

УДК 656.61.052

РАСЧЕТ КРЕНА СУДНА НА ЦИРКУЛЯЦИИ

Пипченко А. Д., к.т.н., докторант Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: nav.researches@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6878-0619

В данной работе предложен метод расчета крена судна, возникающего при маневрировании. Дифференциальное уравнение второго порядка для бортовых наклонов было получено в виде комбинации независимых от частоты составляющих уравнения бортовой качки, нелинейного сопротивления и гидродинамических моментов на руле и корпусе, действующих относительно продольной оси. Полученные результаты могут быть использованы в качестве дополнения к математическим моделям движения судна, в которых первоначально не учитывается крен.

Ключевые слова: маневрирование судна, математическая модель маневрирования, крен при повороте.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами. Моделирование движения судна при маневрировании является одним из наиболее важных аспектов при исследовании проблем, связанных с судовождением. В зависимости от решаемых задач используются модели различной сложности. В подавляющем большинстве случаев нелинейную динамику движения судна описывают тремя дифференциальными уравнениями движения судна на плоскости. Однако для ряда судов с высоко расположенным центром тяжести, таких как контейнеровозы, го-го и другие, важным параметром также является крен судна на циркуляции. Последний далеко не всегда учитывается.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В основном, при разработке математических моделей движения судна крен на циркуляции не учитывается. Причиной этому являются попытки упростить нелинейную модель за счет исключения менее значимых степеней свободы из системы уравнений.

Однако согласно исследованиям группы японских ученых, проведенным в 2015 году в опытовом бассейне [4], остойчивость судна и связанные с ней бортовые наклоны значительным образом влияют на параметры поворотливости.

Методы определения крена судна при повороте упоминаются в работах [1, 4, 7]. В основном, предлагается определять угол бортового наклона по эмпирической модели, полученной в результате экспериментов в опытовом бассейне. Однако, в таком случае не представляется возможным определить крен судна на циркуляции без проведения соответствующего эксперимента.

В работах [5, 11] приведены теория и методы как построения моделей маневрирования судна, так и моделей качки. В современной практике расчетов динамики судна эти математические модели, в основном, принято разделять. При этом, в работе [1] приведена теоретическая база, позволяющая объединить в единую систему колебательные движения, вызванные волнением, и маневрирование, имеющее нелинейный характер.

Формулирование целей статьи (постановка задачи). Целью данного исследования является разработка метода определения крена судна на циркуляции для существующих математических моделей движения, в которые уравнение бортовых наклонов изначально не включено.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов. Математическая модель маневрирования судна с учетом бортовых наклонов, базируясь на модели движения на плоскости из работы [9] с добавлением уравнения колебаний относительно продольной оси будет, выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_{11})\dot{u}_G - (m + m_{22})v_G r_G &= X \\ (m + m_{22})\dot{v}_G + (m + m_{11})u_G r_G &= Y \\ (I_{44} + J_{44})\dot{p}_G &= K \\ (I_{66} + J_{66})\dot{r}_G &= N - x_G Y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где m – массовое водоизмещение судна; m_{11} , m_{22} – присоединенные массы, I_{44} , I_{66} – моменты инерции, J_{44} , J_{66} – присоединенные моменты инерции, u_G , v_G , p_G , r_G – продольная и поперечная составляющие поступательной скорости и угловые скорости относительно поперечной и вертикальной осей относительно центра тяжести судна соответственно; X , Y , K , N – гидродинамические силы и моменты, действующие на судно.

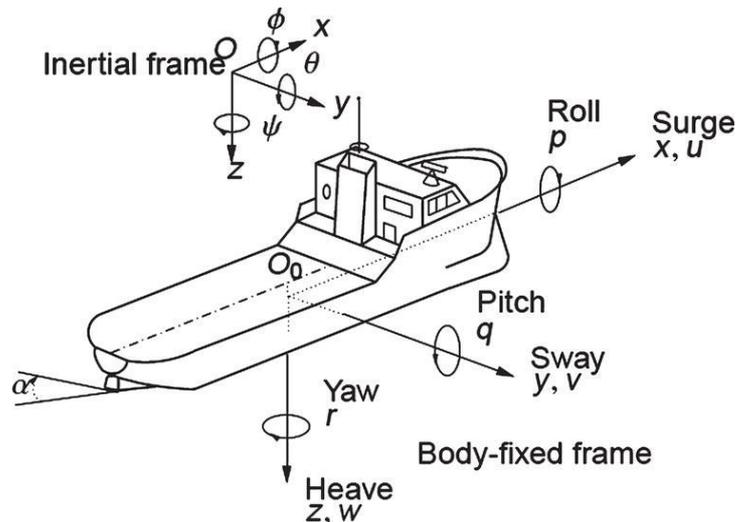


Рисунок 1 – Системы координат для моделирования движения судна

В развернутом виде гидродинамические силы и моменты представим как:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P + X_W \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_P + Y_W + Y_{BT} \\ K &= K_H + K_R + K_W + K_{BT} \\ N &= N_H + N_R + N_P + N_W + N_{BT} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где H – корпус; R – руль; P – винт; W – ветер; BT – носовое подруливающее устройство.

Силы и моменты, выражающие движение на плоскости, примем в форме, предложенной Йошимуро [9].

Третье уравнение (уравнение для крена судна) системы (1) будем рассматривать далее отдельно. Коэффициенты гидродинамических сил на корпусе согласно работе [9] рассчитываются полуэмпирическим методом на основе аппроксимации результатов испытаний в опытовом бассейне без выделения влияния крена и скорости бортовых колебаний в отдельную группу коэффициентов. Таким образом, целесообразно будет предположить, что влияние бортовых колебаний на маневренность судна на тихой воде косвенно учтено в результате аппроксимации.

На основе [5] уравнение бортовых колебаний запишем как:

$$\left. \begin{aligned} a_{42} \cdot \dot{v}_G + b_{42} \cdot v_G + \\ (I_{kk} + a_{44})\dot{p}_G + b_{44} \cdot p_G + c_{44} \cdot \varphi + \\ + a_{46} \cdot \dot{r}_G + b_{46} \cdot r_G &= K, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где a – коэффициенты инерционных сил; b – коэффициенты демпфирующих сил; c – коэффициент восстанавливающих сил, K – суммарный кренящий момент; φ – угол

крена; индексы 1,2,3 – соответствуют линейным перемещениям по продольной, поперечной и вертикальной осям; индексы 4,5,6 – соответствуют вращательным движениям относительно продольной (крен), поперечной (дифферент) и вертикальной (рыскание) осей судна.

В отличие от бортовой качки на волнении, наклон судна во время маневра не имеет периодического характера и также, как и угловая скорость в процессе маневра, доходит до максимума, а затем снижается до устойчивого значения.

Согласно работе [5] коэффициенты демпфирующих сил при кажущейся частоте волнения, близкой к нулю, также равны нулю, кроме коэффициента b_{46} , который зависит от присоединённых масс и коэффициента b_{44v} , выражающего нелинейное вязкостное демпфирование.

Основываясь на работе [5], коэффициенты a_{42} , a_{44} , a_{46} , b_{46} с учетом преобразований, связанных с тем, что кажущаяся частота волнения равна нулю, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{42} &= m_{42} + OG \cdot m_{22}; \\ a_{44} &= m_{44} + m_{42} + OG \cdot (m_{24} + OG \cdot m_{22}); \\ a_{46} &= (m_{42} + OG \cdot m_{22}) \cdot L; \\ b_{46} &= -u \cdot (m_{42} + OG \cdot m_{22}). \end{aligned}$$

где m_{ii} – коэффициенты присоединенных масс, которые можно определить методами, описанными в работах [5, 8, 9, 11]; OG – длина перпендикуляра, опущенного из центра тяжести на плоскость ватерлинии; L – длина судна между перпендикулярами; u – поступательная скорость судна.

Коэффициент b_{44v} можно определить методом Икеда [2], исключив при этом составляющие зависимые от кажущейся частоты волнения:

$$b_{44v} = b_{44f}(\varphi_a, \omega_n, u) + b_{44l}(u), \quad (4)$$

где b_{44f} – коэффициент трения, b_{44l} – подъемный коэффициент, φ_a – амплитудное значение бортовой качки; ω_n – собственная частота бортовых колебаний.

Коэффициенты b_{44f} , b_{44l} также зависят и от геометрических параметров погруженной части корпуса, однако при моделировании в определенном состоянии загрузки их можно считать постоянными.

Натуральную частоту колебаний будем определять из периода бортовой качки как:

$$\omega_n = \frac{1}{T_\varphi}, \quad (5)$$

В свою очередь, период качки можно определить по эмпирической формуле ИМО, приведенной в [3]:

$$T_\varphi = \frac{2 \cdot C \cdot B}{\sqrt{GM}}; \quad (6)$$

$$C = 0.373 + 0.023 \left(\frac{B}{d} \right) - 0.043 \left(\frac{L}{100} \right),$$

где B – ширина судна, d – осадка, GM – метацентрическая высота.

Однако для контейнеровозов класса пост-панамакс следует использовать формулу, рекомендуемую в [10], ввиду наличия больших погрешностей при вычислении периода качки по обобщенной формуле:

$$T_{\varphi} = 2\pi \sqrt{\frac{R^2}{g \cdot GM}} \quad (7)$$

где R – радиус инерции судна.

Восстанавливающий момент в уравнении выражен как $c_{44} \cdot \varphi$. В свою очередь:

$$c_{44} = GM \cdot g \cdot m, \quad (8)$$

где m – масса судна, g – ускорение свободного падения.

Формула (8) справедлива в линейном диапазоне углов крена. Для больших углов крена ($>15^\circ$) более корректным будет расчёт восстанавливающего момента в виде:

$$K_{\varphi} = gm \cdot l(\varphi), \quad (9)$$

где $l(\varphi)$ – плечо статической остойчивости.

В результате дифференциальное уравнение бортовой качки можно записать в виде:

$$(I_{kk} + J_{kk}) \dot{p}_G = a_{42} \cdot \dot{v}_G - a_{46} \cdot \dot{r}_G - b_{46} \cdot r_G - b_{44v} \cdot p_G - c_{44} \cdot \varphi - K_R - K_H, \quad (10)$$

где K_R – кренящий момент под действием рулевого устройства; K_H – кренящий гидродинамический момент.

$$K_R = Y_R \cdot (z_G - z_R); K_H = Y_H (z_G - z_H),$$

где Y_R – боковая сила, создаваемая на перекладке руля; Y_H – боковая сила сопротивления движению. z_R – аппликата центра эффективной площади руля; z_H – аппликата центра погруженной части корпуса.

Одним из аргументов функции является амплитуда колебаний φ_a . Так как судно не подвергается качке, а испытывает единоразовое наклонение, фазу можно считать равной текущему значению крена. В таком случае расчетная кривая бортового наклонения в повороте будет выглядеть, как показано на рис. 2.

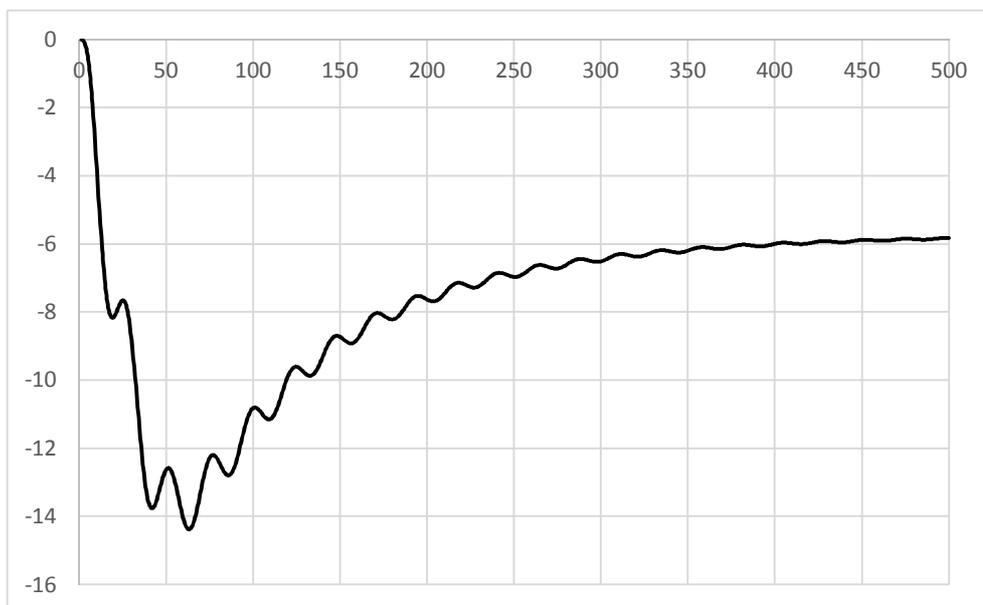


Рисунок 2 – Наклонение судна φ ($^\circ$) в повороте при перекладке руля 35° с переменной амплитудой колебаний

Однако, в реальных условиях при отсутствии внешних возмущений данная кривая будет гладкой. Для того чтобы исключить колебания более высокого порядка из результатов расчетов, присвоим значению φ_a фиксированное значение, равное максимальному углу наклонения при испытаниях, в нашем случае 20° .

С учетом последнего можно получить результат, отображенный на рис. 3.

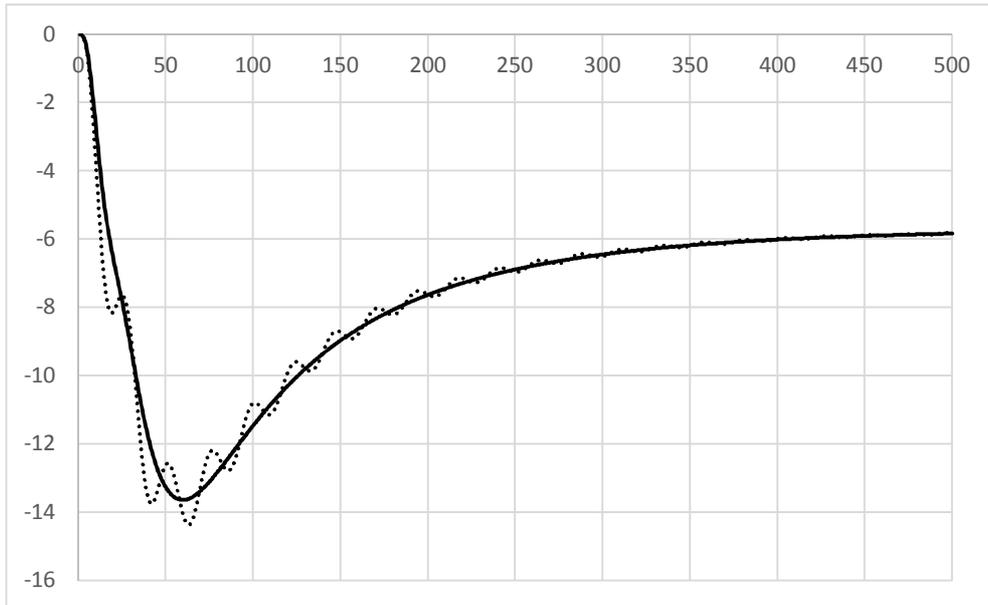


Рисунок 3 – Наклонение судна φ (°) в повороте при перекладке руля 35°

Промоделировав маневры циркуляции с различными углами перекладки руля были получены кривые бортового наклонения судна, приведенные на рис. 4.

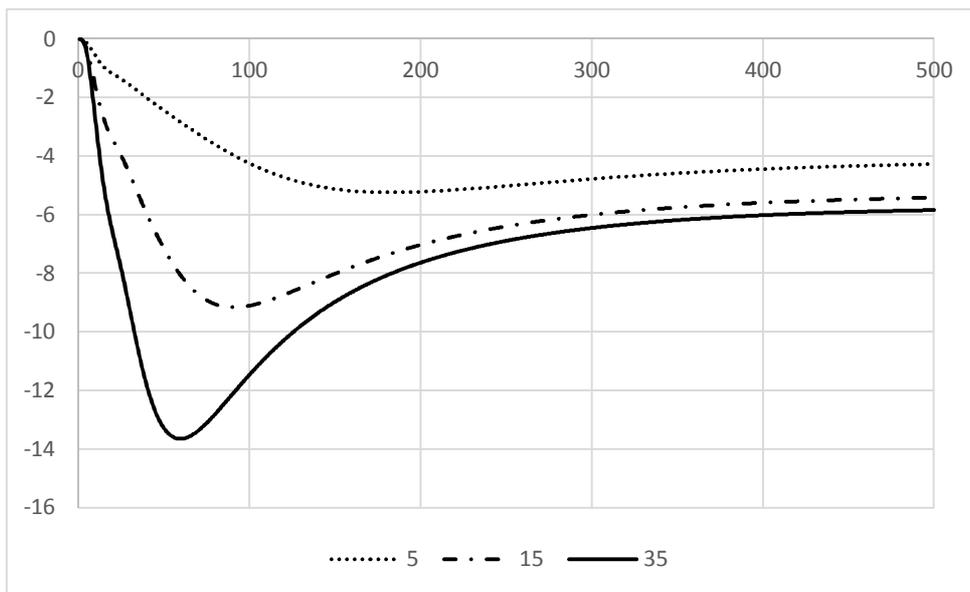


Рисунок 4 – Расчетные кривые наклонения судна в повороте при перекладках руля 5, 15 и 35°

Расчетные траектория и параметры движения контейнеровоза класса панамакс при перекладке руля «право на борт» с начальной скоростью 24 узла приведены на рис. 5.

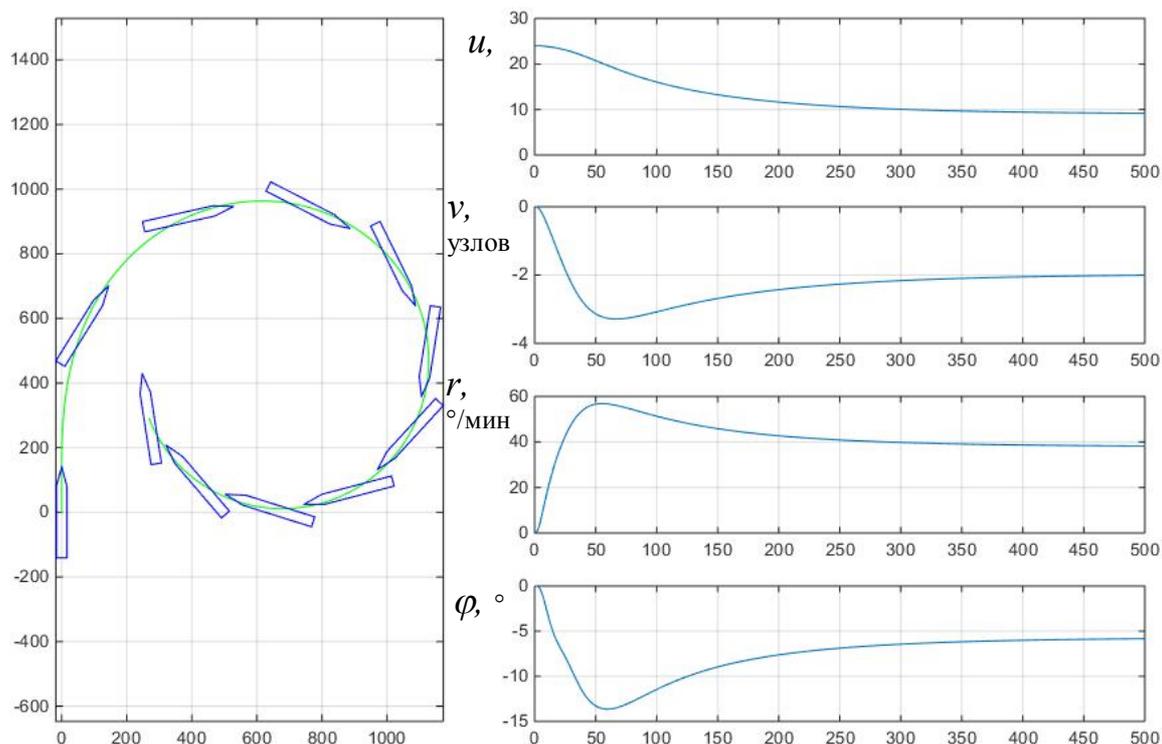


Рисунок 5 – Расчетные параметры циркуляции контейнеровоза класса панамакс

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.

В результате проведенного исследования был разработан метод расчета крена судна на циркуляции. Предложено дифференциальное уравнение бортовых наклонений второго порядка, которое может быть добавлено к стандартной модели маневрирования судна на плоскости с целью учета крена на циркуляции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fossen T. I. Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles / T. I. Fossen. – Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002. – 570 p.
2. Ikeda Y. A Prediction Method for Ship Rolling. Technical Report 00405 / Ikeda, Y., Himeno, Y., and Tanaka, N. // Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, Japan, 1978.
3. IMO Code on Intact Stability (IS), 2009.
4. Investigation of effect of roll motion on manoeuvrability using 4-dof mathematical model / Fukui Y., Yoshimura Y., Yano H., Kondo M. // Proceedings of MARIM-2015, 2015.
5. Journée J.M.J. Theoretical Manual of Strip Theory Program «SEAWAY for Windows». Report 1370. / J.M.J. Journée, L.J.M. Adegeest. – TU Delft/AMARCON, 2003. – 336 p.
6. Kijima K. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics / Kijima K., Tanaka S. Furukawa, Y. and Hori T. // Proc. of MARSIM-93, Vol.1, 1993. – Pp.285–294.
7. Perez T. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. (Technical Report) / T. Perez, M. Blanke. – DTU Technical University of Denmark, 2003. – 22 p.
8. Tasai F. Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface / Technical report, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan. Vol. IX, No 35, 1961.
9. Yasukawa H. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions / Yasukawa H., Yoshimura Y. // Journal of Marine Science & Technology. – 2015. – Pp. 37–52.

10. Милетин А. В. Расчет периода качки контейнеровозов // Судовождение : Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 24. – Одесса : «ИздатИнформ», 2014. – С.116–122.
11. Справочник по теории корабля. В трех томах / [под ред. Я. И. Войткунского] – Л. : Судостроение, 1985.

REFERENCES

1. Fossen T. I. Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles / T. I. Fossen. – Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002. – 570 p.
2. Ikeda Y. A Prediction Method for Ship Rolling. Technical Report 00405 / Ikeda, Y., Himeno, Y., and Tanaka, N. // Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture, Japan, 1978.
3. IMO Code on Intact Stability (IS), 2009.
4. Investigation of effect of roll motion on manoeuvrability using 4?dof mathematical model / Fukui Y., Yoshimura Y., Yano H., Kondo M. // Proceedings of MARIM-2015, 2015.
5. Journee J.M.J. Theoretical Manual of Strip Theory Program «SEAWAY for Windows». Report 1370. / J.M.J. Journee, L.J.M. Adegeest. – TU Delft/AMARCON, 2003. – 336 p.
6. Kijima K. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics / Kijima K., Tanaka S. Furukawa, Y. and Hori T. // Proc. of MARSIM-93, Vol.1, 1993. – Pp.285–294.
7. Perez T. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. (Technical Report) / T. Perez, M. Blanke. – DTU Technical University of Denmark, 2003. – 22 p.
8. Tasai F. Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface / Technical report, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan. Vol. IX, No 35, 1961.
9. Yasukawa H. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions / Yasukawa H., Yoshimura Y. // Journal of Marine Science & Technology. – 2015. – Pp. 37–52.
10. Miletin A. V. Raschet perioda kachki konteynerovozov // Sudovozhdenie : Sb. nauchn. trudov / ONMA, Vihp. 24. – Odessa : «IzdatInform», 2014. – S.116–122.
11. Spravochnik po teorii korablya. V trekh tomakh / [pod red. Ya. I. Voyjtkunskogo] – L.: Sudostroenie, 1985.

Пипченко А. Д. РАСЧЕТ КРЕНА СУДНА НА ЦИРКУЛЯЦИИ

В данной работе предложен метод расчета крена судна, возникающего при маневрировании. Дифференциальное уравнение второго порядка для бортовых наклонений было получено в виде комбинации независимых от частоты составляющих уравнения бортовой качки нелинейного сопротивления и гидродинамических моментов на руле и корпусе, действующих относительно продольной оси. Полученные результаты могут быть использованы в качестве дополнения к математическим моделям движения судна, в которых первоначально не учитывается крен.

Ключевые слова: маневрирование судна, математическая модель маневрирования, крен при повороте.

Pipchenko O. D. ESTIMATION OF VESSEL HEEL DUE TO TURNING

In this study an estimation method for vessel heeling due to turn has been proposed. A second order differential equation of rolling motion has been obtained as combination of frequency independent rolling motion coefficients basing on potential theory, empirical methods for roll viscous damping and transformation of transverse hydrodynamic forces into corresponding moments acting along the longitudinal axis. Obtained results can be used as an addition to mathematical models of ship motion, which originally do not include rolling.

Keywords: vessel maneuvering, mathematical model of maneuvering, heeling due to turn.

© Пипченко О. Д.

Статтю прийнято
до редакції 07.03.17