

Определение максимального значения горизонтальной составляющей сил инерций, действующей на груз при качке судна

Е. А. Власенко, И. А. Бурмака
<https://doi.org/10.31174/NT2018-158VI18-21>

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина
Corresponding author. E-mail: burmaka-mob@ukr.net

Paper received 24.01.18; Accepted for publication 29.01.18.

Аннотация. Предложены формулы расчета текущих значений углов крена и дифферента, возникающих при качке судна. Приведены аналитические выражения для оценки значений продольной и поперечной составляющих сил инерции, порождаемые бортовой, килевой и вертикальной качкой судна.

Разработана процедура расчета максимального значения горизонтальной составляющей сил инерций, действующей на груз при качке судна, причем получено выражение расчета момента времени достижения максимума горизонтальной составляющей методом простых итераций и ее величины. Приведен численный пример расчета составляющих сил инерции с помощью компьютерной программы.

Ключевые слова: мореходная безопасность, качка судна, силы инерции и их составляющие.

Введение. В настоящее время мировое сообщество уделяет все большее внимание обеспечению безопасности судоходства путем повышения его надежности и уменьшения вероятности аварийных случаев, применяя системы международных и национальных мероприятий технического, технологического, организационного и правового характеров.

Ряд вопросов безопасности мореплавания требует постоянного исследования в соответствии с современными запросами торгового флота. К таким вопросам относится обеспечение мореходного состояния судна, которое в определяющей мере зависит от корректности его загрузки.

Особенностями загрузки контейнеровозов, которые усложняют расчет предварительного грузового плана, является необходимость учета ротации портов при загрузке или разгрузке в нескольких портах и учет сил инерции, воздействующих на груз при качке. Если судно принимает груз, который будет выгружаться частями в нескольких последовательных портах, то на каждом переходе между портами его мореходное состояние будет разным, что поведет к изменению сил инерции, которым будет подвергаться груз во время перехода. Во время каждого перехода параметры остойчивости, посадки и прочности судно должны находиться в допустимых пределах, а возникающие силы инерции от его качки, не должны превосходить допустимых пределов. Поэтому при загрузке контейнеровоза с последующей разгрузкой в нескольких портах размещение груза должно производиться с учетом последовательности портов выгрузки, чтобы доступ к необходимым партиям груза был свободен, а также с учетом того, что все промежуточные состояния загрузки отвечали требованиям мореходности судна, а возникающие силы инерции находились в допустимых пределах.

Краткий обзор публикаций по теме. Проблеме обеспечения надлежащего уровня мореходной безопасности судов посвящен ряд работ. В работе [1] рассмотрены основные принципы обеспечения мореходной безопасности судов. Исследование корреляционной зависимости между формой корпуса судна и его диаграммы статической остойчивости выполнено в работе [2]. Получена аппроксимированная формула расчета метацентрической высоты и проведено исследование задачи синтеза формы корпуса с заданной величиной метацентрической высоты. В работе [3] приводится модель бор-

товой качки накатных судов с уравнивающим расположением помещений при затоплении их части и проведено ее исследование.

В патенте [4] рассмотрен способ обеспечения плавучести аварийного судна типа RO-RO и паромов, предусматривающий закрытые емкости, установленные по бортам и под палубой вдоль и поперек судна. Они обеспечивают плавучесть аварийного судна при появлении недопустимого крена. Как указывается в статье [5], на базе многолетнего опыта эксплуатации судов в арктических районах собран статистический материал и разработаны методы расчетов запаса надежности судовых конструкций.

Опыт применения Германским Ллойдом различных численных методов оценки прочности и вибрации судна описывается в работе [6] и показано, что наиболее эффективным является метод конечных элементов. В работе [7] описываются метод подкрепленной панели, метод расчета предельной прочности продольных балок корпуса судна и метод расчета диаграммы нагрузок и анализа последовательного разрушения при заданных начальных деформациях и остаточных напряжениях.

Общие принципы оптимизации грузовых операций навалочных судов рассмотрены в работе [8], а работа [9] посвящена учету особенностей загрузки генеральных грузов и выбору ее оптимального варианта.

Цель. Целью настоящей статьи является разработка процедуры расчета максимального значения горизонтальной составляющей сил инерций, действующей на груз, в частности контейнер, при качке судна.

Материалы и методы. Известно, что для расчета сил инерции необходимо знать линейные ускорения, воздействующие на груз, которые зависят от закономерностей изменения линейных перемещений груза вместе с палубой судна относительно опорной системы координат.

В общем случае движение судна характеризуется шестью степенями свободы и описывается шестью связанными дифференциальными уравнениями. В работе [10] показано, что для расчета линейных ускорений в первом приближении можно применить линейные модели бортовой, килевой и вертикальной качки, используя соответствующие изолированные уравнения. Как указывается в работе [1], уравнения поперечной, продольной и вертикальной качки в ситуации поиска сил инерции, воздействующих на груз, можно рассматривать незави-

симо. Причем определяющей является бортовая качка, порождающая доминирующие силы инерции. Поэтому вначале приведем уравнение бортовой качки, воспользовавшись дифференциальным уравнением, описывающее угол крена θ судна, которое приведено в работе [10]:

$$(J_x + m_x)\ddot{\theta} + \mu_x \dot{\theta} + Dh_o \theta = \chi_o Dh_o \sin \omega_k t, \quad (1)$$

где J_x - момент инерции судна относительно продольной оси X-X;

m_x - обобщенные присоединенные массы воды относительно той же оси X-X;

μ_x - коэффициент демпфирования относительно оси X-X;

D - водоизмещение судна (сила тяжести);

h_o - поперечная начальная метацентрическая высота;

χ_o - редуцированный коэффициент при бортовой качке;

ω_k - кажущаяся частота волнения.

Уравнение (1) записывается в виде:

$$\ddot{\theta} + 2h\dot{\theta} + \omega_o^2 \theta = \chi_o \omega_o^2 \sin \omega_k t, \quad (2)$$

где $h = \frac{\mu_x}{2(J_x + m_x)}$ - коэффициент затухания;

$\omega_o^2 = \frac{Dh_o}{(J_x + m_x)}$ - собственная частота судна при бор-

товой качке.

Уравнение (2) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, и его решение является суммой частного решения θ_r и решения соответствующего однородного уравнения. Так как амплитуда собственных затухающих колебаний судна достаточно быстро обращается в ноль, то уравнение бортовой качки, как стационарный процесс, согласно работе [10], можно характеризовать только вынужденными колебаниями судна относительно оси X-X под воздействием регулярного волнения:

$$\theta = \theta_o \sin(\omega_k t - \psi), \quad (3)$$

где $\theta_o = \frac{\chi_o \omega_o^2}{[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}}$ - амплитудное значение угла крена;

$\psi = \arctg(\frac{2h\omega_k}{\omega_o^2 - \omega_k^2})$ - начальная фаза.

В работах [1, 10] показано, что в случае продольной качки судно совершает вынужденные колебания с частотой качки ω_k , так же как и при поперечной. Изолированное уравнение продольной качки и его решение по своей структуре аналогичные поперечной качке, т.е. содержит собственные затухающие колебания судна и вынужденные гармонические колебания с частотой качки. Поэтому выражение для текущего значения угла дифферента β также описывается вынужденными гармоническими колебаниями с частотой качки ω_k :

$$\beta = \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_\beta), \quad (4)$$

где β_m - амплитудное значение угла дифферента β ;

ψ_β - начальная фаза продольных колебаний.

Аналитические выражения для β_m и ψ_β имеют следующий вид:

$$\beta_m = \frac{\chi_\beta \omega_{o\beta}^2}{[(\omega_{o\beta}^2 - \omega_k^2)^2 + 4h_\beta^2 \omega_k^2]^{1/2}},$$

$$\psi_\beta = \arctg(\frac{2h_\beta \omega_k}{\omega_{o\beta}^2 - \omega_k^2}).$$

где χ_β - редуцированный коэффициент при килевой качке;

$\omega_{o\beta}$ - собственная частота судна при килевой качке;

h_β - коэффициент затухания при килевой качке.

В работе [1] указывается, что вертикальная поступательная качка вызвана орбитальным движением судна, которое считается круговым с радиусом, равным половине высоты волны. Вертикальное поступательное движение ζ носит гармонический характер с частотой качки ω_k и описывается выражением:

$$\zeta = \zeta_o \sin(\omega_k t), \quad (5)$$

где $\zeta_o = 0,5h_w$ - амплитудное значение вертикального перемещения, причем h_w - высота волны.

Полученные выражения (3), (4) и (5) позволяют рассчитать угловые ускорения от качки судна, а также линейные ускорения и силы инерции, действующие на груз.

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных аналитических исследований получены выражения для продольной F_{X1} и поперечной F_{Y1} составляющих сил инерции:

$$F_{X1} = m_c \omega_k^2 [\Delta Z \beta_o \sin(\omega_k t - \psi_\beta) - (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \cos \theta \sin \beta]$$

$$F_{Y1} = m_c \omega_k^2 [\Delta Z \theta_o \sin(\omega_k t - \psi) + (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \sin \theta] \quad (6)$$

где $\beta = \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_\beta)$, $\theta = \theta_m \sin(\omega_k t - \psi)$, в которых приведенная амплитуда и начальная фаза определяются полученными ранее выражениями, m_c - масса груза, ΔZ - расстояние между центрами масс груза и судна по высоте.

Найдем максимальное значение суммы горизонтальных проекций F_{X1} и F_{Y1} , которую обозначим F_{H1} . Очевидно:

$$F_{H1} = \sqrt{F_{X1}^2 + F_{Y1}^2}. \quad (7)$$

Для поиска максимального значения F_{H1} необходимо найти первую производную по времени выражения (7), из которой определяется время t_H достижения максимума F_{H1} , а затем - и сам максимум суммарной горизонтальной составляющей сил инерции $\max F_{H1}$, действующей на груз в процессе бортовой и килевой качки судна.

Очевидно, аналитическое выражение первой производной горизонтальной составляющей сил инерции на качке F_{HI} имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} F_{HI} = F_{HI}^{-1} (F_{X1} \frac{\partial F_{X1}}{\partial t} + F_{Y1} \frac{\partial F_{Y1}}{\partial t}).$$

С учетом полученных выражения для F_{X1} и F_{Y1} (6) находим их производные $\frac{\partial F_{X1}}{\partial t}$ и $\frac{\partial F_{Y1}}{\partial t}$, поэтому уравнение для поиска момента времени t_H принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} & [q_\beta \sin(\omega_k t_H - \psi_\beta) - (q_g + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \cos \theta \sin \beta] \times \{q_\beta \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - 0,5h_w \cos \omega_k t_H \cos \theta \sin \beta - \\ & - (q_g + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) [\beta_m \cos \theta \cos \beta \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - \theta_m \sin \beta \sin \theta \cos(\omega_k t_H - \psi)]\} + \\ & + [q_\theta \sin(\omega_k t_H - \psi) + (q_g + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \sin \theta] \times \\ & [q_\theta \cos(\omega_k t_H - \psi) + 0,5h_w \cos \omega_k t_H \sin \theta + \\ & + (q_g + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \theta_m \cos(\omega_k t_H - \psi) \cos \theta] = 0, \end{aligned}$$

$$\text{где } q_\beta = \Delta Z \beta_m, \quad q_\theta = \Delta Z \theta_m, \quad q_g = \frac{g}{\omega_k^2}.$$

После несложных преобразований из последнего выражения получим уравнение для расчета момента времени t_H методом простых итераций:

$$\begin{aligned} t_H = \frac{1}{\omega_k} \{ & \psi_\beta + \arcsin \{ \frac{1}{\Delta Z \beta_m} \{ (-\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \cos \theta \sin \beta - \{ \Delta Z \beta_m \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - 0,5h_w \cos \omega_k t_H \cos \theta \sin \beta - \\ & - (-\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) [\beta_m \cos \theta \cos \beta \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - \theta_m \sin \beta \sin \theta \cos(\omega_k t_H - \psi)] \}^{-1} \\ & \times [\Delta Z \theta_m \sin(\omega_k t_H - \psi) + (-\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \sin \theta] \times \\ & [\Delta Z \theta_m \cos(\omega_k t_H - \psi) + 0,5h_w \cos \omega_k t_H \sin \theta + \\ & + (-\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \theta_m \cos(\omega_k t_H - \psi) \cos \theta] \} \} \end{aligned}$$

Следовательно, максимальное значение горизонтальной составляющей $\max F_{HI}$ определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \max F_{HI} &= \sqrt{F_{X1}(t_H)^2 + F_{Y1}(t_H)^2}, \text{ ИЛИ} \\ \max F_{HI} &= m_c \omega_k^2 \{ [\Delta Z \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_\beta) - (-\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \cos \theta \sin \beta]^2 + \\ & + [\Delta Z \theta_m \sin(\omega_k t - \psi) + (-\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \sin \theta]^2 \}^{1/2}. \end{aligned}$$

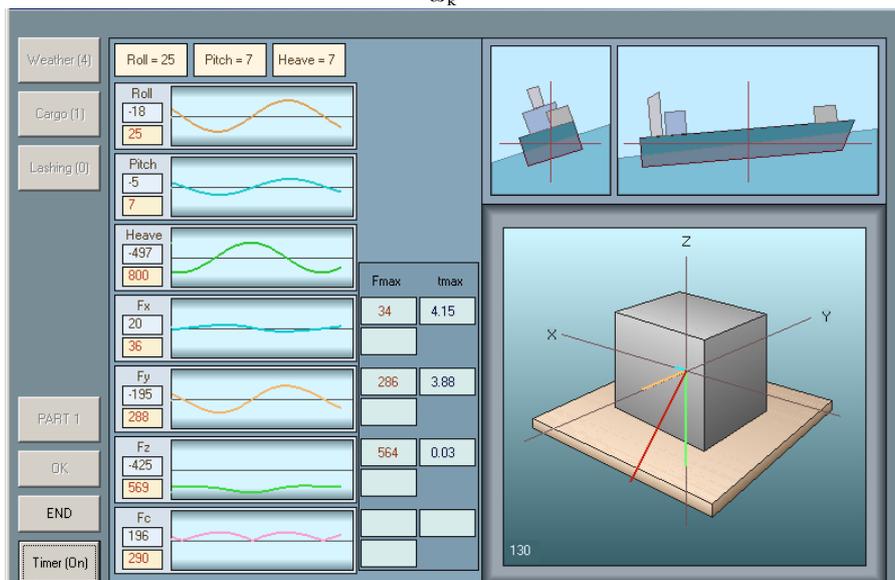


Рис. 1. Оценка значений составляющих сил инерции, действующих на груз при качке судна

Для расчета максимального значения горизонтальной составляющей $\max F_{HI}$ сил инерции была разработана компьютерная программа, которая также мо-

делирует процесс качки судна и производит оценку текущих значений продольной, поперечной и вертикальной составляющих сил инерции. На рис.1 приве-

ден интерфейс программы, из которого следует, что при заданных исходных данных получены следующие значения горизонтальных составляющих сил инерции $\max F_{X1} = 34 \text{ кН}$, $\max F_{Y1} = 286 \text{ кН}$ и $\max F_{H1} = 290 \text{ кН}$, а также рассчитаны текущие значения составляющих $F_{X1} = 20 \text{ кН}$, $F_{Y1} = -196 \text{ кН}$ и $F_{H1} = 196 \text{ кН}$.

Выводы

1. Приведены аналитические выражения для текущих значений параметров качки, существенно влияющих на возникновение сил инерции.
2. Предложены формулы для оценки значений продольной и поперечной составляющих сил инерции,

возникающих от бортовой, килевой и вертикальной качки судна.

3. Разработана процедура расчета максимального значения горизонтальной составляющей сил инерций, действующей на груз при качке судна. Получено выражение расчета момента времени достижения максимума упомянутой составляющей с помощью метода простых итераций, а также ее величины.

4. Показан численный пример расчета составляющих сил инерции с помощью компьютерной программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сизов В.Г. Теория корабля. – Одесса: Феникс, 2003. – 282 с.
2. Simonovich Milivoje. The correlation of ship hull form and her static stability diagram./ Simonovich Milivoje, Sizov Victor G, Vorobjov Yuri L. // 21 Jugosloven. kongr. teor. i primenjene meh., Nis, 29 maj – 3 jun. - 1995. - P. 167-173.
3. Xia Jinzhu. A dynamic model for roll motion of ships due to flooding / Xia Jinzhu, Jensen Jorgen, Pedersen Preben Ternstrup // Schiffstechnik. – 1999. – 46, № 4. – P. 208-216.
4. RO-RO ship/ferry with buoyancy tanks to prevent capsizing/ Заявка 2264665 Великобритания МКИ6 В 63 В 43/12 / Shatawy Ahmed Ahmed El. - № 9422061.3; Заявл. 2.11.94; Опубл. 8.5.96; НКИ В7А.
5. Kulesh Victor A. Computer investigation of construction reliability / Kulesh Victor A. // Proc. 6th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Los Angeles, Calif., May 26-31, 1996. Vol. 4. – Golden (Golo), 1996. – p. 395-401.
6. Miller Lutz. Advanced calculation techniques for ship structural design./ Miller Lutz.// Germ. Maritime Ind. J. - 1992. - 8, Spec. Issue. - P. 37 - 40.
7. Wan Zheng. Estimation of ultimate strength of ship`s hull girders./ Wan Zheng, He Fu. // Ship Mech. - 2003. - 7, № 3. - P. 58-67.
8. Васьков Ю.Ю. Некоторые вопросы оптимизации грузовых операций навалочных судов / Васьков Ю.Ю. // Судовождение. – № 6. – 2003. – С. 40 – 45.
9. Чепок А.О. Разработка процедуры отображения укладки генерального груза в трюмах судна / Чепок А.О. // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2011. – С. 243–246.
10. Справочник по теории корабля. Т.2. Под редак. Войтунского С.И. - Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.

REFERENCES

1. Sizov V.G. Theory of ship. - Odessa: Phenix, 2003. – 282 p.
8. Vaskov Yu.Yu. Some questions of optimization of cargo operations of loading vessels / Vaskov Yu.Yu. // Sudovozhdenie. – № 6. – 2003. – P. 40 – 45.
9. Chepok A.O. Development of procedures of reflection of piling of general load in the holds of ship / Chepok A.O. // Sb. nauchn. trudov./ONMA, Vyp. 26. – Odessa: «IzdatInform», 2011. – P. 243–246.
10. Reference book on the theory of ship. T.2. Pod redak. Voytunskogo S.I. - L.: Sudostroyeniye, 1985. – 440 c.

Определение максимального значения горизонтальной составляющей сил инерций, действующей на груз при качке судна

Е. А. Власенко, И. А. Бурмака

Аннотация. Предложены формулы расчета текущих значений углов крена и дифферента, возникающих при качке судна. Приведены аналитические выражения для оценки значений продольной и поперечной составляющих сил инерции, порождаемые бортовой, килевой и вертикальной качкой судна. Разработана процедура расчета максимального значения горизонтальной составляющей сил инерций, действующей на груз при качке судна, причем получено выражение расчета момента времени достижения максимума горизонтальной составляющей методом простых итераций, как и ее величины. Приведен численный пример расчета составляющих сил инерции с помощью компьютерной программы.

Ключевые слова: мореходная безопасность, качка судна, силы инерции и их составляющие.

Determination of maximal value of horizontal constituent of forces of inertias, operating on a cargo at rolling of ship

Ye. A. Vlasenko, I. A. Burmaka

Abstract. The formulas of calculation of current values of angles of roll and pitch arising up at rolling of ship are offered. Analytical expressions for estimation of values of longitudinal and transversal making forces of inertia are resulted, generated by the side, careening and vertical tossing of ship. Procedure of calculation of maximal value of horizontal constituent of forces of inertias is developed, operating on a cargo at rolling of ship, expression of calculation of moment of time of achievement of maximum of horizontal constituent is thus got the method of simple iterations, as well as its sizes. The numeral example of calculation of making forces of inertia by the computer program is resulted.

Keywords: nautical safety, rolling of ship, forces of inertia and their constituents.