

DOI 10.15589/jnn20150204
УДК 629.5.01
С60

EXTERNAL WAVE LOADS DEFINING THE LONGITUDINAL STRENGTH OF THE OUTRIGGER SHIP ON HEAD SEAS

ВНЕШНИЕ ВОЛНОВЫЕ НАГРУЗКИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПРОДОЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ СУДНА С АУТРИГГЕРАМИ НА ВСТРЕЧНОМ ВОЛНЕНИИ

Oleh I. Solomentsev
solomen@mksat.net
ORCID: 0000-0002-5106-6486

Fam Kuanh Shon
prostoshon@yahoo.com
ORCID: 0000-0001-7339-2023

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

Фам Куанг Шон,
магистр

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. In this article the bending moments, which determine the longitudinal strength of the outrigger ship, have been considered. According to the known information, the low-frequency vertical bending moment remains the most important stress factor among other wave stress factors also for the outrigger ships. Still, horizontal bending moment is more important for these ships than for monohulls, and appears connected with outrigger inertial bending moments. Also a new part of the high-frequency vertical bending moment appears connected with cross-structure slamming. So, approximate formulas, which may be used in the Rules of classification societies, have to take into account all these stress factors. As the main part, these formulas may include the low-frequency wave bending moments, acting on the central hull and on the outriggers. Other stress factors may be taken into account by two methods: by adding some parameters to the total low-frequency wave bending moment, acting on the center hull and on outriggers, or by multiplying low-frequency wave bending moment, acting on the center hull, by non-dimensional coefficients, which are near 1. In most of Rules of classification societies the first method is used. However, the second method is more suitable. In this article, it is stated when use of the second method is possible. Then, after analyzing known experimental materials, it was shown that the second method for the total bending moment for the outrigger ship also may be used. In this case, multiplying non-dimensional coefficients depend only on ships characteristics, but not on wave characteristics.

Keywords: outrigger ship; central hull; outrigger; longitudinal strength; bending moment.

Аннотация. Рассмотрено нахождение волновых изгибающих моментов, определяющих общую продольную прочность судна с аутриггерами. Приведены приближенные зависимости для включения в Правила классификационных обществ.

Ключевые слова: судно с аутриггерами; центральный корпус; аутриггер; общая продольная прочность; изгибающий момент.

Анотація. Розглянуто знаходження згинальних моментів, що визначають загальну поздовжню міцність судна з аутриггерами. Наведено наближені залежності для включення до Правил класифікаційних товариств.

Ключові слова: судно з аутриггерами; центральний корпус; аутриггер; загальна поздовжня міцність; згинальний момент.

REFERENCES

- [1] Boytsov G. V., Paliy O. M. *Kompleksnyy podkhod k problemam obespecheniya prochnosti sudov. V knige «Problemy prochnosti sudov»* [A comprehensive approach to the problems of the ships strength ensuring. In the book "Problems of Ship Strength"]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975. pp. 71–150.
- [2] Dubrovskiy V. A. *Sravnenie sudov s autriggerami s drugimi mnogokorpusnymi sudami* [Comparison of ships with outriggers with other multihull vessels]. *Sudostroenie — Shipbuilding*, 2001, no. 1, pp. 9–14.
- [3] *Normy prochnosti morskikh sudov* [Standards of strength of ships]. Leningrad, Registr SSSR, 1991. 92 p.
- [4] *Pravila klassifikatsii i postroyki vysokoskorostnykh sudov* [Rules of classification and construction of high-speed vessels]. Saint Petersburg, Rossiyskiy Morskoy Registr sudokhodstva, 2008.

- [5] Solomentsev O. I. O normirovanii obshchey prodolnoy prochnosti katamaranov [About normalization of the total longitudinal strength of catamarans]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Registra SSSR* [Scientific and technical collection of the USSR Register], 1991, issue. 17, pp. 101–126.
- [6] Solomentsev O. I. Normy prodolnoy prochnosti katamaranov [About normalization of the longitudinal strength of catamarans]. *Informatsionnye materialy Rechnogo Registra RSFSR* [Information materials of the River Register of the RSFSR], 1991, issue 2, pp. 72–74.
- [7] Solomentsev O. I. Proverka obshchey prodolnoy prochnosti bystrokhodnykh katamaranov na baze «Pravil obespecheniya bezopasnosti sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya» Morskogo Registra RF [Control of the total longitudinal strength of high-speed catamarans on the basis of «Rules of ensuring the safety of ships with dynamical principles of support» of the Maritime Register of the Russian Federation]. *Zbirnyk naukovykh prats UDMTU* [Collection of Scientific Publications of USMTU], 1998, no. 2, issue 350, pp. 77–85.
- [8] Kholodilin A. N., Shmyrev A. N. *Morekhodnost i stabilizatsiya sudov na volnenii* [Seaworthiness and stabilization of ships on the rough water]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1976. 328 p.
- [9] Blanchard T., Ge Chunhua Rules for Classifications of Trimarans. *Journal of Naval Engineering (JNE)*, 2007, Vol. 44, no. 1.
- [10] Chang F., Mayoss C., Blanchard T. *Development of Trimaran Rules*. Register Technical Papers, 2006. 19 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При разработке национальных Правил классификации и постройки высокоскоростных судов должно быть предусмотрено включение в эти Правила нормативов по общей продольной и поперечной прочности для трех архитектурно-конструктивных типов многокорпусных судов: скоростных катамаранов, судов с малой площадью ватерлинии и судов с аутригерами. При этом предложенные зависимости должны сохранять преемственность как по отношению друг к другу, так и с нормативами Регистра Украины, в части прочности судов иных типов. Рассмотрим в связи с этим некоторые общие принципы получения соответствующих расчетных зависимостей.

Предположим, что на встречном волнении можно выделить главную часть действующих на проектируемое многокорпусное судно внешних волновых нагрузок и ряд меньших по величине составляющих, которые представляют собой относительно небольшие поправки к главной части. Для однокорпусных судов и для катамаранов с обычными обводами такой нагрузкой является вертикальный низкочастотный (изменяющийся с частотой, равной частоте набегающего волнения) изгибающий момент M_w [5–7]. Это допущение остается справедливым и для судов с аутригерами.

К такому выводу приводит анализ содержащихся в [10] экспериментальных данных. Так, суммарный волновой изгибающий момент, при объемном водоизмещении центрального корпуса $V_1 = 3000 \text{ м}^3$ и объемном водоизмещении одного аутригера $V_2 = 200 \text{ м}^3$ примерно на 75 % определяется величиной суммарного вертикального изгибающего момента (ударная составляющая в указанной работе не выделялась). Примерно 15 % приходится на горизонтальный изгибающий момент и 10 % — на обусловленные наличием аутригера инерционные моменты. Разумеется, в последнем случае принимались в расчет только

те доли инерционных моментов, которые по рекомендациям [10] засчитываются в суммарный изгибающий момент на встречном волнении.

Учесть влияние всех поправок к волновому низкочастотному изгибающему моменту и найти суммарный волновой изгибающий момент $M_{w\Sigma}$ в принципе можно или в виде дополнительных к волновому низкочастотному моменту M_w слагаемых, или умножая момент M_w на поправочный коэффициент. Поскольку момент M_w составляет большую часть суммарного волнового момента, этот коэффициент должен быть близок к 1.

Тогда в первом случае в соответствии с практикой Норм прочности классификационных обществ, которые ориентированы, в первую очередь, на данные натурных экспериментов и, лишь во вторую очередь, — на теоретические данные, суммарный волновой изгибающий момент на встречном нерегулярном волнении $M_{w\Sigma}$ определится следующим образом:

– на стационарном волновом режиме

$$M_{w\Sigma} = M_{w\Sigma}(h_3, P, \bar{X}) = M_w(h_3, P, \bar{X}) + \sum_{k=1}^K M_{wk}(h_3, P, \bar{X}); \quad (1)$$

– при применении полновероятностной схемы

$$M_{w\Sigma} = M_{w\Sigma}(s_h, Q, \bar{X}) = M_{w\Sigma}(s_h, Q, \bar{X}) = M_w(s_h, Q, \bar{X}) + \sum_{k=1}^K M_{wk}(s_h, Q, \bar{X}), \quad (2)$$

где $\bar{X}$ — вектор главных элементов судна; h_3 — высота волны 3 %-й обеспеченности, характеризующая стационарный волновой режим; s_h — стандарт долгосрочного распределения высоты волн 3 %-й обеспеченности; P, Q — обеспеченность силовых факторов

соответственно для стационарного волнового режима и при использовании полновероятностной схемы; $M_{wk}(h_3, P, \bar{X})$, $M_{wk}(s_h, Q, \bar{X})$ — дополнительные к низкочастотному изгибающему моменту и менее значимые по сравнению с этой величиной в общем балансе суммарного момента силовые факторы (высокочастотный ударный, горизонтальный, инерционный изгибающие моменты); K — количество этих силовых факторов.

Теоретические зависимости приводят к соотношениям несколько иной структуры. Так, если для величин M_w и M_{wk} отличны от 0 только вторые статистические моменты (дисперсии) $D_w = D_{w0}$ и D_{wk} , а указанные величины коррелированы между собой, то вместо (1) приходим к более сложной зависимости вида:

$$D_{w\Sigma} = D_{w\Sigma}(h_3, \bar{X}) = D_{w0}(h_3, \bar{X}) + \sum_{k=1}^K D_{wk}(h_3, \bar{X}) + \sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^K \rho_{jk} \sqrt{D_{wj} D_{wk}},$$

где ρ_{jk} , $\forall j, k \in K$ — коэффициенты корреляции.

Если же все силовые факторы M_{wk} , $k=0, K$ распределены по закону Рэлея, то соотношение (1) приводится к виду:

$$M_{w\Sigma} = M_{w\Sigma}(h_3, P, \bar{X}) = \quad (1')$$

$$= \sqrt{M_{w0}^2(h_3, P, \bar{X}) + \sum_{k=1}^K M_{wk}^2(h_3, P, \bar{X}) + \sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^K \rho_{jk} M_{wj} M_{wk}},$$

где $\forall k \in 0, K$: $M_{wk}(h_3, P, \bar{X}) = \sqrt{-2 \ln P \cdot D_{wk}}$.

Во втором случае, предполагая возможность применения соотношений (1), (2), для стационарного волнового режима и для полновероятностной схемы находим:

$$M_{w\Sigma}(h_3, P, \bar{X}) = K'_1(h_3, P, \bar{X}) M_w(h_3, P, \bar{X});$$

$$K'(h_3, P, \bar{X}) = 1 + \frac{\sum_{k=1}^K M_{wk}(h_3, P, \bar{X})}{M_w(h_3, P, \bar{X})};$$

$$M_{w\Sigma}(s_h, Q, \bar{X}) = K''(s_h, Q, \bar{X}) M_w(s_h, Q, \bar{X});$$

$$K''(s_h, Q, \bar{X}) = 1 + \frac{\sum_{k=1}^K M_{wk}(s_h, Q, \bar{X})}{M_w(s_h, Q, \bar{X})}.$$

Анализ практических данных как по катамаранам, выполненный в работах [5–7], так и по кораблям с аутриггерами в соответствии с данными [9,10] позволяет ввести одно важное упрощение, а именно:

$$K'(h_3, P, \bar{X}) = \frac{\sum_{k=1}^K M_{wk}(h_3, P, \bar{X})}{M_w(h_3, P, \bar{X})} \approx K'(\bar{X}) \neq K'(h_3, P); \quad (3)$$

$$K''(s_h, Q, \bar{X}) = \frac{\sum_{k=1}^K M_{wk}(s_h, Q, \bar{X})}{M_w(s_h, Q, \bar{X})} \approx K''(\bar{X}) \neq K''(s_h, Q). \quad (4)$$

Тогда окончательно:

$$M_{w\Sigma}(h_3, P, \bar{X}) = K'(\bar{X}) M_1(h_3, P, \bar{X}) = [1 + K'(\bar{X})] M_w(h_3, P, \bar{X}); \quad (5)$$

$$M_{w\Sigma}(s_h, Q, \bar{X}) = K''(\bar{X}) M_w(s_h, Q, \bar{X}) = [1 + K''(\bar{X})] M_w(s_h, Q, \bar{X}), \quad (6)$$

причем в этом случае $K'(\bar{X}) \approx K''(\bar{X})$ и $K'(\bar{X}) \approx K''(\bar{X})$.

Отметим, что если необходимо применять соотношение (1'), то в рассматриваемом случае будет [1]:

$$K'(X) = \sqrt{1 + \mu(\bar{X}) + \nu(\bar{X})};$$

$$\mu(\bar{X}) = \frac{\sum_{k=1}^K D_{wk}(h_3, \bar{X})}{D_{w0}(h_3, \bar{X})};$$

$$\nu(X) = \frac{\sum_{j=0}^K \sum_{k=0}^K \rho_{jk} \sqrt{D_{wj}(h_3, \bar{X}) D_{wk}(h_3, \bar{X})}}{D_{w0}(h_3, \bar{X})}.$$

Если же все силовые факторы M_{wk} , $k=0, K$ распределены по закону Рэлея, то

$$\mu(\bar{X}) = \frac{\sum_{k=1}^K M_{wk}^2(h_3, \bar{X})}{M_{w0}^2(h_3, \bar{X})};$$

$$\nu(X) = \frac{\sum_{j=0}^K \sum_{k=0}^K \rho_{jk} M_{wj}(h_3, P, \bar{X}) M_{wk}(h_3, P, \bar{X})}{M_{w0}^2(h_3, \bar{X})}.$$

Формула для $K''(\bar{X})$ получается в этом случае более сложной, и здесь уже в общем случае $K'(\bar{X}) \neq K''(\bar{X})$ оказывается необходимым учет корреляции. Вытекающая отсюда структура расчетных зависимостей для коэффициентов K' и K'' должна при разработке норм находиться из анализа имеющихся экспериментальных данных.

Далее будем исходить из того, что применение соотношений (1), (2) в качестве исходных возможно. Далее, если упрощения в форме (3), (4) также возможны, то зависимости типа (5), (6) намного предпочтительнее для использования в нормативах классификационных обществ, чем зависимости типа (1), (2). Объясняется это значительно большей универсальностью зависимостей вида (5), (6). Так, расчет главной части — вертикального волнового низкочастотного изгибающего момента M_w — для традиционных

судов и для изолированных корпусов катамарана и тримарана может быть выполнен по одним и тем же унифицированным зависимостям. В то же время характер, количество и тем более величины поправок $\Delta M_{w\Sigma}$ для каждого архитектурно-конструктивного типа свои. При нормировании прочности может быть использована как схема наиболее тяжелого режима, соответствующая стационарному волновому режиму, так и полновероятностная схема (пример — Нормы прочности Российского Регистра). В первом случае при проверке предельной прочности принимается $P=0,5 \cdot 10^{-2}$, а величина h_3 определяется заданием на проектирование [4]. Во втором случае принимается $Q=10^{-8}$ при проверке предельной прочности, $Q=10^{-5}$ при проверке усталостной прочности и $s_h=4-5$ м для судов неограниченного района плавания [3]. Затем в строгом соответствии с этими допущениями выполняется проверка по критериям прочности.

Тогда если возможны упрощения в форме (5), (6), то все допущения, связанные с выбором общего подхода (схема наиболее тяжелого режима, полновероятностная схема), равно как и все допущения относительно конкретных численных значений величин h_3 и P (или s_h и Q), могут быть отнесены только к главной части суммарного изгибающего момента $M_{w\Sigma}$ — величине волнового низкочастотного изгибающего момента M_w . А расчетные зависимости для поправок K' и K'' будут одни и те же как для схемы наиболее тяжелого режима и полновероятностной схемы, так и для любых возможных значений h_3 , P , s_h и Q . Это позволит построить значительно более универсальные и наглядные нормативы для всех классов традиционных и многокорпусных судов и кораблей, чем при применении зависимостей типа (1), (2).

Рассмотрим теперь, каким образом в течение последних лет в Нормах классификационных обществ в части общей продольной прочности многокорпусных судов реализовались подходы, определяемые соотношениями (1), (2) и (5), (6). В конце 1980-х гг. одним из авторов разрабатывались поправки для действовавших в то время Правил Речного Регистра РСФСР. По предложению этого Регистра была представлена такая система поправочных коэффициентов к низкочастотному волновому изгибающему моменту для катамаранов, которая учитывала бы влияние ударных моментов (иными словами, путем анализа экспериментальных данных была доказана применимость соотношений типа (5), (6), и именно эти соотношения были авторами использованы). Введение поправочных коэффициентов по схеме соотношений (5), (6) применительно к катамаранам подробно обосновано в работе [5], и соответствующая методика была в 1991 г. одобрена Речным Регистром РСФСР [6].

В существовавших тогда советских (позднее — российских) Правилах по высокоскоростным судам 1990 г. какие-либо рекомендации по многокорпусным

судам отсутствовали, и в следующей работе одного из авторов [7] была рассмотрена возможность распространения этой же системы поправочных коэффициентов и на регламентируемые этими же Правилами скоростные катамараны. Однако в вышедшем в 2000 г. Бюллетене изменений и дополнений № 1 к российским Правилам классификации и постройки высокоскоростных судов 1998 г. ударные изгибающие моменты для скоростных катамаранов выражались не через поправочные коэффициенты к ударным моментам, а в виде отдельного слагаемого. Иными словами, были приняты за основу соотношения не типа (5), (6), а типа (1), (2). Тот же подход был принят в ныне действующих российских Правилах 2008 г. для катамаранов [4]. Это может быть связано с тем, что при формировании норм прочности по катамаранам в Правилах [4] за основу были приняты ранее разработанные нормативы по скеговым судам на воздушной подушке. А в этом случае, в отличие от водоизмещающих катамаранов и катамаранов переходного режима движения, уже нельзя считать, что низкочастотный волновой изгибающий момент составляет основную часть действующих нагрузок.

В Правилах Регистра Ллойда для тримаранов [9, 10] также приняты за основу соотношения типа (1), (2). Однако поскольку вертикальный продольный низкочастотный момент для тримаранов представляет собой основную часть внешних волновых нагрузок, то это позволяет рассматривать возможность применения соотношений типа (5), (6) также и для тримаранов.

Это и является проблемой, решаемой в данной статье. Разумеется, здесь необходимо пересмотреть по сравнению с катамаранами систему поправок M_{wk} , приняв за основу как расчеты, так и содержащиеся в [9, 10] экспериментальные данные.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — приближенный анализ теоретических и экспериментальных данных по силовым факторам, определяющих общую продольную прочность судна с аутригерами, и разработка зависимостей типа (5), (6) для определения соответствующих внешних волновых нагрузок, пригодных для включения в национальные Правила классификации и постройки высокоскоростных судов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрим характер, физический смысл и определение на основе общих физических закономерностей, а также экспериментальных данных [9, 10] поправок M_{wk} в соотношениях (1)–(6) применительно к судам с аутригерами.

Определяя расчетный волновой изгибающий момент для судна с аутригерами, следует учитывать такие обстоятельства.

Во-первых, из-за наличия соединительного моста судно с аутригерами, как и двухкорпусное судно —

катамаран, будет подвержено действию ударного изгибающего момента. Этот фактор подлежит обязательному учету, но вместе с тем он менее существенен, чем для катамарана. Объясняется это тем, что в целях улучшения ходкости небольшие по сравнению с центральным корпусом аутриггеры сдвигаются, как правило, к кормовой оконечности центрального корпуса. А удары в мост в районе кормовой оконечности приводят к меньшим значениям ударных моментов, чем характерные для катамаранов удары в мост в районе носовой оконечности.

Во-вторых, как указано В.А. Дубровским [2] и подтверждено в работах [9,10], для судов с аутриггерами оказывается необходимым учет не только вертикального, но и горизонтального низкочастотного волнового изгибающего момента. Это связано, в первую очередь, с меньшими величинами отношения ширины к высоте борта центрального корпуса судна с аутриггерами по сравнению с аналогичным соотношением для традиционных однокорпусных судов.

В-третьих, как показали приведенные в [9,10] практические данные, некоторое влияние на суммарный изгибающий момент, действующий на корабль с аутриггерами, могут оказать изгибающие моменты, связанные с силами инерции при качке и обусловленные наличием аутриггеров. По рекомендациям [10], эти моменты засчитываются в суммарный изгибающий момент на встречном волнении только небольшой своей частью (на 20–30%). В то же время теоретический расчет этих моментов требует знания вертикальных ускорений, обусловленных вертикальной и бортовой качкой.

Тогда суммарный вертикальный изгибающий момент M_{Σ} , на который должна проверяться прочность судна с аутриггерами, определится по следующим зависимостям:

– при прогибе (sagging)

$$M_{\Sigma} = M_{\Sigma S} = M'_{SW} + \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 M'_{WS} + 2M''_{WS} \quad (7)$$

– при перегибе (hogging)

$$M_{\Sigma} = M_{\Sigma H} = M''_{SW} - \kappa_2 \kappa_3 M'_{WH} + 2M''_{WH} \quad (8)$$

где M'_{SW} , M''_{SW} — изгибающие моменты для судна с аутриггерами на тихой воде (при прогибе изгибающий момент принимается положительным); M'_{WS} — вертикальный низкочастотный волновой изгибающий момент при прогибе, определяемый для центрального корпуса судна с аутриггерами как для однокорпусного судна; M'_{WH} — вертикальный низкочастотный волновой изгибающий момент при перегибе, определяемый для центрального корпуса судна с аутриггерами как для однокорпусного судна; M''_{WS} — вертикальный низкочастотный волновой изгибающий моменты при прогибе, определяемый для аутриггера как для однокорпусного судна; M''_{WH} — вертикальный

низкочастотный волновой изгибающий моменты при перегибе, определяемый для аутриггера как для однокорпусного судна; κ_1 — поправка, учитывающая влияние вертикального ударного изгибающего момента на общую продольную прочность; κ_2 — поправка, связанная с влиянием аутриггеров на суммарный вертикальный волновой низкочастотный изгибающий момент; κ_3 — поправка, учитывающая влияние возникающего на центральном корпусе горизонтального волнового изгибающего момента на общую продольную прочность.

Относительно структуры формул (7), (8) отметим следующее. Входящие в них величины M'_{WS} и $2M''_{WS}$, M'_{WH} и $2M''_{WH}$ численно соотносятся примерно как

$$\frac{2M''_{WS}}{M'_{WS}} \approx \frac{2M''_{WH}}{M'_{WH}} \approx 2 \frac{B_1}{B_2} \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2, \text{ где } L_1, B_1 — \text{длина}$$

и ширина центрального корпуса, L_2, B_2 — то же для аутриггера. При реальных соотношениях главных раз-

мерений судов с аутриггерами параметр $2 \frac{B_1}{B_2} \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2$

намного меньше 1, поэтому последнее слагаемое в соотношениях (7), (8) существенно меньше, чем сумма двух первых. В связи с этим представляется достаточным ввести поправки только к величинам M'_{WS} и M'_{WH} . Это объясняется тем, что погрешность, допущенная при расчете величин M''_{WS} и M''_{WH} , не окажет существенного влияния на точность расчетов по формулам (7), (8).

В соответствии со сказанным выше и с учетом результатов расчетов и экспериментальных данных [9, 10] поправки κ_1 и κ_2 определяются так:

$$\kappa_1 = 1 + 0,6 \kappa_c \kappa_x; \quad (9)$$

$$\kappa_2 = 1 + 0,07 A; \quad (10)$$

$$\kappa_c = \frac{C}{B_1}; \quad \kappa_h = 6,0 - \frac{75 h_{MK}}{L_1}; \quad \kappa_x = 1,0 - 2,0 \sqrt{\frac{x_{MK}}{L_1}},$$

где A — параметр, определяемый на основе описанных в [9,10] натурных экспериментов, как указано ниже; C — наименьшее по длине аутриггера расстояние между аутриггером и центральным корпусом; h_{MK} — вертикальный клиренс у кормовой переборки моста; x_{MK} — отстояние кормовой переборки моста от кормового перпендикуляра.

При определении коэффициента κ_1 изменение условий удара кормовой оконечностью моста по сравнению с характерным для катамаранов ударом носом учтено в соответствии со справочником [8], а сам алгоритм определения коэффициента κ_1 , подробно описанный в работе [5], в основном остался без изменений. В то же время здесь, в отличие от работ [5–7], не учитывалось в явном виде влияние хода. При ударе в кормовую часть моста это влияние менее существенно, чем в условиях характерного для

катамаранов удара в его носовую часть. График для коэффициента κ_1 приведен на рис. 1.

В формуле (10) при определении коэффициента κ_2 принимается $A=-1$, если носовые перпендикуляры центрального корпуса и аутриггера лежат в одной плоскости; $A=0$, если мидели центрального корпуса и аутриггера лежат в одной плоскости, и $A=1$, если кормовые перпендикуляры центрального корпуса и аутриггера лежат в одной плоскости. Теоретически инерционная составляющая изгибающего момента содержит две составляющие, причем одна из этих составляющих для прогиба и для перегиба определяется по различным зависимостям [9, 10]. Однако доля инерционного (связанного с наличием аутриггеров) момента в общем балансе суммарного изгибающего момента на встречном волнении, как уже видели, мала, поэтому здесь оправдано применение максимально упрощенных эмпирических зависимостей. По данным экспериментов, основным фактором, который влияет на величину дополнительного изгибающего момента, является положение аутриггера по отношению к центральному корпусу. При этом эмпирические данные для прогиба и перегиба получаются близкими. Из этих соображений и получена расчетная зависимость для коэффициента κ_2 .

Для поправки κ_3 в соответствии с [2, 4] изначально имеем:

$$\kappa_3 = 0,92 \sqrt{1,0 + (0,85 + \Delta_r[L_1(s_h, Q)])^2 \left(\frac{C_{M1}}{C_{W1}} \right)^2} \geq 1; \quad (11)$$

L_1 — в метрах;

$$C_{M1} \approx \frac{1,2T_1}{B_1}; \quad C_{W1} \approx k_{W1} \left(\frac{B_1}{H_{ПР1}} \right)^2;$$

$$H_{ПР1} = \frac{1}{L_1} \int_{L_1} H_{1x}(x) dx; \quad k_{W1} = \frac{W_{Г1}}{W_{Б1}} \left(\frac{H_{ПР1}}{B_1} \right)^2,$$

где $H_{ПР1}$ — приведенная высота борта для центрального корпуса; $H_{1x}(x)$ — высота борта центрального корпуса в сечении с абсциссой x ; C_{M1} — отношение горизонтального волнового изгибающего момента, действующего на центральный корпус, к вертикальному изгибающему моменту; L_1 — длина центрального корпуса; C_{W1} — отношение момента сопротивления миделевого сечения центрального корпуса при горизонтальном изгибе к моменту сопротивления при вертикальном изгибе; $W_{Г1}$, $W_{Б1}$ — моменты сопротивления миделевого сечения центрального корпуса при горизонтальном и вертикальном изгибе соответственно; $\Delta_r[L_1(s_h, Q)]$ — поправка, неявно, через длину L_1 , зависящая от стандарта высот волн 3%-й обеспеченности s_h и расчетной обеспеченности по полновероятностной схеме Q , при $s_h=4,0$ м и $Q=10^{-5}$ имеем $\Delta_r = L_1/600$ [2, 4].

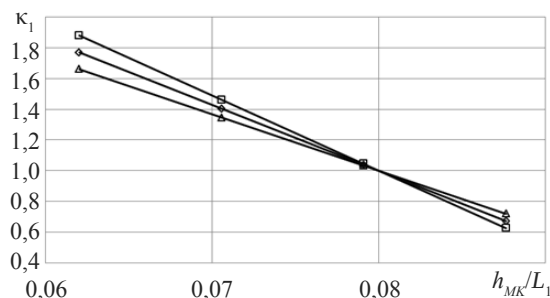


Рис. 1. Графические зависимости для коэффициента κ_1 в соответствии с соотношением (9): $\blacktriangle$ — $C/B_1=1,2$; $\blacklozenge$ — $C/B_1=1,4$; $\blacksquare$ — $C/B_1=1,6$

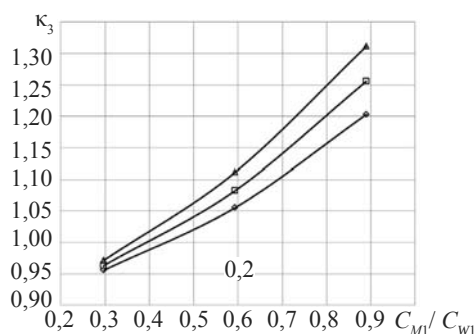


Рис. 2. Графические зависимости для коэффициента κ_3 в соответствии с соотношением (11): $\blacklozenge$ — $L_1=58,53$; $\blacksquare$ — $L_1=117,06$; $\blacktriangle$ — $L_1=175,59$

На примере формулы (9), которая графически отображена на рис. 2, можно показать переход от зависимости $\kappa_{Wk}(s_h, Q, \bar{X})$ к зависимости $\kappa_{Wk} \approx \kappa_{Wk}(\bar{X})$. В данном случае численный анализ показывает, что в реальном диапазоне длин величина $0,85 + \Delta_r(L_1)$ мало отличается от 1 (см. рис. 2), что и позволяет упростить соотношение (9) к виду:

$$\kappa_3 = 0,92 \sqrt{1,0 + \left(\frac{C_{M1}}{C_{W1}} \right)^2} \geq 1.$$

ВЫВОДЫ. 1. При выборе структуры нормативных зависимостей для расчета внешних волновых нагрузок в Правилах классификационных обществ для многокорпусных судов целесообразно, если это не связано с потерей точности, вместо зависимостей типа (1), (2) применять зависимости типа (5), (6). Переход от суммирования поправок (соотношения типа (1), (2)) к системе зависящих, по возможности, только от главных элементов судна поправочных коэффициентов (соотношения типа (5), (6)) позволит получить более универсальные и наглядные нормативные зависимости.

2. На основе выполненного анализа теоретических и экспериментальных данных в части формирования силовых факторов, определяющих общую продольную

прочность судна с аутиггерами, и имеющихся теоретических и экспериментальных исследований предложена система поправочных коэффициентов к вертикальному волновому изгибающему моменту.

3. Эти коэффициенты без значительной потери точности могут рассматриваться как функции только главных элементов судна, но не интенсивности волнения и расчетной обеспеченности (пример — рис. 2).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бойцов, Г.В.** Комплексный подход к проблемам обеспечения прочности судов [Текст] / Г.В. Бойцов, О.М. Палий // Проблемы прочности судов. — Л. : Судостроение, 1975. — С. 71–150.
- [2] **Дубровский, В.А.** Сравнение судов с аутиггерами с другими многокорпусными судами [Текст] / В.А. Дубровский // Судостроение. — 2001. — № 1. — С. 9–14.
- [3] Нормы прочности морских судов [Текст]. — Л. : Регистр СССР, 1991. — 92 с.
- [4] Правила классификации и постройки высокоскоростных судов [Текст]. — СПб. : Российский Морской Регистр судоходства, 2008.
- [5] **Соломенцев, О.И.** О нормировании общей продольной прочности катамаранов [Текст] / О.И. Соломенцев // Научно-технический сборник Регистра СССР. — М. : Внешторгиздат, 1991. — Вып. 17. — С. 101–126.
- [6] **Соломенцев, О.И.** Нормы продольной прочности катамаранов [Текст] / О.И. Соломенцев // Информационные материалы Речного Регистра РСФСР. — М. : Речной Регистр РСФСР, 1991. — Вып. 2. — С. 72–74.
- [7] **Соломенцев, О.И.** Проверка общей продольной прочности быстроходных катамаранов на базе «Правил обеспечения безопасности судов с динамическими принципами поддержания» Морского Регистра РФ [Текст] / О.И. Соломенцев // Зб. наук. праць УДМТУ. — Миколаїв : УДМТУ, 1998. — № 2 (350). — С. 77–85.
- [8] **Холодили́н, А.Н.** Мореходность и стабилизация судов на волнении [Текст] / А.Н. Холодили́н, А.Н. Шмырев. — Л. : Судостроение, 1976. — 328 с.
- [9] **Blanchard, T.** Rules for Classifications of Trimarans [Text] / T. Blanchard, Ge Chunhua // Journal of Naval Engineering (JNE). — 2007. — Vol. 44. — № 1.
- [10] **Chang, F.** Development of Trimaran Rules [Text] / F. Chang, C. Mayoss, T. Blanchard // Lloyd Register Technical Papers, 2006. — 19 p.

© О.И. Соломенцев, Фам Куанг Шон

Надійшла до редколегії 13.02.2015

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