

DOI 10.15589/jnn20150301
УДК 629.124.72
С60

**PREDICTION OF THE WIND HEELING MOMENT
FOR THE SMALL-WATERPLANE-AREA TWIN-HULL SHIP**
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВОГО КРЕНЯЩЕГО МОМЕНТА,
ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА СУДНО С МАЛОЙ ПЛОЩАДЬЮ ВАТЕРЛИНИИ**

Oleh I. Solomentsev
solomen@mksat.net
ORCID: 0000-002-5106-6486

Liliia Yu. Kondrateva
muschil@mail.ru
ORCID: 0000-0002-2788-9116

О.І. Соломенцев
д-р техн. наук, проф.

Л.Ю Кондратьєва
асп.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. According to the Rules of some classifications societies for the high-speed ships, which include standards for the multi hull ships, all stability standards for all multi hull ships types are determined with the same analytical methods. In this case specific architecture of different kinds of a muti hull vessels is not taken into account. So, in this article is analised prediction of the wind heeling moment for the two kinds of the small waterplane area twin hull ships (SWATH) — with the struts on the all length of ship (SWATH type A) and with the struts on the bow and stern ends of ship (SWATH type B). For both types of SWATH on the base of known experimental data were found formulas for the calculating of the wind heeling moment. This formulas take into account all kinds of the aerodynamic and hydrodynamic forces, which are connected with the architecture of the both types of SWATH. Was learned both static and dynamic wind acting on the SWATH. All results are an approximate regression formulas with correlation multiple coefficients. Than, in the article are the results of comparison calculation of the wind heeling moment for the SWATH according the Rules of classification and building of high-speed ships of the Russia Sea register of shipping and according to new formulas, which were got in the article. Results of comparing were analysed.

Keywords: small-waterplane-area twin-hull ship; wind heeling moment; classification society; spatiality heeled.

Анотація. Наведено розрахункові залежності для визначення вітрового кренуючого моменту для суден з малою площею ватерлінії. Виконано порівняння отриманих результатів з даними розрахунку за правилами класифікаційного товариства (Російський морський реєстр судноплавства 2008 р.)

Ключові слова: судно з малою площею ватерлінії; вітровий кренуючий момент; класифікаційне товариство; просторові нахилення.

Аннотация. Приведены расчетные зависимости для определения ветрового кренящего момента для судов с малой площадью ватерлинии. Выполнено сопоставление полученных результатов с данными расчета по Правилам классификационного общества (Российский морской регистр судоходства 2008 г.)

Ключевые слова: судно с малой площадью ватерлинии; ветровой кренящий момент; классификационное общество; пространственные наклонения.

REFERENCES

- [1] Basin A. M., Anfymov V. N., Avdyeyev H. K. Teoretychni ta osnovy rozrakhunku normuvannya ostiynosti suden vnutrishnoho plavannya [Theoretical bases of calculation and valuation stability of inland waterway vessels]. *Pratsi TSNDI richkovoho floutu* [Proceedings of the Central Research Institute of the river fleet]. Leningrad, Richkovyy transport, 1957, issue 36, pp. 3–127.
- [2] Berestetskiy A. M. Priblizhonnoye opredeleniye krenyashchego momenta pri dvizhenii sudna lagom [An approximate determination of the heeling moment during vessel motion beam on the sea]. *Sbornik NTO im. akad. A. N. Krylova* [Collection of STS named after Academician A. N. Krylov]. Leningrad, Sudostroenie 1972, issue. 185, pp. 144–149.
- [3] Devnin S. I. *Aerogidromekhanika plokhoobtekeyemykh konstruksiy* [Aerohydrodynamics of non-stationary flow of bodies] Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983, 332 p.

- [4] *Pravila klassifikatsii i postroyki vysokoskorostnykh sudov* [Rules for the classification and construction of high speed vessels]. Saint Peterburg, Rossiyskiy Morskoy Registr sudokhodstva Publ., 2004, 280 p.
- [5] Sevastyanov, N. B. *Ostoychivost promyslovykh sudov* [The stability of fishing vessels]. Leningrad, Sudostroenie, 1970, 200 p.
- [6] Sobolev G. V. *Upravlyayemost korablya i avtomatizatsiya sudovozhdeniya* [Ship maneuverability and automation navigation]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1976, 480 p.
- [7] Solomentsev O. I. Analiz dinamiki oprokidyvaniya dvukhkorpusnogo sudna [Analysis of the dynamics of double-hulled vessel tipping]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Registra SSSR* [Scientific and Technical Collection USSR Register]. Vneshtorgizdat, 1991, issue 17, pp. 74–88.
- [8] Solomentsev O. I., Buy Shi Tao. *O vliyaniy osobennostey podvodnoy i nadvodnoy arkhitektury korablya s auttriggerami na yego vetrostoykost* [About influence of underwater and overwater features of the architecture of the ship with outriggers on its windage]. *Zbirnyk naukovykh prats UDMTU* [Collection of scientific papers of UDMTU]. Mykolaiv, UDMTU Publ., 2002, issue 5 (383), pp. 11–22.
- [9] Khalizev O. A., Bezsyalov A. G. *Proyektynaya otsenka ostoychivosti sudov s maloy ploshchadyu vaterlinii* [Project evaluation of stability of vessels with small waterplane area]. *Perspektivnyye napravleniya v proyektirovaniy sudov* [Perspective directions in the design of ships]. *Sbornik nauchnykh trudov LKI* [Collection of scientific works of LSI]. Leningrad, LKI Publ., 1983, pp. 65–69.
- [10] Shostak V. P. *Kriterii ostoychivosti sudov s maloy ploshchad'yu vaterlinii* [Criteria for the stability of vessels with small waterplane area]. *Trudy NKI* [Collection of scientific papers of MKI]. Mykolaiv, MKI Publ., 1978, issue 138, pp. 68–76.
- [11] Goldberg L. L., Tucker R. G. Current Status of Stability and Buoyancy Criteria, Used by the US Navy for Advanced Marine Vehicles. *Naval Engineers Journal*, 1975, vol. 87, no. 6.
- [12] Vassalos D. *Risk-Based Ship Design*. In book “Risk-Based Ship Design Methods, Tools and Applications”. Athens, 2009, pp. 17–94.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При проектировании судов с малой площадью ватерлинии (СМПВ) выбор их главных элементов должен выполняться согласно требованиям к динамической остойчивости судна в условиях ветра и волнения. Первым этапом здесь будет нахождение ветрового кренящего момента с учётом как горизонтальных и вертикальных аэро- и гидродинамических сил в функции скорости ветра, так и главных элементов СМПВ.

В Правилах по высокоскоростным судам [4] к многокорпусному судну относится всякое судно, ватерлиния которого образует более одного замкнутого контура. Далее по отношению к любому многокорпусному судну могут быть применены при определённых условиях либо требования к однокорпусным высокоскоростным судам, либо единые для всех многокорпусных судов требования. Такой подход принят как в российских Правилах [4], так и в ряде иных аналогичных национальных Правил. В американской методике [13], которая относится к боевым кораблям с малой площадью ватерлинии, на них распространены американские же требования к традиционным боевым кораблям.

В то же время, если рассмотреть хотя бы только три наиболее распространённых архитектурно-конструктивных типа многокорпусных судов (катамараны с обычными обводами, СМПВ, суда с аутриггерами), то приходится сделать вывод о различном влия-

нии архитектурно-конструктивных особенностей судна на формирование ветрового кренящего момента. Это различие имеет место как между архитектурно-конструктивными типами многокорпусных судов, так и по сравнению с однокорпусными судами [7, 8]. Поэтому соответствующие разделы Правил для адекватной реализации традиционной концепции Rules Based Design [14] должны быть соответствующим образом доработаны. А при проектировании СМПВ в соответствии с новой концепцией Risk Based Design [14] также необходимо учесть все те особенности архитектурно-конструктивного типа СМПВ, которые оказываются существенными при определении действия на них ветрового кренящего момента. Разработка соответствующих аналитических зависимостей на основе существующих экспериментальных данных и является проблемой, решаемой в данной статье.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В работах по проверке динамической остойчивости СМПВ [9–11] не рассмотрены или проанализированы не в полной мере следующие вопросы, существенные для создания норм остойчивости СМПВ:

– влияние вертикальных гидродинамических и аэродинамических сил на остойчивость СМПВ;

– воздействие пространственности равнообъёмного накренения СМПВ на нормативные характеристики его остойчивости.

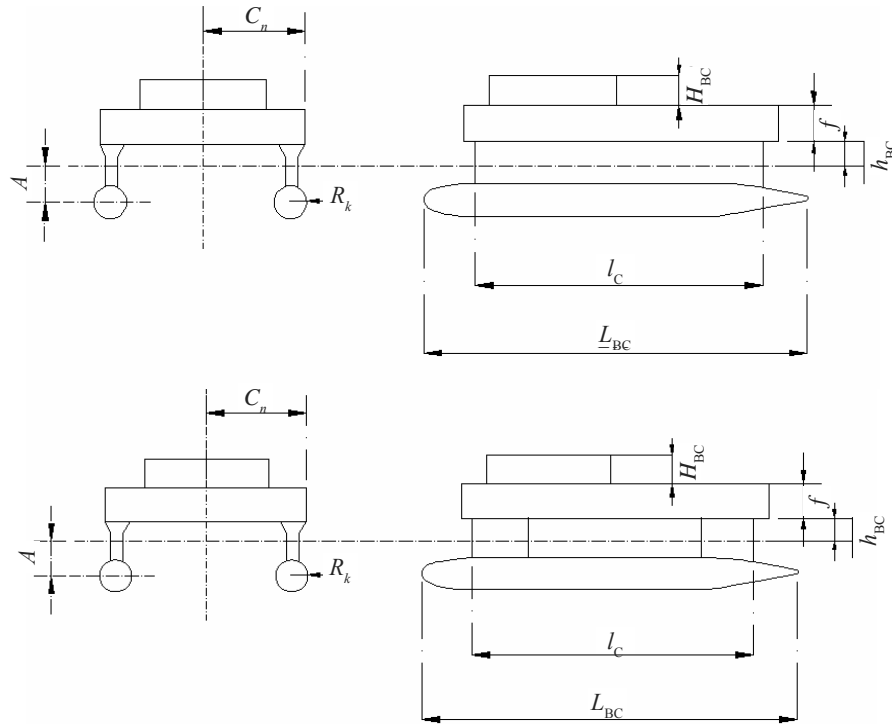


Рис. 1. СМПВ типа А (вверху) и СМПВ типа В (внизу)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка расчётной схемы определения действующего на СМПВ ветрового кренящего момента с учётом как вертикальных аэродинамических и гидродинамических сил, так и с приближённым учётом пространственности накренения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Условимся далее различать такие две разновидности СМПВ, 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.

Рассмотрим сначала некоторые особенности СМПВ, которые имеют прямое отношение к формированию кренящего момента и отличают СМПВ как от однокорпусных судов, так и от всех остальных архитектурно-конструктивных типов многокорпусных судов.

Таковыми особенностями устойчивости СМПВ являются близость начальных поперечной и продольной метацентрических высот, а также ординат диаграмм поперечной и продольной статической

устойчивости. Поэтому ветровой крен даже при действии кренящей пары в плоскости шпангоута практически всегда сопровождается значительным сопутствующим дифферентом, а наиболее опасный с точки зрения устойчивости курсовой угол СМПВ по отношению к ветру φ_{KM} может заметно отличаться от 90 градусов [9]. Если поперечная и продольная метацентрические высоты СМПВ близки между собой, то $\text{tg} \varphi = B_{BC}/L_{BC}$. Этот угол примерно отвечает максимальной площади парусности СМПВ. С другой стороны, для нормирования устойчивости СМПВ необходимо сохранять аналогично американским нормам [11] какую-то преемственность с традиционными судами. Поэтому далее для больших углов крена, как и в работах [10, 11], ограничимся проверкой только поперечной устойчивости СМПВ. Однако при этом вместо площади парусности при лаговом ветре S_{II} введем в рассмотрение эквивалентную площадь парусности $S_{IIЭ}$ с аппликацией ЦТ площади парусности $Z_{IIЭ}$. Величины $S_{IIЭ}$ и $Z_{IIЭ}$ рассчитываются для наиболее неблагоприятного курсового угла СМПВ по отношению к ветру φ_{KM} . Таким образом, вносится некоторый запас, который должен компенсировать учёт только поперечного наклона СМПВ. Тогда

$$S_{IIЭ} = l_{CЭ} (H_f - H_{BC}) + (H_{BC} L_{BC} + F_H) \sqrt{1 + \left(\frac{B_{BC}}{L_{BC}} \right)^2};$$

$$z_{IIЭ} = \frac{1}{S_{IIЭ}} \left[0,5 l_{CЭ} (H_f - H_{BC})^2 + L_{BC} H_{BC} (H_f - 0,5 H_{BC}) + F_H (H_f + 0,5 H_H) \right] \sqrt{1 + \left(\frac{B_{BC}}{L_{BC}} \right)^2} + \Delta z_{IIЭ};$$

$l_{сз} = l_c$ для СМПВ типа А и $l_{сз} = l_{c1} + l_{c2}$ для СМПВ типа В; $\Delta z_{пэ} = A + R_k$ при начале координат на основной плоскости; $\Delta z_{пэ} = 0$ при начале координат в плоскости КВЛ; где A — погружение оси погруженного корпуса в воду; R_k — расчётный радиус погруженного корпуса; H_f — полная (с учётом верхнего строения) высота надводного борта СМПВ; H_{bc} — высота верхнего строения; L_c — длина стойки СМПВ типа А; L_{c1} , L_{c2} — длина носовой и кормовой стоек СМПВ типа В; F_H , H_H — площадь проекции на ДП расположенной выше верхнего строения надстройки и осредненная по длине высота этой надстройки.

Формирование кренящего момента на СМПВ типа В имеет некоторые особенности. У СМПВ типа В мы имеем на боковом виде своеобразное «окно», образованное свободной поверхностью, днищем верхнего строения и просветом между носовой и кормовой стойками. В этом случае воздушный поток обтекает верхнее строение по замкнутому контуру, причём на обтекание днища верхнего строения влияет наличие экрана (свободной поверхности воды), а именно аэродинамическая неинерционная сила несколько снижается. Кроме того, из-за обтекания верхнего строения по замкнутому контуру на нём, как на крыле, возникает дополнительная аэродинамическая сила циркуляционной природы, которая оказывает двойное влияние на аэродинамический кренящий момент. Во-первых, горизонтальная составляющая циркуляционной силы суммируется с неинерционной силой. Во-вторых, вертикальная составляющая циркуляционной силы может не совпадать с ДП СМПВ, и в этом случае данная составляющая создаёт дополнительный кренящий момент, который существенно зависит от угла крена. Таким образом, необходимо иметь аналитические зависимости коэффициента суммарного (с учётом циркуляционной составляющей) аэродинамического момента СМПВ типа В от угла крена θ вида $C_M(\theta)$. А для СМПВ типа А в качестве расчётного можно ограничиться значением этого коэффициента для прямого положения СМПВ $C_M^{(0)} = C_M(0)$.

Для однокорпусных судов кренящий момент при наличии хода нарастает быстрее, чем при его отсутствии, в силу чего эта ситуация для традиционных кораблей с большим отношением ширины к осадке будет расчётной [1]. Спецификой двухкорпусного судна, отличающего его от однокорпусного с большим отношением ширины к осадке, является то, что влияние вертикальных сил на остойчивость заметно лишь в отсутствие хода [7]. Этот фактор более значим, чем характер нарастания кренящего момента. Поэтому далее остановимся только на случае отсутствия хода.

Теперь можно перейти к непосредственному определению кренящего момента при статическом действии ветра $M_{кп1}$ и при динамическом действии ветра $M_{кп2}$:

— для СМПВ типа А:

$$M_{кп1} = C_M \frac{\rho_{вз} \bar{u}_B^2}{2} S_{пэ} (z_{пэ} - z_R); \quad (1)$$

$$M_{кп2} = C_M \frac{\rho_{вз} u_B^2}{2} S_{пэ} (z_{пэ} - \bar{z}_R); \quad (2)$$

$$C_M \cong C_Y (1 + \kappa_B); \quad \kappa_B \cong \frac{0,8 B_{bc}}{z_{пэ} - A - R_k} \bar{y}_B;$$

$$\bar{y}_B = -0,36 + 0,48 \beta_s - 0,04 \frac{B_{bc}(1 - \beta_s)}{z_{пэ} - A - R_k};$$

$$\beta_s = \frac{F_{л}}{2 B_{bc} (z_{пэ} - A - R_k)};$$

— для СМПВ типа В:

$$M_{кп1} = \Re_{кп1}(\bar{\theta}_{01}); \quad (3)$$

$$M_{кп2} = \Re_{кп2}(\bar{\theta}_{02}); \quad (4)$$

$$\bar{\theta}_{01} : \Re_{кп}(\bar{\theta}_{01}) = D l_{\theta}(\bar{\theta}_{01});$$

$$\bar{\theta}_{02} : \Re_{кп}(\bar{\theta}_{02}) = D l_{\theta c}(\bar{\theta}_{02}); \quad l_{\theta c}(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} l_{\theta}(\vartheta) d\vartheta;$$

$$\Re_{кп1}(\vartheta) = C_M \varphi_{z\theta}(\vartheta) \frac{\rho_{вз} \bar{u}_B^2}{2} S_{пэ} (z_{пэ} - z_R) + \delta M_{кп1}^{(1)}(\vartheta) + \delta M_{кп1}^{(2)}(\vartheta);$$

$$\Re_{кп2}(\vartheta) = C_M \varphi_{z\theta}(\vartheta) \frac{\rho_{вз} u_B^2}{2} S_{пэ} (z_{пэ} - \bar{z}_R) + \delta M_{кп2}^{(1)}(\vartheta) + \delta M_{кп2}^{(2)}(\vartheta);$$

$$\delta M_{кп1}^{(1)}(\vartheta) = C_{Z2}^{(0)} \frac{\rho_{вз} \bar{u}_B^2}{2} \operatorname{tg} \vartheta \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{\vartheta}{\theta_*} \right) \times \kappa_{свс} L_{bc} B_{bc} (H_f - 0,5 H_{bc});$$

$$\delta M_{кп1}^{(2)}(\vartheta) = m_x(\vartheta) \frac{\rho_{вз} \bar{u}_B^2}{2} \kappa_{свс} L_{bc}^2 B_{bc};$$

$$\delta M_{кп2}^{(1)}(\vartheta) = C_{Z2}^{(0)} \frac{\rho_{вз} u_B^2}{2} \operatorname{tg} \vartheta \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{\vartheta}{\theta_*} \right) \times \kappa_{свс} L_{bc} B_{bc} (H_f - 0,5 H_{bc});$$

$$\delta M_{кп2}^{(2)}(\vartheta) = m_x(\vartheta) \frac{\rho_{вз} u_B^2}{2} \kappa_{свс} L_{bc}^2 B_{bc};$$

$$\varphi_{z\theta}(\vartheta) = \varphi_z \cos \vartheta;$$

$$\varphi_z = 1,0 - C_{\varphi 1} \operatorname{th}(C_{\varphi 2} \bar{h}_{bc}); \quad \bar{h}_{bc} = 0,05 + \frac{h_{bc}}{L_{bc}};$$

$$\kappa_{свс} = 1 - \frac{L_{c1} + L_{c2}}{L_{bc}};$$

— для СМПВ ~~обоих типов~~ $\frac{th q_0}{q_0} (z_g - z_R)$;

$$q_0 = \frac{\tau_\theta}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\rho \cdot p_V C_D S_{\Pi\Theta} (S_K + S_C)}}{M(1+k_y)}; p_V = C_M \frac{\rho_{B3} u_B^2}{2};$$

$$k_y = \frac{\lambda_y}{M}; \lambda_y = 2\kappa_y (\lambda_{yC} + \lambda_{yK});$$

$$\lambda_{yC} \approx a_{yC} \frac{\rho \pi L_C (A - R_K)^2}{2}; \lambda_{yK} \approx a_{yK} \frac{\rho \pi L_K R_K^2}{2};$$

$$\kappa_y = 1 - \frac{0,4}{1 + 2,52 \left(\frac{2C_{\Pi}}{b_C} \right)^{4/3}} \left(\frac{A + R_K}{b_C} \right)^{0,53} \sqrt{\frac{4C_{\Pi}}{b_C}};$$

$$z_R = z_R^{(0)} - C_{\Pi} \frac{C_Z}{C_D} \frac{1 - \kappa_Z}{1 + \kappa_Z} \frac{S_K}{S_K + S_C};$$

$$z_R^{(0)} = \frac{0,5 C_C S_C (A - R_K) (1 + \Psi_C) + C_K S_K A (1 + \Psi_K)}{C_C S_C (1 + \Psi_C) + C_K S_K (1 + \Psi_K)};$$

$$\kappa_Z = \frac{C_C S_C \Psi_C + C_K S_K \Psi_K}{C_C S_C + C_K S_K};$$

$$C_D = \frac{C_C S_C (1 + \Psi_C) + C_K S_K (1 + \Psi_K)}{2(S_C + S_K)};$$

$$a_{yC} = \frac{4}{\pi^2} \left[1 + \frac{4}{3\lambda_*^2} (\lambda_* - \alpha_* + 1) \right];$$

$$a_z = 1,0 + (\lambda_* - \alpha_*) (\lambda_* - \alpha_* + 1);$$

$$\alpha_* = 1,5(1 + \lambda_*) - 0,5 \sqrt{1,0 + 10\lambda_* + \lambda_*^2 - \frac{32\beta_* \lambda_*}{\pi}};$$

$$\lambda_* = \frac{2(A + R_K)}{b_C}; \beta_* = \frac{b_C (A - R_K) + \pi R_K^2}{b_C (A + R_K)};$$

где $C_y \approx 1, 2$ — коэффициент боковой аэродинамической неинерционной силы для СМПВ типа А, определяемый так же, как и для традиционных судов; C_M — коэффициент аэродинамического момента неинерционной природы, определяемый для СМПВ типа А как для традиционного судна с поправочным коэффициентом κ_B на действие вертикальных аэродинамических сил [8]; $\varphi_{2\theta}(\vartheta)$ — поправочный коэффициент к неинерционному аэродинамическому кренящему моменту для СМПВ типа В на наличие экрана при угле крена ϑ [3]; $\delta M_{\text{КР1}}^{(1)}(\vartheta)$, $\delta M_{\text{КР1}}^{(2)}(\vartheta)$ — дополнительные аэродинамические моменты циркуляционной природы для СМПВ типа В при угле крена ϑ для статического накренения; $\delta M_{\text{КР2}}^{(1)}(\vartheta)$, $\delta M_{\text{КР2}}^{(2)}(\vartheta)$ — дополнительные аэродинамические моменты циркуляционной природы для СМПВ типа В при угле крена ϑ для динамического накренения; $F_{\text{Л}}$ — площадь лобового сопротивления для СМПВ; \bar{u}_B — средняя скорость устойчивого порывистого ветра на высоте $z_{\text{ПЭ}}$ над уровнем моря; u_B — скорость ветра в порыве или в шквале на высоте $z_{\text{ПЭ}}$ над уровнем моря; h_{BC} — высота стоек выше КВЛ (параметр, аналогичный вертикальному клиренсу катама-

рана); z_R — плечо статически приложенного ветрового кренящего момента для СМПВ при отсутствии хода; $z^{(0)}R$ — то же без учета вертикальных сил; \bar{z}_R — плечо динамически приложенного ветрового кренящего момента для СМПВ при отсутствии хода [1]; $l_\theta(\vartheta)$, $l_{\theta C}(\vartheta)$ — ордината диаграммы статической остойчивости СМПВ и диаграммы средних плеч СМПВ при угле крена ϑ соответственно; z_g — аппликата центра тяжести; C_D — коэффициент сопротивления боковому дрейфу СМПВ; ρ , ρ_{B3} — плотность воды и плотность воздуха соответственно; S_K — площадь сечения погруженного корпуса плоскостью, параллельной плоскости КВЛ и отстоящей на величину A от КВЛ, равная для круговых обводов площади диаметрального батокса для погруженного корпуса; S_C — площадь диаметрального батокса для погруженной части стойки; C_C , C_K — коэффициенты сопротивления боковому дрейфу для стойки и корпуса; Ψ_C , Ψ_K — коэффициенты влияния гидродинамического следа на величины C_C и C_K ; C_z — коэффициент засасывания (коэффициент вертикальной гидродинамической силы) при боковом дрейфе для корпуса [2]; b_C — наибольшая ширина стойки; τ_θ — период собственных бортовых колебаний СМПВ; λ_y — присоединенная масса корпуса и стоек в безграничной жидкости; λ_{yC} , λ_{yK} — то же для одной стойки и для одного погруженного корпуса; L_K — длина погруженного корпуса; α_{yC} — коэффициент присоединенной массы погруженного корпуса СМПВ при боковом смещении (для кругового и эллиптического сечений корпуса эта величина может быть принята равной единице); α_{yC} — коэффициент присоединенной массы стойки СМПВ при боковом смещении, определяемый по известным соотношениям Ландвебера–Маканьо; κ_y — поправка к присоединенной массе при боковом смещении в безграничной жидкости на взаимодействие корпусов [6]; b_C — наибольшая ширина стойки; C_{Π} — расстояние между ДП корпуса и стойки и ДП СМПВ в целом.

Расчет кренящего момента для СМПВ типа В основан на соответствующей эмпирической методике для полупогруженных буровых платформ (ПБУ) [3]. Поправка κ_B учитывает влияние вертикальных аэродинамических сил на опрокидывание [8].

Коэффициенты $C_{z\theta}$, $m_x(\theta)$, $C_{\varphi 1}$ и $C_{\varphi 2}$ обозначены на рис. 2, а–г. Далее приведены и приближенные аппроксимирующие формулы для этих коэффициентов. Для каждой регрессионной зависимости указан отвечающий ей коэффициент множественной корреляции R^2 . При этом для коэффициента $m_x(\theta)$ дополнительным параметром аппроксимации является параметр \bar{h}_{BC} , который изменяется в пределах от 0,13 до 0,33. График рис. 2, б относится только к одному значению этого параметра ($\bar{h}_{\text{BC}} = 0,13$), а регрессионные зависимости показаны для всей области изменения параметра \bar{h}_{BC} .

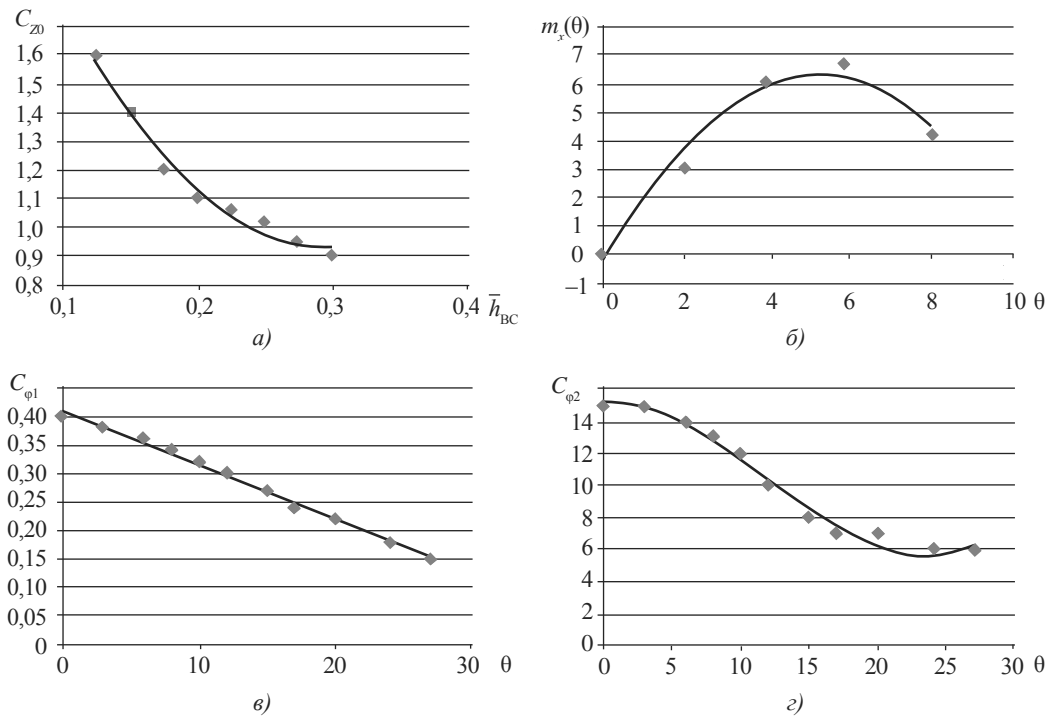


Рис. 2. Определение коэффициента C_{z0} (а), коэффициента $m_x(\theta)$ при $\bar{h}_{BC} = 0,13$ (б), коэффициента $C_{\phi 1}$ (в) и коэффициента $C_{\phi 2}$ (г)

Найти угол θ_* можно по рис. 3 (это экспериментальные данные из справочника [3]) либо по указанной ниже аппроксимирующей формуле. Кроме того, коэффициент $C_k \approx 0,55$, а величины C_c, Ψ_c, Ψ_k и C_z найдутся по рис. 4, а-г, там же приведены и соответствующие аппроксимирующие формулы. Аппроксимация выполнялась при помощи стандартного программного обеспечения в среде Excel. Кроме того, на рис. 4, а-г обозначено:

$$U_1 = \frac{(A - R_k)}{l_c} \text{ при } \frac{(A - R_k)}{l_c} \leq 1$$

$$\text{или } U_1 = \frac{l_c}{(A - R_k)} \text{ при } \frac{l_c}{(A - R_k)} \leq 1;$$

$$U_2 = \frac{2C_{\Pi}}{(A - R_k)}; U_3 = \frac{2C_{\Pi}}{R_k}.$$

Коэффициент $C_z \approx 0,9$ при круговом поперечном сечении погруженного корпуса, а при эллиптическом сечении величина U_4 на рис. 4, а есть отношение боль-

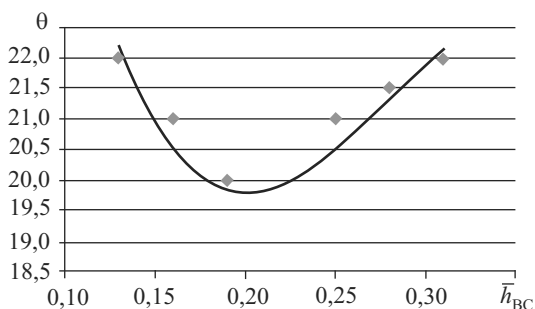


Рис. 3. Определение угла θ_* (в град)

шей полуоси эллипса к меньшей полуоси. Экспериментальные точки на рис. 4, а-в приняты по данным справочника [3], а на рис. 4, г — по данным работы [2].

Аппроксимирующие регрессионные зависимости для приведенных на рис. 2, а-б коэффициентов имеют следующий вид:

$$C_{z0} = 15,8\bar{h}_{BC}^2 - 10,48\bar{h}_{BC} + 2,672; R^2 = 0,981;$$

$$\bar{h}_{BC} = 0,16: m_x(\theta) = -0,155\theta^2 + 2,092\theta - 0,392; R^2 = 0,975;$$

$$\bar{h}_{BC} = 0,19: m_x(\theta) = -0,090\theta^2 + 1,522\theta - 0,146; R^2 = 0,913;$$

$$\bar{h}_{BC} = 0,22: m_x(\theta) = 0,002\theta^3 - 0,134\theta^2 + 1,732\theta - 0,566;$$

$$R^2 = 0,922;$$

$$\bar{h}_{BC} = 0,25: m_x(\theta) = 0,002\theta^3 - 0,118\theta^2 + 1,531\theta - 0,539;$$

$$R^2 = 0,926;$$

$$\bar{h}_{BC} = 0,28: m_x(\theta) = 0,001\theta^3 - 0,091\theta^2 + 1,297\theta - 0,346; R^2 = 0,905;$$

$$\bar{h}_{BC} = 0,31: m_x(\theta) = 0,001\theta^3 - 0,082\theta^2 + 1,218\theta - 0,417; R^2 = 0,897;$$

$$\bar{h}_{BC} = 0,33: m_x(\theta) = 0,001\theta^3 - 0,068\theta^2 + 1,068\theta - 0,341; R^2 = 0,924;$$

$$C_{\phi 1} = -0,009\theta + 0,410; R^2 = 0,995;$$

$$C_{\phi 2} = -0,001\theta^3 - 0,056\theta^2 + 0,049\theta + 15,2;$$

$$R^2 = 0,986.$$

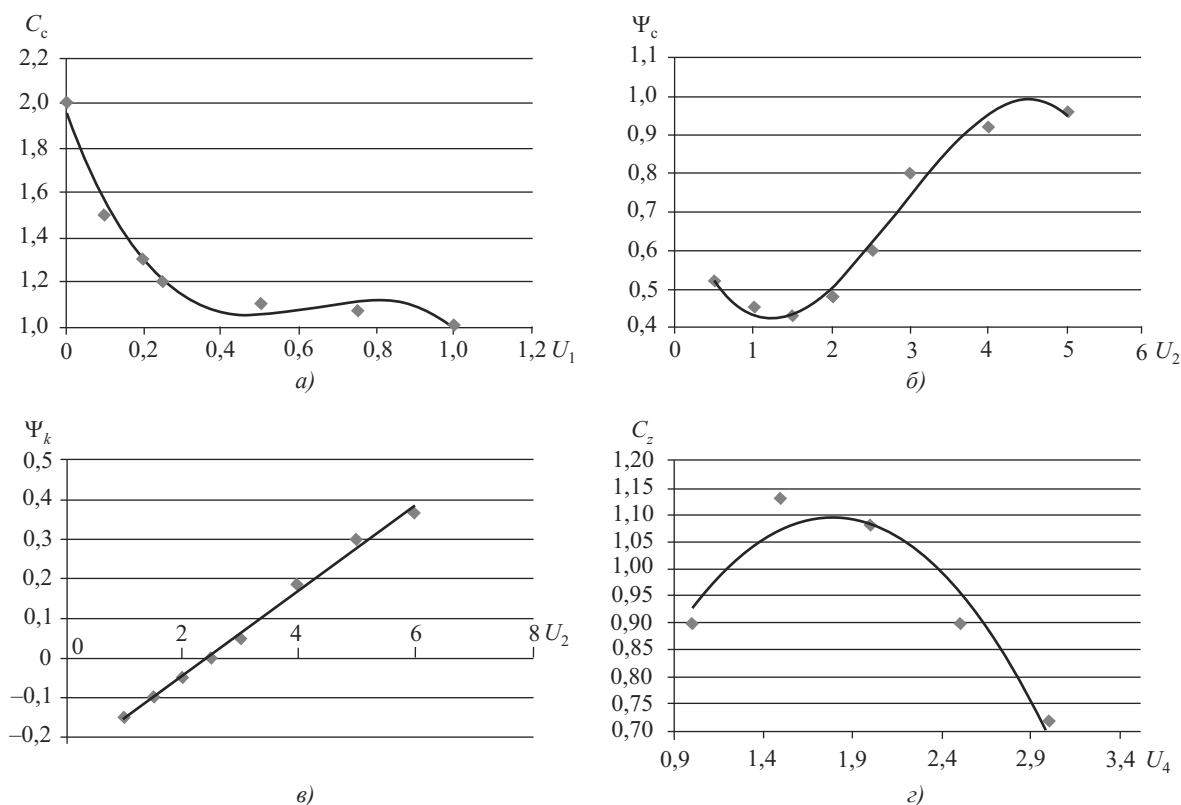


Рис. 4. Определение коэффициента C_c (а), коэффициента Ψ_c (б), коэффициента Ψ_k (е) и коэффициента C_z (z)

Аппроксимирующая формула для определения угла θ_* (в град) имеет вид:

$$\theta_* = -1356\bar{h}_{BC}^3 + 1177\bar{h}_{BC}^2 - 310,1\bar{h}_{BC} + 45,59;$$

$$R^2 = 0,867.$$

Аппроксимирующие зависимости для обозначенных на рис. 4, а-г коэффициентов представлены как:

$$C_C = -4,235U_1 + 8,057U_1^2 - 4,798U_1 + 1,964;$$

$$R^2 = 0,987;$$

$$\Psi_C = -0,031U_2^3 + 0,275U_2^2 - 0,532U_2 + 0,723;$$

$$R^2 = 0,982;$$

$$\Psi_{Л} = 0,109U_2 - 0,267; R^2 = 0,996;$$

$$C_z = -0,271U_4^2 + 0,967U_4 - 0,232; R^2 = 0,962.$$

По приведенным зависимостям выполнены сопоставительные расчёты кренящего момента для СМПВ и сравнены с результатами расчёта кренящего момента по Правилам [4]. Рассмотрим далее некоторые аспекты сопоставления.

В соответствии с Правилами [4] при проверке устойчивости используется схема устойчивого порывистого ветра. В этом случае на не зависящую в течение действия стационарного ветрового режима от времени составляющую скорости ветра, которой отве-

чает условное расчётное давление P , накладывается зависящая от времени пульсационная составляющая с коэффициентом порывистости $K_{\Pi} \approx 1,22-1,23$. Кренящий момент от воздействия на СМПВ постоянной составляющей скорости ветра, который ранее обозначили через $M_{КР1}$, в соответствии с Правилами [4] определяется как $M_{КР1} = PAZ$, где A — площадь парусности, вычисляемая, как и для традиционных судов, без какой-либо корректировки. Величина Z является в соответствии с Правилами [4] расчётным плечом кренящего момента, которое представляет собой возвышение центра парусности над серединой осадки. Поэтому в наших обозначениях для случая, когда начало координат расположено на основной плоскости, имеем $Z = z_{\Pi} - \frac{A + R_K}{2}$, где аппликата центра парусности z_{Π} вычисляется так же, как и для традиционных судов, без каких-либо корректировок. Условное расчётное давление статического ветра по Правилам [4] вычисляется как $P = 500 \left(\frac{\bar{u}_B}{26} \right)$, Па, где \bar{u}_B (в обозначениях [4] — V_w) — постоянная составляющая скорости устойчивого порывистого ветра, определяемая наихудшими допускаемыми условиями эксплуатации судна и измеряемая в м/сек. Очевидно поэтому, если $\bar{u}_B = 26$ м/сек, то тогда согласно Правилам [4] имеем $P = 500$ Па.

В соответствии с Правилами [4] значение $Z = z_{\Pi} - \frac{A + R_K}{2}$ сохраняется как для статической, так и для динамической составляющих кренящего момента. Тогда суммарный кренящий момент $M_{\text{кр}} = M_{\text{кр1}} + M_{\text{кр2}}$ по Правилам [4] находится как $M_{\text{кр}} = M'_{\text{кр}} = M_{\text{кр1}} K^2_{\Pi} \approx 1,5 M_{\text{кр1}}$. Этой величине отвечает безразмерный коэффициент кренящего момента $m'_{\text{кр}} = \frac{2M'_{\text{кр}}}{D(A + R_K)}$. Согласно предлагаемым

зависимостям имеем $M_{\text{кр}} = M'_{\text{кр}} = M_{\text{кр1}} + M_{\text{кр2}}$, где моменты $M_{\text{кр1}}$ и $M_{\text{кр2}}$ определялись по формулам (1)–(2) для СМПВ типа А и по формулам (3)–(4) для СМПВ типа В. Этой величине отвечает безразмерный коэффициент кренящего момента $m''_{\text{кр}} = \frac{2M''_{\text{кр}}}{D(A + R_K)}$, где D — весовое водоизмещение СМПВ.

Все расчёты выполнялись для постоянной составляющей скорости устойчивого порывистого ветра $\bar{u}_B = \bar{u}_B^{(0)} = 26 \text{ м/сек}$. Тогда при расчёте по Правилам [4] в обозначениях этих же Правил имеем $M'_{\text{кр}} = 1,5PAZ$, где $P = 500 \text{ Па}$.

Для обеспечения сопоставимости полученных результатов расчёт статического ветрового момента $M_{\text{кр1}}$ по формулам (1) и (3) выполнялся для $\bar{u}_B = \bar{u}_B^{(0)} = 26 \text{ м/сек}$, а расчёт динамического ветрового момента $M_{\text{кр2}}$ по формулам (2) и (4) — для скорости ветра в порыве $\bar{u}_B = \bar{u}_B^{(0)} = (K_{\Pi} - 1) \bar{u}_B^{(0)}$. Далее были произведены сопоставительные расчёты безразмерных коэффициентов ветрового кренящего момента $m'_{\text{кр}}$ и $m''_{\text{кр}}$ для СМПВ с аффинно преобразованной формой обводов в зависимости от коэффициента

$K = \sqrt[3]{\frac{D}{D_0}}$, где $D_0 = 7014 \text{ кН}$. Часть результатов расчётов приведена на рис. 5, из которого видно, что расчёт по Правилам, когда не принимаются во внима-

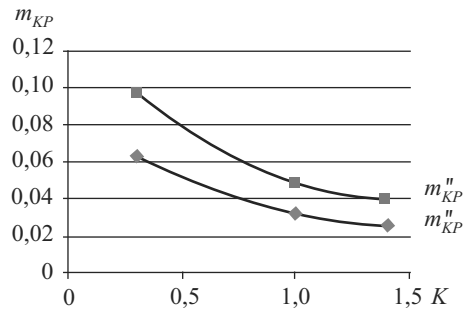


Рис. 5. Сопоставительный расчёт безразмерных коэффициентов кренящего момента для СМПВ типа А в соответствии с Правилами [4] (величина $m'_{\text{кр}}$) и по предлагаемому методу (величина $m''_{\text{кр}}$)

ние архитектурные особенности СМПВ, может вести к заметному завышению полученных результатов.

ВЫВОДЫ. 1. Разработана приближённая методика для определения действующего на СМПВ ветрового кренящего момента. Предлагаемая методика основана на экспериментальных данных и учитывает как действие вертикальных аэродинамических и гидродинамических сил, так и пространственность накренения.

2. В действующих Правилах классификации и постройки высокоскоростных судов [4] содержатся слишком обобщённые, с точки зрения авторов, нормативы остойчивости, не учитывающие специфики всех архитектурно-конструктивных типов многокорпусных судов.

3. Предлагаемые зависимости, учитывающие применительно к СМПВ указанную специфику, могут служить как для совершенствования текстов Правил в рамках концепции Rules Based Design, так и для обеспечения более адекватного взаимодействия между проектантом и администрацией классификационного общества в рамках концепции Risk Based Design.

4. Более корректный по сравнению с принятым в Правилах учёт особенностей СМПВ заметно влияет на результаты расчётов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Басин, А. М. Теоретические основы расчёта и нормирования остойчивости судов внутреннего плавания [Текст] / А. М. Басин, В. Н. Анфимов, Г. К. Авдеев // Труды ЦНИИ речного флота. — Л. : Речной транспорт, 1957. — Вып. 36. — С. 3 – 127.
- [2] Берестецкий, А. М. Приближённое определение кренящего момента при движении судна лагом [Текст] / А. М. Берестецкий // Сборник НТО им. акад. А. Н. Крылова. — Л. : Судостроение, 1972. — Вып. 185. — С. 144 – 149.
- [3] Девнин, С. И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций [Текст] / С. И. Девнин. — Л. : Судостроение, 1983. — 332 с.
- [4] Правила классификации и постройки высокоскоростных судов [Текст]. — СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2004. — 280 с.
- [5] Севастьянов, Н. Б. Остойчивость промысловых судов [Текст] / Н. Б. Севастьянов. — Л. : Судостроение, 1970. — 200 с.

- [6] **Соболев, Г. В.** Управляемость корабля и автоматизация судовождения [Текст] / Г. В. Соболев. — Л. : Судостроение, 1976. — 480 с.
- [7] **Соломенцев, О. И.** Анализ динамики опрокидывания двухкорпусного судна [Текст] / О. И. Соломенцев // Научно-технический сборник Регистра СССР. — М. : Внешторгиздат, 1991. — Вып. 17. — С. 74–88.
- [8] **Соломенцев, О. И.** О влиянии особенностей подводной и надводной архитектуры корабля с аутриггерами на его ветростойкость [Текст] / О. И. Соломенцев, Буй Ши Тао // Збірник наукових праць УДМТУ. — Миколаїв : УДМТУ, 2002. — № 5 (383). — С. 11–22.
- [9] **Хализев, О. А.** Проектная оценка остойчивости судов с малой площадью ватерлинии [Текст] / О. А. Хализев, А. Г. Безсалов // Перспективные направления в проектировании судов : Сборник научных трудов ЛКИ. — Л. : ЛКИ, 1983. — С. 65–69.
- [10] **Шостаков, В. П.** Критерии остойчивости судов с малой площадью ватерлинии [Текст] / В. П. Шостаков // Труды НКИ. — Николаев : НКИ, 1978. — Вып. 138. — С. 68–76.
- [11] **Goldberg, L. L.** Current Status of Stability and Buoyancy Criteria, Used by the US Navy for Advanced Marine Vehicles [Text] / L. L. Goldberg, R. G. Tucker // Naval Engineers Journal, 1975. — Vol. 87. — № 6.
- [12] **Vassalos, D.** Risk-Based Ship Design [Text] / D. Vassalos // In book “Risk-Based Ship Design Methods, Tools and Applications.” — Athens, 2009. — P. 17–94.

© О. И. Соломенцев, Л. Ю. Кондратьева

Надійшла до редколегії 07.04.2015

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