатся

соответствующие экспериментальные данные. В [2] содержится приближённая схема расчёта характеристик бортовой качки, которая, однако, пригодна только для катамаранов с обычными обводами. В работах [2, 12] отмечен быстрый рост демпфирования бортовой качки двухкорпусных судов при выходе одного из корпусов из воды.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка приближённой методики для расчёта бортовой качки судов с малой площадью ватерлинии в режиме основного резонанса в положении лагом к набегающим нерегулярным волнам.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Условимся далее различать такие две разновидности СМПВ (см. рис. 1):

– СМПВ типа А, с одной длинной стойкой по всей длине судна;

– СМПВ типа В, с двумя короткими (по сравнению с длиной погруженного корпуса) стойками в оконечностях.

В данной работе мы не будем учитывать влияния пассивных и активных успокоителей бортовой качки. Этот вопрос, весьма существенный применительно к СМПВ, должен быть рассмотрен отдельно. Будем также предполагать, что СМПВ не имеет хода и расположено лагом к волнам как условие аварийного положения судна на волнении при потере хода и управляемости.

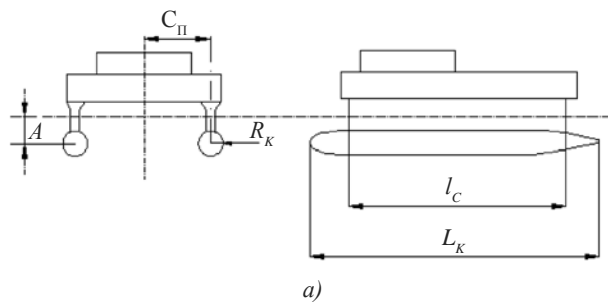
Предполагается, что погруженные корпуса моделируются горизонтальными круговыми цилиндрами, а стойки — вертикальными эллиптическими цилиндрами типа тонких крыльев. Схематизированные таким образом погруженные корпуса будут иметь

условный радиус $R_K = \sqrt{\frac{V_K}{\pi \cdot l_K}}$, где l_K , V_K — длина и объём погруженного корпуса СМПВ.

Дисперсия бортовой качки СМПВ обоих типов на нерегулярном волнении определяется формулой:

$$D_\theta = D_{\theta 1} + D_{\theta 2} + 2K_{\theta 12}, \quad (1)$$

где дисперсия $D_{\theta 1}$ соответствует основному резонансу, а дисперсия $D_{\theta 2}$ соответствует параметрическому (субгармоническому) резонансу.



Для СМПВ типа В отсутствуют условия для формирования параметрического резонанса и поэтому $D_{\theta 2} = 0$ исходя из [13], тогда как для СМПВ типа А без хода эта величина иногда оказывается значительной. Согласно работе [6], условие возникновения параметрической бортовой качки СМПВ типа А определяется экспериментально установленным соотношением вида:

$$\omega_1 = (2,0 - 2,2) n_\theta, \quad (2)$$

где n_θ — частота собственных бортовых колебаний СМПВ, определяемая по [6, 14]; ω_1 — частота первого тона колебаний воды в объёме между корпусами, когда этот объём условно рассматривается как замкнутое снизу, по бортам пространство [7].

Однако при выборе главных элементов СМПВ типа А рекомендуется избегать соотношения (2), так что и в этом случае параметрическая бортовая качка будет отсутствовать и дисперсия в формуле (2) будет определяться только бортовой качкой СМПВ в основном резонансе с дисперсией $D_{\theta 1}$.

Для определения дисперсии бортовой качки СМПВ известны общие зависимости вида [9]:

$$\left. \begin{aligned} D_{\theta 1} &= \int_0^\infty |\Phi_\theta(\omega)|^2 S_r(\omega) d\omega; \\ |\Phi_\theta(\omega)| &= k \frac{\theta_0(\omega)}{\alpha_0}; \\ \frac{\theta_0(\omega)}{\alpha_0} &= \frac{\kappa_{\theta\Sigma}(\omega) n_\theta^2}{\sqrt{(n_\theta^2 - \omega^2)^2 + 4\mu_{\theta\Sigma}(\omega)^2 n_\theta^2 \omega^2}}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где ω , $k = \omega^2/g$ — частота и волновое число элементарной гармонике нерегулярного волнения; $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения; $\frac{\theta_0(\omega)}{\alpha_0}$, $|\Phi_\theta(\omega)|$ — амплитудно-частотная характеристика и передаточная функция бортовой качки; $S_r(\omega)$ — спектральная плотность волнения; $\kappa_{\theta\Sigma} = \kappa_{\theta H} \kappa_{\theta V}$ — полный поправочный коэффициент к возмущающему моменту при бортовой качке, учитывающий как конечность размеров СМПВ по сравнению с длиной набегающих волн, так и отличие от нуля дифракци-

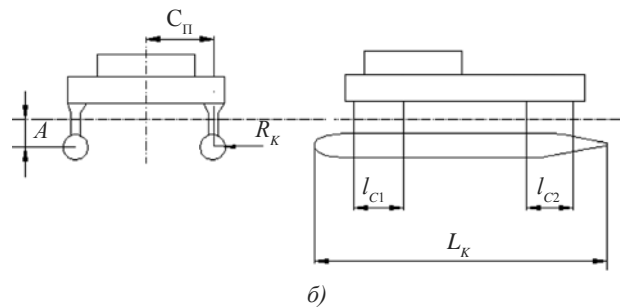


Рис. 1. СМПВ типа А (а) и СМПВ типа В (б)

онной части возмущающего момента; $\kappa_{\Sigma\theta W}(\omega)$ — составляющая коэффициентов, определенная без учёта влияния вязкого демпфирования на демпфирующую составляющую дифракционной части возмущающего момента [12]; $\kappa_{\theta V}$ — поправка, учитывающая влияние вязкого демпфирования; $\mu_{\theta\Sigma} = \mu_{\theta W} + \hat{\mu}_{\theta V}$ — безразмерный коэффициент линейного демпфирования при бортовой качке СМПВ; $\mu_{\theta W}(\omega)$ — волновая (линейная) составляющая безразмерного коэффициента демпфирования; $\hat{\mu}_{\theta V}$ — вязкая (линеаризованная) составляющая безразмерного коэффициента линейного демпфирования [11].

Для нахождения дисперсии $D_{\theta 1}$ можно также использовать приближённую зависимость [9]:

$$D_{\theta 1} = \frac{\pi}{g^2} \frac{\kappa_{\theta\Sigma}^{*2} n_{\theta}^5}{4\mu_{\theta\Sigma}^*} S_r^* = \frac{\pi}{4\mu_{\theta\Sigma}} k_{\theta}^2 \kappa_{\theta\Sigma}^{*2} n_{\theta} S_r^*; \quad (4)$$

$$k_{\theta} = \frac{n_{\theta}^2}{g}; \quad \kappa_{\theta\Sigma}^* = \kappa_{\theta\Sigma W}^* \kappa_{\theta V}^*; \quad \mu_{\theta\Sigma}^* = \mu_{\theta W}^* + \hat{\mu}_{\theta V}^*,$$

где все величины с индексом «*» имеют тот же смысл, что и в формуле (3), но вычисляются при резонансной частоте.

Определение связанных с вязкими эффектами величин $\kappa_{\theta V}$ и $\hat{\mu}_{\theta V}$ было рассмотрено в нашей предшествующей работе [12], а определение связанных с волновыми эффектами величин $\kappa_{\Sigma\theta W}$ и $\mu_{\theta W}$ мы и рассмотрим в данной работе, используя для этой цели некоторые результаты работ [1, 3, 5, 6–8, 10].

В частности, для определения размерного $N_{\theta W}$ и безразмерного $\mu_{\theta W}$ коэффициентов волнового демпфирования как для СМПВ обоих типов мы применим соотношение Хаскинда-Ньюмана [1, 9]. Здесь следует учитывать, что, хотя для взятых по отдельности двух составляющих контура шпангоута СМПВ типа А (прямоугольника и круга) определение коэффициентов демпфирования и не представляет затруднений [7], фактический коэффициент демпфирования контура шпангоута СМПВ типа А в сечении по стойке существенно отличается от суммы указанных коэффициентов для прямоугольника (стойка) и для круга (погруженный корпус) [14].

Обозначим далее расчетные величины для СМПВ типа А одним штрихом, например, $\kappa_{\theta\Sigma} = \kappa'_{\theta\Sigma}$, а для СМПВ типа В двумя штрихами и определим полный поправочный коэффициент $\kappa_{\theta\Sigma W}$ исходя из работ [5, 6–8], соотношениями вида:

$$\kappa'_{\theta\Sigma W} = \sqrt{\left(\kappa_{\theta GL} - \frac{\omega^2}{n_{\theta}^2} \frac{q_{\theta}}{1+q_{\theta}} \kappa_{\theta IN} \right)^2 + 4\mu_{\theta W}^2 \kappa_{\theta D}^2} \approx \kappa_{\theta GL} - \frac{\omega^2}{n_{\theta}^2} \frac{q_{\theta}}{1+q_{\theta}} \kappa_{\theta IN}; \quad (5)$$

где величины $\kappa_{\theta GL}$ и $\kappa_{\theta IN}$ равны:

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{\theta GL} &= \frac{r_{\Pi}}{h} \cdot \frac{\sin kC_{\Pi}}{kC_{\Pi}} \bar{\kappa}_{zGL} + \left(1 - \frac{r_{\Pi}}{h}\right) \bar{\kappa}_{\theta GL} \cos kC_{\Pi}; \\ \kappa_{\theta IN} &= \frac{r_{\Pi}}{r} \frac{\sin kC_{\Pi}}{kC_{\Pi}} \bar{\kappa}_{zIN} + \frac{r_C}{r} \bar{\kappa}_{\theta IN} \cos kC_{\Pi}; \end{aligned} \right\} (6)$$

В формулах (5) и (6) редуцированные коэффициенты $\kappa_{\theta D}$, $\bar{\kappa}_{zGL}$ и $\bar{\kappa}_{\theta GL}$ определяются зависимостями, полученными в работе [5]:

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{\theta D} &= \frac{r_{\Pi}}{r} \frac{\sin kC_{\Pi}}{kC_{\Pi}} \bar{\kappa}_{zD} + \frac{r_C}{r} \bar{\kappa}_{\theta D} \cos kC_{\Pi}; \\ \bar{\kappa}_{zGL} &= \exp(-kA) \frac{2 \sin \frac{kb_C}{2}}{kb_C} - \frac{2R_K}{b_C} \exp(-kA) \times \\ &\times \int_{\theta_z}^{\pi-\theta_z} \frac{\cos(kR_K \sin \theta_z) \cos \theta_z d\theta_z}{\exp(-kR_K \cos \theta_z)}; \\ \bar{\kappa}_{\theta GL} &= 1 - kA \exp(-kA) - \frac{1}{16R_K^4} \times \\ &\times \int_0^{R_K} \varphi_R^3(z) \exp(-k(A+z)) dz; \\ \varphi_R(z) &= \sqrt{R_K^2 - (R_K - z)^2}. \end{aligned} \right\} (7)$$

Остальные редуцированные коэффициенты можно приближенно принять равными: $\bar{\kappa}_{zIN} \approx \bar{\kappa}_{zD} \approx \bar{\kappa}_{zGL}$, $\bar{\kappa}_{\theta IN} \approx \bar{\kappa}_{\theta D} \approx \bar{\kappa}_{\theta GL}$ без существенных потерь точности в конечном результате согласно [5].

Также были рассчитаны следующие характеристики устойчивости, необходимые для расчета полного поправочного коэффициента:

$$\left. \begin{aligned} r_{\Pi} &= \frac{\alpha_C l_C b_C C_{\Pi}^2}{V_1}; \quad r_C = \frac{\alpha_C^2 l_C b_C^3}{V_1}; \quad r = r_{\Pi} + r_C; \\ h &= r + z_c - z_g; \\ z_c &= \frac{(V_1 - V_K) \frac{A}{2} + V_K A}{V_1}; \quad V_1 = \frac{V}{2}; \\ \sin \theta_z &= b_C / 2R_K. \end{aligned} \right\} (8)$$

В приведенных выше формулах (5)–(7) обозначено: $\kappa_{\theta GL}$ — редуцированный коэффициент к главной части возмущающего момента при бортовой качке СМПВ [8, 10]; $\kappa_{\theta IN}$, $\kappa_{\theta D}$ — редуцированные коэффициенты к инерционной и демпфирующей составляющим дифракционной части возмущающего момента при бортовой качке СМПВ [10]; $\bar{\kappa}_{zGL}$ — редуцированный коэффициент к главной части возмущающей силы при вертикальной качке бокового корпуса СМПВ типа А (стойка и погруженный корпус) как однокорпусного судна [5, 6]; $\bar{\kappa}_{\theta IN}$, $\bar{\kappa}_{\theta D}$ — редуцированные коэффици-

енты к инерционной и демпфирующей составляющим дифракционной части возмущающей силы при вертикальной качке бокового корпуса СМПВ типа А (стойка и погруженный корпус) как однокорпусного судна; $\bar{\kappa}_{z\text{ИН}}$, $\bar{\kappa}_{z\text{Д}}$ — редуционные коэффициенты к инерционной и демпфирующей составляющим дифракционной части возмущающего момента при бортовой качке бокового корпуса СМПВ типа А (стойка и погруженный корпус) как однокорпусного судна; l_c , b_c — длина и наибольшая ширина стойки СМПВ типа А; α_c — коэффициент полноты КВЛ; r — начальный поперечный метацентрический радиус; $r_{\text{П}}$, r_c — переносная и собственная составляющие начального поперечного метацентрического радиуса; z_c , z_g — аппликаты центра величины и центра тяжести СМПВ; V — объёмное водоизмещение СМПВ; h — начальная поперечная метацентрическая высота СМПВ; A — глубина погружения оси погруженных корпусов под воду; $C_{\text{П}}$ — расстояние между ДП погруженного корпуса (стойки) и ДП СМПВ в целом.

Из соотношения (5) можно вывести ряд частных случаев. Так, пусть длина набегающих волн бесконечно велика и $k \rightarrow 0$, тогда $\kappa'_{\theta\Sigma W} \rightarrow 1$. Наконец, для катамаранов с обычными обводами приближённо справедливы соотношения $r_{\text{П}} \approx r$, $r_c \ll r$, и тогда формула (5) для всего частотного диапазона приводится к виду:

$$\kappa'_{\theta\Sigma W} \approx \bar{\kappa}'_{z\Sigma} \frac{\sin kC_{\text{П}}}{kC_{\text{П}}}; \quad (9)$$

$$\bar{\kappa}'_{z\Sigma} \approx \bar{\kappa}_{z\text{ГЛ}} - \bar{\kappa}_{z\text{ИН}} \frac{\omega^2}{n_z^2} \cdot \frac{q_z}{1+q_z}; \quad q_z = \frac{\lambda_{z1}}{M_1},$$

где $\bar{\kappa}'_{z\Sigma}$ — полный поправочный коэффициент для корпуса СМПВ типа А при вертикальной качке как для однокорпусного судна; n_z — частота собственных вертикальных колебаний СМПВ; M_1 , λ_{z1} — масса и присоединённая масса одного корпуса СМПВ типа А при вертикальной качке.

На рис. 2 приведен рассчитанный по соотношению (5) и по упрощенным формулам (9) график

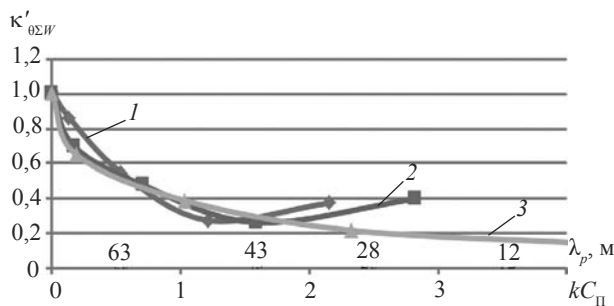


Рис. 2. Зависимость полного поправочного коэффициента $\kappa'_{\theta\Sigma W}$ от частотного параметра $kC_{\text{П}}$ при варьировании отношения $A/C_{\text{П}}$ для СМПВ типа А; λ_p — длина волны: 1 — $A/C_{\text{П}} = 0,75$; 2 — $A/C_{\text{П}} = 0,65$; 3 — $A/C_{\text{П}} = 0,55$

зависимости полного поправочного коэффициента $\kappa'_{\theta\Sigma W}$ для СМПВ типа А в функции величины $kC_{\text{П}}$ при параметре $A/C_{\text{П}}$.

Аналогичные графики (которые здесь не приводятся) построены и для всех остальных (промежуточных) редуционных коэффициентов, в функции которых по приведенным выше зависимостям вычисляется полный поправочный коэффициент.

При этом оказалось, что промежуточные редуционные коэффициенты $\bar{\kappa}_{z\text{ГЛ}}$, $\bar{\kappa}_{\theta\text{Д}}$, $\bar{\kappa}_{\theta\text{ГЛ}}$ практически не зависят от величины отношения $A/C_{\text{П}}$, а на графике полного поправочного коэффициента $\kappa'_{\theta\Sigma W}(kC_{\text{П}})$ появляется, в отличие от судов с традиционными обводами, участок возрастания этого коэффициента с уменьшением длины волны λ_p . Такой же эффект имеет место и для промежуточного редуционного коэффициента $\kappa_{\theta\text{ГЛ}} = \kappa_{\theta\text{ГЛ}}(kC_{\text{П}})$.

По физическому смыслу появление такого участка связано с наличием особенностей обводов СМПВ в подводной части [5]. В то же время степень этого возрастания тем меньше, чем меньше параметр $A/C_{\text{П}}$. Таким образом, по результатам расчетов получается, что чем больше расстояние между корпусами СМПВ, характеризующее величиной $C_{\text{П}}$, тем в меньшей степени местные особенности формы погруженных корпусов и стоек СМПВ влияют как на редуционные коэффициенты, так и на полный поправочный коэффициент.

Безразмерный коэффициент волнового демпфирования СМПВ типа А при бортовой качке $\mu'_{\theta W}$ определяется с использованием соотношения Хаскинда-Ньюмана [9]:

$$\kappa'_{\theta\Sigma W} \rho g k h V = \sqrt{2N'_{\theta W} \frac{\rho g^2}{\omega} l'_{\text{ПР}}}; \quad (10)$$

$$2N'_{\theta W} = -\frac{M_{\text{ДВ}\theta}}{\dot{\theta}}; \quad l'_{\text{ПР}} = \frac{2}{V} (l_K V_K + l_C V_C),$$

где $N'_{\theta W}$ — размерный коэффициент линейного демпфирования при бортовой качке СМПВ типа А; $M_{\text{ДВ}\theta}$ — волновой демпфирующий момент; $\dot{\theta}$ — ордината угловой скорости при бортовой качке СМПВ; $l'_{\text{ПР}}$ — приведенная длина для СМПВ типа А.

Тогда, принимая во внимание, что $\mu'_{\theta W} = \frac{N'_{\theta W}}{\rho V r_{X^*}^2 n_{\theta}}$, после очевидных преобразований находим безразмерный коэффициент волнового демпфирования $\mu'_{\theta W}$ в виде:

$$\mu'_{\theta W} = \frac{\kappa_{\theta\Sigma W}^2 (kh)^2 V}{2r_{X^*}^2 l'_{\text{ПР}}} \cdot \frac{\omega}{n_{\theta}}, \quad \text{где } r'_{X^*} = r_{X^*}. \quad (7)$$

Очевидно, что безразмерный коэффициент волнового демпфирования достигает максимума при минимальных длинах волн (см. рис. 3). В тоже время с увеличением параметра СП увеличивается и величина $\mu'_{\theta W}$

Определяя полный поправочный коэффициент $\kappa''_{\Sigma\theta W}$ для СМПВ типа В, воспользуемся соотношением из работы [3]:

$$\kappa''_{\theta\Sigma W} = \exp(-kA) \cdot \frac{\sin kC_{II}}{kC_{II}} |1 - ckC_{II}|;$$

$$c = \frac{2 \left(V_K + \frac{\lambda_{zK}}{\rho} \right)}{V} \cdot \frac{C_{II}}{h}; \quad \lambda_{zK} = a_{zK} \rho \pi R_K^2 l_K,$$

где λ_{zK} — присоединённая масса погруженного корпуса в составе СМПВ типа В при вертикальных колебаниях, а $a_{zK} \approx 1,3$ [3].

На участке длин волн от ∞ до 63 м полный поправочный коэффициент резко уменьшается (см. рис. 4), затем на интервале от 63 м до 28 м достигает максимума (не берем во внимание исходную точку), после чего падает до 0 при длине волны 15–12 м. Отмечается также сглаживание экстремумов при увеличении параметра C_{II} .

Безразмерный коэффициент линейного волнового демпфирования для СМПВ типа В $\mu''_{\theta W}$ будем искать на основе формулы (10), в которой приведенная длина стойки определялась в виде:

$$l''_{пр} = \frac{2}{V} (V_K l_K + V_{C1} l_{C1} + V_{C2} l_{C2}),$$

где l_{C1}, l_{C2} — длины носовой и кормовой стоек СМПВ типа В с погруженными объемами V_{C1}, V_{C2} .

Тогда аналогично расчётная зависимость для безразмерного коэффициента линейного (волнового) демпфирования $\mu''_{\theta W}$ СМПВ типа В при частоте внешнего возмущения, равной $\omega = \sqrt{gk}$, равна:

$$\mu''_{\theta W} = \frac{\kappa''_{\theta\Sigma W} (kh)^2 V}{2r_{X*}^2 l''_{пр}} \cdot \frac{\omega}{n_{\theta}}. \quad (9)$$

Из рис. 5 можно сделать вывод, что особенности формы имеют тем меньшее влияние на коэффициент волнового демпфирования и на полный поправочный коэффициент, чем больше параметр C_{II} . График на рис. 5 имеет ярко выраженный максимум в зоне длин волн от 50 м до 30 м.

Таким образом, зная величины полных поправочных коэффициентов и коэффициентов волнового демпфирования для СМПВ типов А и В и учтя дополнительно в соответствии с работой [11] влияние вязких составляющих коэффициентов демпфирования СМПВ на бортовую качку, по формуле (3) можно рассчитать АЧХ бортовой качки СМПВ обоих типов на лаговом регулярном волнении при отсутствии хода и успокоителей бортовой качки (рис. 6).

Как видно, в резонансных условиях при $\omega = n_{\theta}$ АЧХ $\left(\frac{\theta_0(n_{\theta})}{\alpha_0} \right)_{рез}$ имеет порядок нескольких десятков. При этом учёт вязкого демпфирования

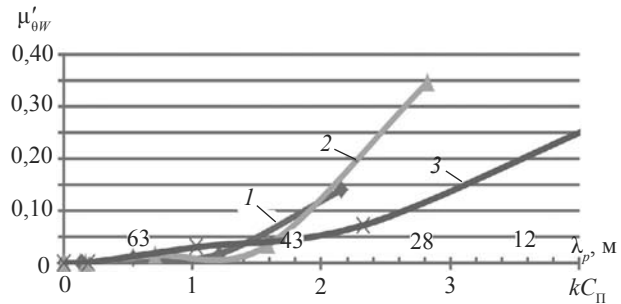


Рис. 3. Зависимость безразмерного коэффициента волнового демпфирования $\mu'_{\theta W}$ от частотного параметра kC_{II} при варьировании отношения A/C_{II} для СМПВ типа А:

1 — $A/C_{II} = 0,75$; 2 — $A/C_{II} = 0,65$; 3 — $A/C_{II} = 0,55$

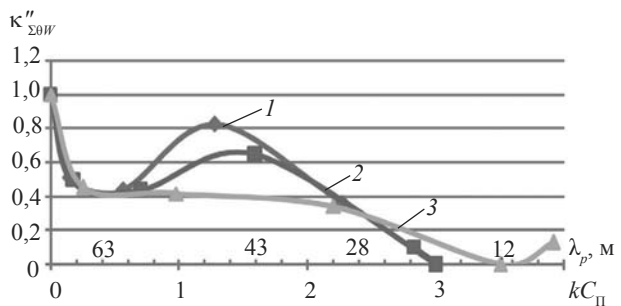


Рис. 4. Зависимость полного поправочного коэффициента $\kappa''_{\Sigma\theta W}$ от частотного параметра kC_{II} при варьировании отношения A/C_{II} для СМПВ типа В:

1 — $A/C_{II} = 0,75$; 2 — $A/C_{II} = 0,65$; 3 — $A/C_{II} = 0,55$

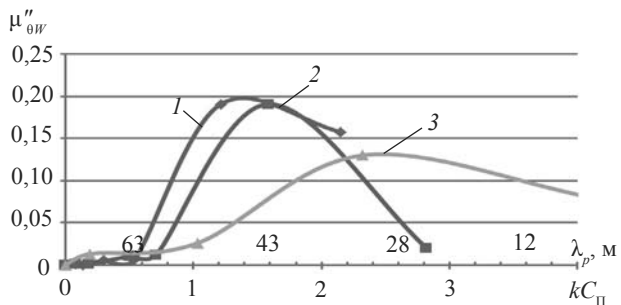


Рис. 5. Зависимость безразмерного коэффициента волнового демпфирования $\mu''_{\theta W}$ от частотного параметра kC_{II} при варьировании отношения A/C_{II} для СМПВ типа В:

1 — $A/C_{II} = 0,75$; 2 — $A/C_{II} = 0,65$; 3 — $A/C_{II} = 0,55$

по [12] не ведёт к значительному уменьшению данной величины.

Такие же результаты для АЧХ бортовой качки в резонансных условиях при применении более сложных гидромеханических методов были получены в работах [13, 15]. В то же время по результатам экспериментов согласно работ [14–16] величина $\left(\frac{\theta_0(n_{\theta})}{\alpha_0} \right)_{рез}$ для СМПВ хотя и оказывается больше, чем для однокорпусного судна, но всё же не превышает 5–7 (как исключение, может достичь 10), оказываясь, таким образом, в несколько раз меньше, чем получается по расчётам.

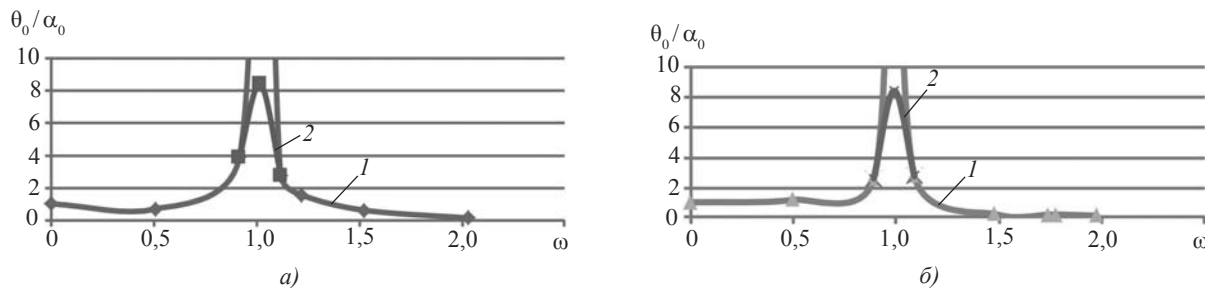


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика для СМПВ для положения лагом к регулярным волнам при отсутствии хода и успокоителей бортовой качки:

a — СМПВ тип В; *б* — СМПВ тип А; 1 — расчетные значения; 2 — сглаживание

Физическая картина резонансных колебаний следующая [12]. Если бортовая качка двухкорпусного судна (всё равно — катамарана с обычными обводами или СМПВ) достигает таких пределов, что один из корпусов приближается к тому, чтобы выйти из воды, происходит резкое возрастание демпфирования. Это связано с тем, что наряду с традиционным моментом сил инерции при бортовой качке, определяемым как произведение суммарного момента инерции масс на угловое ускорение, появляется и быстро возрастает ещё одна составляющая, равная произведению градиента присоединённого момента инерции массы по мгновенной осадке на угловую скорость. Эта составляющая проявляет себя как дополнительный демпфирующий момент и потому значение $\mu_{02}(\omega)$ существенно возрастает в резонансных условиях, когда частота набегающего волнения ω оказывается в окрестности собственной частоты n_0 .

Приближённый учёт этого обстоятельства для СМПВ выполним по аналогии с [2] так. Примем, для резонансных ординат АЧХ, что $\frac{\theta_0(n_0)}{\alpha_0} \leq \frac{\theta_{0max}}{\alpha_{0max}} = 8,07$, где $\text{tg}\theta_{0max} = \frac{A}{C}$, а $\alpha_{0max} = \frac{\pi}{7} \frac{\alpha_0}{\alpha_{0max}}$ максимально возможная по условиям обрушения волны амплитуда угла волнового склона для регулярных волн Стокса. После этого ограничения производится процедура сглаживания АЧХ для обеспечения её плавности в резонансной области. Более точное решение для СМПВ будет получено позднее по аналогии с работой [12].

Наконец, по точной формуле (3) или по приближённой формуле (4) определяется дисперсия и амплитуда бортовой качки СМПВ обоих типов с заданной обеспеченностью в функции высоты волны 3%-обеспеченности $h_{3\%}$, рис. 7. В последнем случае в приведенных выше формулах для определения поправочного коэффициента $\kappa'_{\Sigma\theta W} = \kappa_{\Sigma\theta W}(n_0)$ и коэффициента волнового демпфирования $\mu'_{\theta W}(n_0) = \mu''_{\theta W}$ следует принять $\omega = n_0$ и $k = k_0 = \frac{n_0}{n_0}$. Как видно из рис. 7, погрешность, связанная с заменой фактического волнового воздействия (спектральная плотность которого зависит от частоты) белым шумом в узком смысле тем более существенна, чем выше интенсивность волнения и, соответственно, чем выше его степень упорядоченности.

ВЫВОДЫ. 1. В результате выполненного исследования разработана сравнительно простая приближённая методика для расчёта бортовой качки судов с малой площадью ватерлинии в режиме основного резонанса и в положении лагом к набегающим нерегулярным волнам и отсутствии хода, что соответствует аварийному положению судна.

2. Расчет полного поправочного коэффициента $\kappa''_{\Sigma\theta W}$ для СМПВ типа А показывает наличие участка возрастания с уменьшением длины волны. Аналогичный расчет для СМПВ типа В показывает, что на участке длин волн от ∞ до 63 м полный поправочный коэффициент резко уменьшается, затем на интервале от 63 м до 28 м достигает максимума, после чего падает до 0 при длине волны 15–12 м. Безразмерный коэффициент волнового демпфирования достигает максимума при минимальных длинах волн (для типа А) и имеет ярко выраженный максимум в зоне длин волн от 50 м до 30 м (тип В).

3. Как по результатам выполненных в данной работе проектировочных расчётов, так и по данным ориентированных на проверочные расчёты ис-

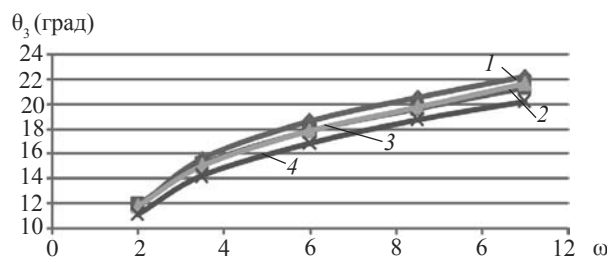


Рис. 7. Зависимости амплитуды бортовой качки 3%-обеспеченности $\theta_3 = 151\sqrt{D\theta}$ (град) от высоты волны $h_{3\%}$ для СМПВ типов А и В при отсутствии хода и успокоителей бортовой качки:

1 — расчёт при замене фактически действующего возмущения белым шумом в узком смысле (СМПВ типа А); 2 — расчёт с учётом фактической зависимости спектральной плотности действующего возмущения от частоты (СМПВ типа А) $h_{3\%}$ (м); 3 — расчёт при замене фактически действующего возмущения белым шумом в узком смысле (СМПВ типа В); 4 — расчёт с учётом фактической зависимости спектральной плотности действующего возмущения от частоты (СМПВ типа В)

следований в работах [15, 17], ордината АЧХ бортовой качки при резонансе теоретически может достигать нескольких десятков, что не согласуется с приведенными в указанных работах экспериментальными данными. Это расхождение может быть связано с появлением дополнительного нелинейного демпфирующего момента, пропорционального градиенту присоединённого момента инерции массы по мгновенной осадке, что требует дальнейших исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Батуев, А. Д.** Коэффициент сопротивления, присоединённый момент инерции и возмущающий момент цилиндрического катамарана с большим клиренсом [Текст] / А. Д. Батуев // Труды КТИРПиХ. — Калининград : КТИРПиХ, 1972. — Вып. 44. — С. 50–60.
- [2] **Батуев, А. Д.** К выбору главных размерений промысловых катамаранов с учётом бортовой качки [Текст] / А. Д. Батуев // Труды КТИРПиХ. — Калининград : КТИРПиХ, 1975. — Вып. 59. — С. 96–103.
- [3] **Батуев, А. Д.** Расчётная оценка кажущегося крена судна с малой площадью ватерлинии [Текст] / А. Д. Батуев // Труды КТИРПиХ. — Калининград : КТИРПиХ, 1981. — Вып. 93. — С. 30–38.
- [4] **Бойко, А. П.** Особенности решения задачи проектирования судна с малой площадью ватерлинии [Текст] / А. П. Бойко // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 2. — С. 10–17.
- [5] **Коваленко, Б. П.** Влияние формы шпангоутов на параметры качки [Текст] / Б. П. Коваленко // Труды ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1973. — Вып. 182. — С. 98–105.
- [6] **Орлов, Ю. Ф.** Редукционные коэффициенты к главной части возмущающей силы бортовой и поперечно-горизонтальной качки понтонов прямоугольной и цилиндрической формы [Текст] / Ю. Ф. Орлов, И. Ф. Попов, Б. С. Украинский // Труды ГИИВТ. — Горький : ГИИВТ, 1974. — Вып. 133. — Часть 2. — С. 20–38.
- [7] Прикладные задачи динамики судов на волнении [Текст] / И. К. Бородай, Г. В. Виленский, В. А. Мореншильдт и др. — Л. : Судостроение, 1989. — 262 с.
- [8] **Рахманин, Н. Н.** Качка полупогруженных буровых платформ [Текст] / Н. Н. Рахманин, Ю. К. Прытков // В книге «Многокорпусные суда» под ред. В. А. Дубровского. — Л. : Судостроение, 1978. — С. 97–105.
- [9] **Севастьянов, Н. Б.** Остойчивость промысловых судов [Текст] / Н. Б. Севастьянов. — Л. : Судостроение, 1970. — 200 с.
- [10] **Соломенцев, О. И.** О двух методах расчёта бортовой качки катамарана [Текст] / О. И. Соломенцев // Научно-технический сборник Регистра СССР. — Л. : Транспорт, 1986. — Вып. 15. — С. 10–20.
- [11] **Соломенцев, О. И.** О структуре дифференциальных уравнений вертикальной и бортовой качки СМПВ с нелинейным демпфированием [Текст] / О. И. Соломенцев // Вісник НУК за 2010 р. — Миколаїв : НУК, 2011. — С. 141–150.
- [12] **Соломенцев, О. И.** Нелинейное демпфирование интенсивной бортовой качки катамарана и судна с аутриггерами [Текст] / О. И. Соломенцев, Л. С. Теляга // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2011. — № 4. — С. 3–14.
- [13] **Шапошников, В. М.** Метод расчёта волновых нагрузок, действующих на двухкорпусные суда с малой площадью ватерлинии (СМПВ) [Текст] / В. М. Шапошников // Сборник НТО им. акад. А. Н. Крылова. — Л. : Судостроение, 1989. — Вып. 465. — С. 58–71.
- [14] **Шевелев, Г. Г.** О явлении субгармонической бортовой качки двухкорпусного судна с малой площадью ватерлинии [Текст] / Г. Г. Шевелев // Сборник НТО им. акад. А. Н. Крылова. — Л. : Судостроение, 1978. — Вып. 278. — С. 56–66.
- [15] **Murtedjo, M.** Prediction of Motion Characteristics of SWATH Type Floating Structure Using Two Dimensional Frank Close-fit Technique [Text] / M. Murtedjo, E. D. Djatmiko // Jurnal Mekanikal, 2004. — Desember. — Bil. 18. — Pp. 46–65.
- [16] **Numata, E.** Experimental Study of SWATH Model Rolling in Beam Waves [Text] / E. Numata // Davidson Laboratory. — Report SIT-DL-81-9-2200. — Hoboken, 1981. — 34 p.
- [17] **Rathje, H.** Dependence of SWATH Ship response on Waves on Choice of Viscous Coefficients [Text] / H. Rathje, T. E. Schellin // 11th International Workshop of Water Waves and Floating Bodies. — Hamburg, 1996. — 4 p.

© О. И. Соломенцев, Л. Ю. Кондратьева

Надійшла до редколегії 02.09.2015

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