

Безопасная перевозка груза при качке судна

Власенко Е.А.

НУ "Одесская морская академия", Одесса, Украина

Safe transportation of cargo taking into account tossing of ship

Vlasenko Yevgeny

NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine

Аннотация – Рассмотрена зависимость сил инерции, действующих на груз, от бортовой, килевой и вертикальной составляющих качки судна. Показана связь между судовой и опорной системами координат, выраженная матрицей направляющих косинусов. С помощью матрицы направляющих косинусов определены аналитические выражения для расчета составляющих сил инерции, которые воздействуют на груз при качке, в судовой системе координат.

Abstract – It is shown that the process of tossing of ship is formalized by side, careening and vertical constituents, which differ by amplitudes and initial phases, but an identical period is had. The ship and supporting systems of coordinates are considered, thus the ship system of coordinates is oriented in relation to supporting taking into account the current values of heel, list and vertical moving. Communication is shown between the ship and supporting systems of coordinates, which is expressed by the square matrix of sending cosines.

Особенностями загрузки контейнеровозов 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 актуальным является вопрос обеспечения безопасной перевозки груза путем надлежащего размещения и крепление груза с учетом ожидаемых погодных условий во время его перевозки.

Проблеме обеспечения надлежащего уровня мореходной безопасности судов посвящен ряд работ. Основные принципы обеспечения мореходной безопасности судов изложены в работе [1], а в работе [2] выполнено исследование корреляционной зависимости между формой корпуса судна и его диаграммой статической остойчивости, в результате которого получена аппроксимированная формула расчета метacentрической высоты. В работе [3] приводится модель бортовой качки накатных судов с уравнивающим расположением помещений при затоплении их части и проведено ее исследование.

В патенте [4] предложен способ обеспечения плавучести аварийного судна типа RO-RO и паромов, предусматривающий закрытые емкости, установленные по бортам и под палубой вдоль и поперек судна. Они обеспечат 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.

Работа [7] посвящена учету особенностей загрузки генеральных грузов и выбору ее оптимального варианта, а в работе [8] рассмотрены общие принципы оптимизации грузовых операций навалочных судов.

Целью настоящей статьи является рассмотрение вопросов обеспечения безопасной перевозки груза с учетом сил инерции, воздействующих на него при качке судна.

Как указывается в работе [2], для расчета сил, действующих на груз при качке судна, достаточно учитывать его бортовую, килевую и вертикальную составляющие качки. В этом случае на груз действуют силы инерции F_0 , F_β и F_ζ соответственно от бортовой, килевой и вертикальной качки судна, а также сила тяжести P_c . Рассмотрим две

системы координат: опорную (невозмущенную) $OXYZ$ и судовую $OX_1Y_1Z_1$, причем судовая система координат отклонена от опорной на углы крена θ и дифферента β , как показано на рис. 1.

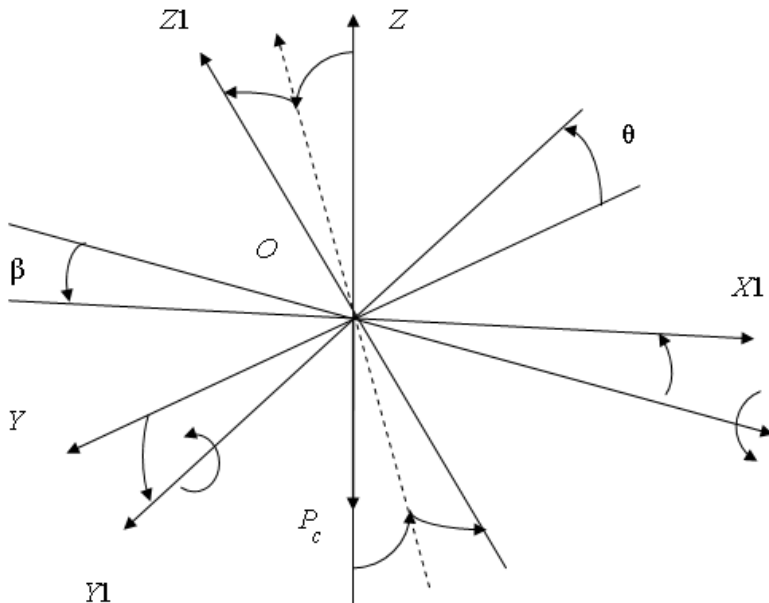


Рис. 1. Связь систем координат $OXYZ$ и $OX_1Y_1Z_1$

Сила тяжести P_c , как и сила инерции от вертикальной качки F_ζ , сохраняют неизменное направление в опорной системе координат $OXYZ$. Поэтому для поиска проекций силы тяжести P_c и F_ζ на оси судовой системы координат найдем матрицу направляющих косинусов M_1 , для чего вначале необходимо найти матрицу M_θ , характеризующую поворот на угол крена θ , матрицу M_β , соответствующую повороту на угол дифферента β , а затем указанные матрицы перемножить, т.е. $M_1 = M_\theta M_\beta$.

Отклонение судовой системы координат $OX_1Y_1Z_1$ от опорной $OXYZ$ производится на положительные углы θ и β . Из рис. 1 следует, что матрица M_θ поворота относительно оси X - X характеризуется сле-

дующим выражением:

$$M_{\theta} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix}.$$

Второй поворот на угол дифферента β от килевой качки описывается матрицей M_{β} , имеющей следующий вид:

$$M_{\beta} = \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix}.$$

Находим произведение матриц M_{θ} и M_{β} :

$$M_1 = M_{\theta} M_{\beta} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix},$$

или

$$M_1 = \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ \sin \theta \sin \beta & \cos \theta & \sin \theta \cos \beta \\ \cos \theta \sin \beta & -\sin \theta & \cos \theta \cos \beta \end{vmatrix}.$$

Сила тяжести P_c имеет отрицательное направление в опорной системе координат, а ее проекции на оси системы координат $OX_1Y_1Z_1$ определяются направляющими косинусами последней строки матрицы M_1 . Если проекции силы тяжести P_c на оси системы координат $OX_1Y_1Z_1$ обозначить через P_{cX} , P_{cY} и P_{cZ} , то с учетом знака P_c можно записать для них следующие выражения:

$$P_{cX} = -P_c \cos \theta \sin \beta; \quad P_{cY} = P_c \sin \theta; \quad P_{cZ} = -P_c \cos \theta \cos \beta.$$

Сила инерции F_{ζ} от вертикальной качки алгебраически складывается с силой тяжести и имеет те же направляющие косинусы.

Силы инерции от бортовой F_{θ} и килевой F_{β} качки судна определяются тангенциальными и нормальными ускорениями, причем нормальными ускорениями пренебрегают из-за их малости, а тангенциальные ускорения направлены перпендикулярно радиусу кривизны перемещения груза относительно оси качания.

Проекции сил, действующих на груз, в судовой системе координат обозначены F_{X_1} , F_{Y_1} и F_{Z_1} , и запишем выражения для них:

$$\begin{aligned}
 F_{X1} &= F_{\beta} \cos \gamma_{\beta} - (P_c + F_{\zeta}) \cos \theta \sin \beta ; \\
 F_{Y1} &= F_{\theta} \cos \gamma_{\theta} + (P_c + F_{\zeta}) \sin \theta ; \\
 F_{Z1} &= F_{\beta} \sin \gamma_{\beta} + F_{\theta} \sin \gamma_{\theta} - (P_c + F_{\zeta}) \cos \theta \cos \beta ,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где углы γ_{β} и γ_{θ} определяются направлением радиусов кривизны относительно вертикальной оси.

Рассмотрим силу инерции F_{θ} от бортовой качки. Очевидно:

$$F_{\theta} = -m_c a_y ,$$

где m_c - масса груза; a_y - линейное ускорение, возникающее при бортовой качке судна, которое является произведением углового ускорения $\ddot{\theta}$ на радиус кривизны r_y относительно оси $X2-X2$, проходящей через центр тяжести судна G и параллельно оси $X1-X1$, т.е. $a_y = r_y \ddot{\theta}$.

Выражение для радиуса кривизны r_y и направления силы инерции F_{θ} найдем с помощью рис. 2, для чего обозначим ΔX , ΔY и ΔZ расстояния между центрами тяжести судна G и груза G_c по соответствующим осям.

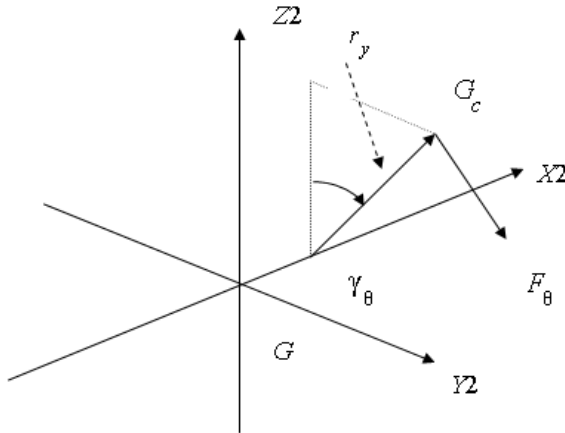


Рис. 2. К определению радиуса кривизны r_y и угла γ_{θ}

Из рисунка следует, что:

$$r_y = \sqrt{\Delta Y^2 + \Delta Z^2}; \quad \gamma_\theta = \operatorname{arctg} \frac{\Delta Y}{\Delta Z}.$$

Выражение для углового ускорения $\ddot{\theta}$ получено в работе [9]:

$$\ddot{\theta} = -\theta_m \omega_k^2 \sin(\omega_k t - \psi).$$

Следовательно, сила инерции F_θ определяется выражением:

$$F_\theta = m_c r_y \theta_m \omega_k^2 \sin(\omega_k t - \psi).$$

Аналогично рассчитывается продольная сила инерции F_β , т.е.:

$$F_\beta = -m_c a_x,$$

где a_x - линейное ускорение при килевой качке.

Направление линейного ускорения $a_x = r_x \ddot{\beta}$ и выражения для радиуса кривизны r_x находится с помощью рис. 3.

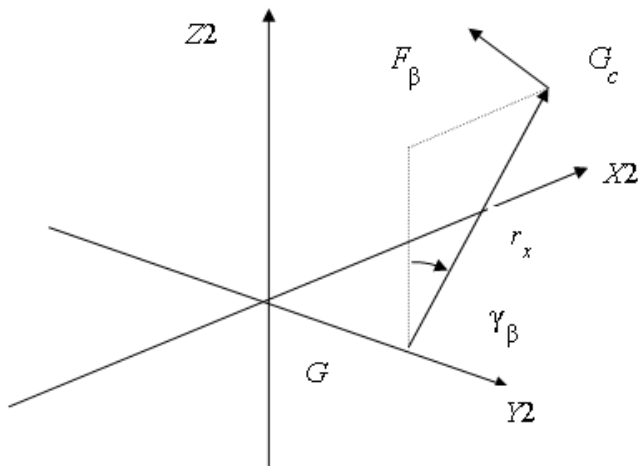


Рис. 3. К определению радиуса кривизны r_x и угла γ_β

Из рисунка следует, что:

$$r_x = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Z^2}; \quad \gamma_\beta = \operatorname{arctg} \frac{\Delta X}{\Delta Z}.$$

Для продольной силы инерции F_{β} выражение углового ускорения $\ddot{\beta}$ позаимствуем из работы [9]:

$$\ddot{\beta} = -\beta_m \omega_k^2 \sin(\omega_k t - \psi_{\beta}).$$

Поэтому сила инерции

$$F_{\beta} = m_c r_x \beta_m \omega_k^2 \sin(\omega_k t - \psi_{\beta}).$$

Сила инерции от вертикальной поступательной качки F_{ζ} определяется из выражения $F_{\zeta} = -m_c \ddot{\zeta}$, причем линейное ускорение $\ddot{\zeta}$ получаем из работы [9]:

$$\ddot{\zeta} = -\zeta_o \omega_k^2 \sin(\omega_k t),$$

поэтому с учетом того, что ζ_o принимается равным половине высоты волны h_w , т.е. $\zeta_o = 0,5h_w$ окончательно получим:

$$F_{\zeta} = 0,5h_w m_c \omega_k^2 \sin(\omega_k t).$$

С учетом полученных выражений можно найти аналитические зависимости проекций сил F_{X1} , F_{Y1} и F_{Z1} , для чего в формулы (1) следует подставить полученные значения. Как следует из рис. 2 и 3:

$$\sin \gamma_{\beta} = \frac{\Delta X}{r_x}; \quad \cos \gamma_{\beta} = \frac{\Delta Z}{r_x}; \quad \sin \gamma_{\theta} = \frac{\Delta Y}{r_y}; \quad \cos \gamma_{\theta} = \frac{\Delta Z}{r_y}.$$

Окончательно выражения для сил, действующих на груз при качке судна по трем компонентам принимает вид:

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

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

$$F_{Z1} = m_c \omega_k^2 [A \sin(\omega_k t - \psi_z) - (\frac{g}{2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \cos \theta \cos \beta],$$

где A и ψ_z - приведенные амплитуда и фаза амплитудно-фазового преобразования; $\beta = \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_{\beta})$, $\theta = \theta_m \sin(\omega_k t - \psi)$, в которых амплитуда и фаза определяются начальными условиями.

Таким образом, получены аналитические выражения для составляющих сил инерции в судовой системе координат, которые воздействуют на груз при качке судна, с помощью которых можно оценить их возможные максимальные значения в предстоящем рейсе с учетом

ожидаемых погодных условий и определить крепление груза, обеспечивающее его безопасную перевозку.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

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 Terndrup // Schiffstechnik. – 1999. – 46, № 4. – P. 208 – 216.
4. RO-RO ship/ferry with buoyancy tanks to prevent capsizing/ Заявка 2264665 Великобритании 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. Чепок А.О. Разработка процедуры отображения укладки генерального груза в трюмах судна / Чепок А.О. // Судовождение: сб. науч. трудов / ОНМА. – Вып. 20. – Одесса, 2011. – С. 243 – 246.
8. Васьков Ю.Ю. Некоторые вопросы оптимизации грузовых операций навалочных судов / Васьков Ю.Ю. // Судовождение. – № 6. – 2003. – С. 40 – 45.
9. Власенко Е.А. Определение ускорения, возникающего при бортовой качке судна/ Власенко Е.А. // XXX Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 декабря 2017 г. – Харьков. – С. 41 – 47.