

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.021, 65.011.56

С. С. Соколов,
канд. техн. наук,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА ПРИ ПОМОЩИ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗМЕЩЕНИЕМ ГРУЗА И РЕАГИРОВАНИЯ НА ВНЕШТАТНЫЕ СИТУАЦИИ

CREATION OF SAFE OPERATION INFORMATION SUPPORT OF A SHIP BY MEANS OF AUTOMATION MANAGEMENT BY CARGO PLACEMENT AND RESPONSE TO NON-STAFF SITUATIONS

Статья посвящена вопросу обеспечения безопасности судна при помощи эффективного управления грузовыми процессами. Автором предложены математические модели и алгоритмы автоматизации размещения груза и реагирования на внештатные ситуации, связанные с раскреплением груза.

Article is devoted to a question of ship safety by means of cargo processes effective management. The author offered mathematical models and algorithms of automation cargo placement and response to the non-staff situations connected with breaking-out of freight.

Ключевые слова: безопасная эксплуатация судна, размещение груза, автоматизация карго-планирования.

Key words: safe operation of a ship, cargo placement, cargo planning automation.

РЕШЕНИЕ вопросов транспортной безопасности в последнее время претерпело значительный подъем как на законодательном уровне, так и на практике. В частности в ст. 1 Федерального закона «О транспортной безопасности» от 9 февраля 2007 г. № 16-ФЗ Федеральным законом «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам обеспечения транспортной безопасности» от 3 февраля 2014 г. № 15-ФЗ был внесен п. 1.1: «зона транспортной безопасности — объект транспортной инфраструктуры, его часть (наземная, подземная, воздушная, надводная), *транспортное средство*, его часть, для которых в соответствии с требованиями по обеспечению транспортной безопасности устанавливается особый режим прохода (проезда) физических лиц (транспортных средств) и проноса (провоза) грузов, багажа, ручной клади, личных вещей либо перемещения животных» [1].

Безопасность транспортного средства в первую очередь подлежит рассмотрению с точки зрения уменьшения вероятности реализации антитеррористической угрозы. Однако следует помнить и о безопасности эксплуатации транспортного средства. Последнее ставит значительные задачи.

Среди всех транспортных средств особую роль с точки зрения обеспечения необходимого уровня безопасности эксплуатации играют суда. А среди эксплуатационных характеристик судна одной из важнейших является остойчивость.

Данная статья посвящена рассмотрению требований по остойчивости судна, накладываемых на результаты рационального карго-планирования, а также решению задачи восстановления координат первоначального положения груза (формы прямоугольных параллелепипедов) согласно показателям судовых приборов, размещение которого было нарушено в результате внештатных ситуаций.

Соблюдение требований остойчивости при размещении груза

Вопросы рационального размещения груза достаточно подробно и неоднократно рассматривались А. П. Нырковым и автором данной статьи в работах [2; 3, с. 17–20; 4, с. 54–58; 5, с. 89а–92; 6, с. 74–78; 7; 8, с. 75–78; 9, с. 98–105]. Соблюдение требования остойчивости является фундаментальным для водного транспорта и основано на следующих моделях.

Определим основные величины, характеризующие судно, которые будут использоваться в расчетах:

L — длина между перпендикулярами — расстояние между точками пересечения грузовой ватерлинии (ГВЛ — уровень воды по отношению к судну при штиле и полной загрузке);

B — наибольшая ширина судна — расстояние по ширине между плоскостями, параллельными ДП и касательными к корпусу судна в крайних его точках; обычно наиболее широким является мидель-шпангоут, но бывает и смещение наиболее широкого шпангоута в сторону кормы;

H — высота борта — расстояние между основной плоскостью и линией палубы в плоскости мидель-шпангоута;

T — средняя осадка судна — величина углубления судна, определяется как сечение, проходящее через центр тяжести площади ватерлинии;

T_m — углубление судна, измеряется на мидель-шпангоуте; при осадке судна на ровный киль $T = T_m$;

F — высота надводного борта — $F = H - T_m$;

D — масса судна.

Пусть на судне некоторый груз P массой m перенесен так, что центр тяжести (ЦТ) этого груза переместился из точки $A_0 \{x_0, y_0, z_0\}$ в точку $A_1 \{x_1, y_1, z_1\}$. Тогда масса всего судна не изменится, но изменится положение его ЦТ. Разлагая фактическое перемещение на три взаимно ортогональных перемещения параллельно осям координат, рассмотрим перемещение продольное $l_x = x_1 - x_0$, поперечное $l_y = y_1 - y_0$ и вертикальное $l_z = z_1 - z_0$.

Перемещение центра тяжести судна можно найти с помощью теоремы теоретической механики о статических моментах, согласно которой:

$$\begin{aligned}\delta x_g &= Pl_x / D, \\ \delta y_g &= Pl_y / D, \\ \delta z_g &= Pl_z / D.\end{aligned}\tag{1}$$

В результате перемещения появятся две дополнительные пары сил. Одна из них будет действовать в ДП, вызывая дифферент, плечо ее будет равно

$$\delta x_g \cos \psi + \delta z_g \sin \psi,\tag{2}$$

где ψ — угол дифферента.

Другая же будет действовать в поперечной плоскости, параллельной ПМШ, вызывая крен. Плечо ее будет равно

$$\delta y_g \cos \theta + \delta z_g \sin \theta.\tag{3}$$

Моменты этих пар равны:

— дифферентующий:

$$\delta M_{\text{диф}} = D(\delta x_g \cos \psi + \delta z_g \sin \psi);\tag{4}$$

— кренящий:

$$\delta M_{rh} = D(\delta y_g \cos \theta + \delta z_g \sin \theta).\tag{5}$$

Подставляя выражения (1) в эти формулы, получим:

$$\left. \begin{aligned}\delta M_{\text{диф}} &= P(l_x \cos \psi + l_z \sin \psi); \\ \delta M_{\text{кр}} &= P(l_y \cos \theta + l_z \sin \theta).\end{aligned} \right\}\tag{6}$$

При достаточно малых углах наклона $\sin \psi \approx \psi$; $\cos \psi \approx 1$; $\sin \theta \approx \theta$; $\cos \theta \approx 1$ это допустимо, если сила тяжести или перемещения груза достаточно мала. Тогда система (6) принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} \delta M_{\text{диф}} &= P(l_x + l_y \psi); \\ \delta M_{\text{кр}} &= P(l_y + l_z \theta). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Согласно условиям равновесия действие этих моментов уравнивается действием восстанавливающих моментов.

При равнообъемном наклонении ЦТ судна не меняет своего положения по отношению к системе координат $Oxyz$, связанной с судном, а центр величины (ЦВ — точка приложения приведенной сил плавучести) переместится в сторону наклона (в случае динамического использования судна, например в момент движения по курсу, вместо ЦВ используется центр вращения (ЦВР) — точка пересечения координатных осей вращения судна). Вес судна и сила поддержания $\rho g V$ образуют пару.

Плечо этой пары $\overline{GK} = l$ называется плечом статической остойчивости. Определим величину плеча статической остойчивости из $\triangle MGK$: $\overline{GK} = \overline{MG} \sin \theta$. Восстанавливающий момент получится равным:

$$M_B = Dh_0 \sin \theta. \quad (8)$$

Величину $\overline{MG}$ обозначим h_0 — это поперечная метацентрическая высота. Как было сказано ранее, для малых углов можно предположить $\sin \theta \approx \theta$, а формула (8) переписывается в виде

$$M_B = Dh_0 \theta. \quad (9)$$

При наклонении около поперечной высоты также определим продольную метацентрическую высоту: $\overline{\mu G} = H_0$.

В этом случае продольный восстанавливающий момент μ_B выражается в виде

$$\mu_B = DH_0 \psi. \quad (10)$$

Приравняв полученные выражения для дифференцирующего и кренящего моментов, получим

$$P(l_x + l_z \psi) = DH_0 \psi; \quad P(l_y + l_z \theta) = Dh_0 \theta. \quad (11)$$

Отсюда угол дифферента, возникающий вследствие переноса груза, равен

$$\psi = \frac{Pl_x}{D \left(H_0 - \frac{P}{D} l_z \right)}, \quad (12)$$

а угол крена:

$$\theta = \frac{Pl_y}{D \left(h_0 - \frac{P}{D} l_z \right)}, \quad (13)$$

Согласно формуле (13) вычитаемое, стоящее в знаменателях этих формул, — это вертикальное смещение ЦТ судна, которое приводит к смещению метацентрических высот. Следовательно, выражения для метацентрических высот, измененных вследствие перемещения груза, примут вид:

$$\begin{aligned} H_1 &= H_0 + \delta H; \\ h_1 &= h_0 + \delta h. \end{aligned} \quad (14)$$

Поправки к метацентрическим высотам одинаковые, то есть $\delta H = \delta h = -\frac{P}{D} l_z$. Для большинства судов на практике продольная высота много больше поперечной, отсюда в большинстве случаев можно предположить, что $H_1 \approx H_0$. Подставляя (14) в (12), (13), получим:

$$\psi = \frac{Pl_x}{DH_0}; \quad \theta = \frac{Pl_y}{Dh_0}. \quad (15)$$

Рассмотрим возможные варианты переноса груза на судне:

Если имеем перемещение груза в носовую часть, то

$$x_1 > x_0, \quad l_x > 0, \quad \psi > 0, \quad (16)$$

значит, судно получает дифферент на нос.

Если же груз переносится на корму, то

$$x_1 < x_0, \quad l_x < 0, \quad \psi < 0, \quad (17)$$

то есть судно дифферентует на корму.

Если перенос груза осуществляется на правый борт, то

$$y_1 > y_0, \quad l_y > 0, \quad \theta > 0. \quad (18)$$

Если имеем перенос груза на левый борт, то

$$y_1 < y_0, \quad l_y < 0, \quad \theta < 0. \quad (19)$$

Если груз переносится вниз, то, учитывая формулу (14),

$$z_1 < z_0, \quad l_z < 0, \quad \delta h > 0, \quad (20)$$

то есть начальная остойчивость увеличится.

Если груз переносится вниз, то

$$z_1 > z_0, \quad l_z > 0, \quad (21)$$

то есть начальная остойчивость снижается.

Используя теорему Эйлера, определим изменение осадок носом и кормой. Для этого проведем через точку F — ЦТ площади ватерлинии (ВЛ) судна, находящегося в прямом положении, — наклонную $ВЛ_0$ под углом дифферента ψ .

Для изменения осадок носом δT_n и кормой δT_k можно записать выражения:

$$\delta T_n = \left(\frac{L}{2} + x_f \right) \psi; \quad \delta T_k = \left(\frac{L}{2} - x_f \right) \psi, \quad (22)$$

где положительные значения δT_n и δT_k соответствуют увеличению осадок носом δT_n и кормой δT_k , а отрицательные — их уменьшению. Дифферент (в м) определяется выражением [10]:

$$\Delta = \delta T = \delta T_n - \delta T_k = \frac{PLl_x}{DH_0}. \quad (23)$$

Необходимо минимизировать данное выражение:

$$\Delta = \frac{PLl_x}{DH_0} \rightarrow \min. \quad (24)$$

Необходимо, чтобы при любом перемещении груза изменение углов крена и дифферента было минимальным:

$$\left. \begin{array}{l} \theta \rightarrow 0 \\ \psi \rightarrow 0 \end{array} \right\}, \quad (25)$$

следовательно, принимая во внимание (12), (13), учитывая постоянство в оперативной динамике массы перемещаемого груза и массы судна, получим минимизационное условие, накладываемое на продольное и поперечное перемещения и величины изменения метацентрических высот:

$$\left. \begin{array}{l} l_x, l_y \rightarrow 0 \\ \delta H, \delta h \rightarrow 0 \end{array} \right\}. \quad (26)$$

В результате получаем систему основных физико-математических ограничений, соблюдение которых позволит обеспечить безопасную эксплуатацию судна с точки зрения соблюдения требования остойчивости:

— расчет углов крена и дифферента, при перемещении груза — формулы (12), (13);

— возможные отклонения судна от положения равновесия — формулы (16)–(21);
— расчетная формула для дифферента судна при перемещении груза — (23) и система практических требований по эксплуатации судна — формулы (24)–(26).

На практике следует избегать случаев переноса груза, при которых метацентрическая высота станет равной нулю или будет отрицательной, так как это противоречит правилам безопасной эксплуатации судов.

Реагирование на внештатные ситуации, связанные с изменением положения груза — восстановление координат первоначального положения

При недостаточном крепеже, сильной качке, халатности персонала и других факторах возможно раскрепление груза и его падение (перемещение в пространстве). В этом случае одним из мероприятий будет восстановление первоначального положения груза по показаниям судовых приборов (кренометра и дифферентометра).

Подробное описание предлагаемых математических моделей можно найти в [11, с. 70–72]. В данной статье приводится лишь общий ознакомительный обзор.

Метод вычислений координат начального положения груза основан на теории углов Эйлера, которая в данном случае основана на предположении: «при перемещении грузов заданная пространственная система координат поворачивается относительно всех трех осей. Начало координат до перемещения грузов — O , после перемещения — O' . Первая система координат будет определяться базисными векторами: $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$, а вторая — $\bar{i}_1, \bar{j}_1, \bar{k}_1$ ».

Обозначим через a, b, c смещение координат центра второй системы относительно первой, тогда

$$\overline{OO'} = ai + bj + ck. \quad (27)$$

Выразим местоположение i -го груза (до перемещения) во второй системе координат, беря за точку центр тяжести груза — T_i . Заметим, что координаты x_i, y_i, z_i совпадают с координатами вектора $\overline{OT_i}$ в разложении его по базису $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$, а координаты x_{i1}, y_{i1}, z_{i1} совпадают с координатами вектора $\overline{O'T_i}$ в разложении по базису $\bar{i}_1, \bar{j}_1, \bar{k}_1$, то есть для всей системы перемещенных грузов:

$$\begin{cases} \overline{OT_1} = x_1i + y_1j + z_1k \\ \overline{OT_2} = x_2i + y_2j + z_2k \\ \dots \\ \overline{OT_n} = x_ni + y_nj + z_nk \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} \overline{O'T_1} = x_{11}i_1 + y_{11}j_1 + z_{11}k_1 \\ \overline{O'T_2} = x_{21}i_1 + y_{21}j_1 + z_{21}k_1 \\ \dots \\ \overline{O'T_n} = x_{n1}i_1 + y_{n1}j_1 + z_{n1}k_1 \end{cases} \quad (29)$$

Учитывая разложение вектора по базису, в силу правила треугольника получим:

$$\begin{cases} x_1i + y_1j + z_1k = (a + \alpha_{11}x_{11} + \alpha_{21}y_{11} + \alpha_{31}z_{11})i + \\ + (b + \alpha_{12}x_{11} + \alpha_{22}y_{11} + \alpha_{32}z_{11})j + \\ + (c + \alpha_{13}x_{11} + \alpha_{23}y_{11} + \alpha_{33}z_{11})k \\ x_2i + y_2j + z_2k = (a + \alpha_{11}x_{21} + \alpha_{21}y_{21} + \alpha_{31}z_{21})i + \\ + (b + \alpha_{12}x_{21} + \alpha_{22}y_{21} + \alpha_{32}z_{21})j + \\ + (c + \alpha_{13}x_{21} + \alpha_{23}y_{21} + \alpha_{33}z_{21})k \\ \dots \\ x_ni + y_nj + z_nk = (a + \alpha_{11}x_{n1} + \alpha_{21}y_{n1} + \alpha_{31}z_{n1})i + \\ + (b + \alpha_{12}x_{n1} + \alpha_{22}y_{n1} + \alpha_{32}z_{n1})j + \\ + (c + \alpha_{13}x_{n1} + \alpha_{23}y_{n1} + \alpha_{33}z_{n1})k \end{cases} \quad (30)$$

Используя формулы для вычисления коэффициентов α [12] и учитывая, что углом отклонения судна от курса в силу его небольшой величины можно пренебречь, таким образом, $\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, получим:

$$\begin{cases} \alpha_{11} = \cos \psi - \varphi \sin \psi \cos \theta, \\ \alpha_{12} = \sin \psi + \varphi \cos \psi \cos \theta, \\ \alpha_{13} = \varphi \sin \theta, \\ \alpha_{21} = -\varphi \cos \psi - \sin \psi \cos \theta, \\ \alpha_{22} = -\varphi \sin \psi + \cos \psi \cos \theta, \\ \alpha_{23} = \sin \theta, \\ \alpha_{31} = \varphi \sin \theta, \\ \alpha_{32} = -\sin \theta, \\ \alpha_{33} = -\cos \theta. \end{cases} \quad (31)$$

В результате формулы для расчета координат возможного перемещения системы грузовых объектов при известных углах отклонения судна от положения равновесия будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} x_1 = a + (\cos \psi - \varphi \sin \psi \cos \theta)x_{11} + (-\varphi \cos \psi - \sin \psi \cos \theta)y_{11} + \\ + (\varphi \sin \theta)z_{11} \\ y_1 = b + (\sin \psi + \varphi \cos \psi \cos \theta)x_{11} + (-\varphi \sin \psi + \cos \psi \cos \theta)y_{11} + \\ + (-\sin \theta)z_{11} \\ z_1 = c + (\varphi \sin \theta)x_{11} + (\sin \theta)y_{11} + (-\cos \theta)z_{11} \\ x_2 = a + (\cos \psi - \varphi \sin \psi \cos \theta)x_{21} + (-\varphi \cos \psi - \sin \psi \cos \theta)y_{21} + \\ + (\varphi \sin \theta)z_{21} \\ y_2 = b + (\sin \psi + \varphi \cos \psi \cos \theta)x_{21} + (-\varphi \sin \psi + \cos \psi \cos \theta)y_{21} + \\ + (-\sin \theta)z_{21} \\ z_2 = c + (\varphi \sin \theta)x_{21} + (\sin \theta)y_{21} + (-\cos \theta)z_{21} \\ \dots \\ x_n = a + (\cos \psi - \varphi \sin \psi \cos \theta)x_{n1} + (-\varphi \cos \psi - \sin \psi \cos \theta)y_{n1} + \\ + (\varphi \sin \theta)z_{n1} \\ y_n = b + (\sin \psi + \varphi \cos \psi \cos \theta)x_{n1} + (-\varphi \sin \psi + \cos \psi \cos \theta)y_{n1} + \\ + (-\sin \theta)z_{n1} \\ z_n = c + (\varphi \sin \theta)x_{n1} + (\sin \theta)y_{n1} + (-\cos \theta)z_{n1} \end{cases} \quad (32)$$

Описанные выше закономерности и выражения касаются почти идеального случая — перемещение объектов происходит в одном направлении (или почти в одном направлении). Это возможно, например, при обрыве креплений и падении стопки контейнеров. В этом случае система грузовых объектов имеет коллинеарную систему векторов, задающих направления смещения компонент. На практике необходимо учитывать поправки по осям [11].

Полученные зависимости могут быть использованы на практике для прогнозирования, предупреждения, оперативного реагирования и ликвидации последствий внештатных аварийных ситуаций.

Список литературы

1. О транспортной безопасности: федеральный закон Рос. Федерации от 9 февраля 2007 г. № 16-ФЗ (в ред. от 03.02.2014).
2. *Нырков А. П.* Автоматизированное управление и оптимизация технологических процессов в транспортных узлах: дис. ... д-ра техн. наук / А. П. Нырков; СПГУВП. — СПб., 2003.
3. Стохастические модели управления технологическими процессами судоремонта / Н. М. Вихров [и др.] // Морской вестник. — 2013. — № 2 (46).
4. Основные принципы построения защищенных информационных систем автоматизированного управления транспортно-логистическим комплексом / А. П. Нырков [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2013. — № 2 (2).
5. *Соколов С. С.* Математическая модель рационального размещения груза в трюмах судна / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2010. — № 3.
6. Автоматизация управления мультимодальными перевозками / А. П. Нырков [и др.] // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2.
7. *Соколов С. С.* Математическое и алгоритмическое обеспечение оперативного управления транспортно-логистическими комплексами: дис. ... канд. техн. наук / С. С. Соколов; ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб., 2011.
8. *Соколов С. С.* Четырехмерная модель комплектовки груза на судне / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 3.
9. *Соколов С. С.* Моделирование размещения груза при мультимодальных перевозках / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 4.
10. Статика корабля: учеб. пособие / Р. В. Борисов [и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Судостроение, 2005. — 256 с.: ил.
11. *Соколов С. С.* Моделирование процесса устранения последствий системного поликомпонентного сдвига грузовых объектов на основе данных судовых приборов / С. С. Соколов, В. Н. Ежгуров // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — Т. 1, № 3.
12. *Ильин В. А.* Аналитическая геометрия: учебник для вузов / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк. — 5-е изд. — М.: Наука: Физматлит, 1999. — Вып. 3: Курс высшей математики и математической физики. — 224 с.