

## Планирование загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах

М. Н. Цымбал

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса,  
Украина Corresponding author. E-mail: burmaka1964@gmail.com

Paper received 24.01.20; Accepted for publication 11.02.20.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-18>

**Аннотация.** Приведены общие требования формирования загрузки контейнеровоза с учетом условий обеспечения мореходной безопасности и сил инерции качки. Рассмотрен пример рейса судна с загрузкой и разгрузкой партий контейнеров. Показана процедура формирования оптимальной загрузки судна, использующая минимальное количество балласта. Выделены специальные операции формирования загрузки контейнеровоза, к которым относятся определение постоянной составляющей загрузки, дополнение размещения, наследование, когда одна загрузка включает в себя вторую, и замещение составляющих загрузки.

**Ключевые слова:** мореходная безопасность, загрузки судна, контейнеровозы.

**Введение.** В случае планирования загрузки контейнеровоза с последующей разгрузкой в нескольких портах при размещении груза необходимо учитывать ротацию портов выгрузки для обеспечения свободного доступа к необходимым партиям груза. Также следует учитывать, что промежуточные состояния загрузки судна на переходах между смежными портами разгрузки должны отвечать требованиям мореходности судна и возникающие силы инерции не превосходить допустимых пределов.

Вопросы обеспечения мореходной безопасности судов являются актуальными и им посвящены многие работы современных исследователей.

**Краткий обзор публикаций по теме.** Способ обеспечения плавучести аварийного судна типа RO-RO и паромов, предусматривающий использование закрытых емкостей, установленных по бортам и под палубой вдоль и поперек судна рассмотрен в патенте [1], а в работе [2] предлагаются метод расчета диаграммы нагрузок и анализа последовательного разрушения при заданных начальных деформациях и остаточных напряжениях.

Детальное рассмотрение вопросов обеспечения мореходной безопасности судов произведено в работе [3], в части их посадки, остойчивости и общей предельной прочности, а в работе [4] исследована корреляционная зависимость между формой корпуса судна и его диаграммой статической остойчивости. Причем исследована задача синтеза формы корпуса, отвечающая заданной величине метацентрической высоты и приведена аппроксимированная формула расчета метацентрической высоты.

Исследование модели бортовой качки накатных судов с уравновешивающим расположением помещений при затоплении их части приведено в работе [5], а метод учета особенностей загрузки генеральных грузов и выбор ее оптимального варианта предложены в работе [6].

Как указывается в статье [7], методы расчетов запаса надежности судовых конструкций были разработаны на базе статистического материала, представленного многолетним опытом эксплуатации судов в арктических районах, а общим принципом оптимизации грузовых операций навалочных судов посвящена работа [8].

Описание численных методов оценки прочности и вибрации судна приведено в работе [9] и показано, что метод конечных элементов является наиболее эффективным.

Целью статьи является описание способа планирования загрузки контейнеровоза при проведении грузовых операций в нескольких портах.

**Материалы и методы.** Процедуры размещения контейнеров по беям и ярусам грузового помещения с учетом требований по мореходной безопасности судна предложены в статье [10], причем приведены аналитические выражения для формирования допустимого варианта загрузки судна. В работе рассмотрена ситуация, когда прием судном груза производится в первом порту, а его выгрузка предусмотрена частями в нескольких последовательных портах. Указывается на сотовый тип грузового помещения, а ячейка соты является потенциальным контейнерным местом. В связи с этим грузовое помещение формализуется трехмерной матрицей, столбцы которой характеризуют расположение ячеек в грузовом помещении по длине судна, строки - по его ширине, а ярусы - по высоте.

Как ранее отмечалось, структура трюма характеризуется упорядоченными ячейками в трехмерном пространстве, причем размеры ячейки равны размерам контейнера  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$ , а число бейтов равно  $a$ , число ярусов -  $c$  и число контейнеров в ярусе -  $b$ . Формализация структуры представлена трехмерной матрицей, элементами которой являются координаты геометрического центра ячеек  $X_i$ ,  $Y_j$  и  $Z_k$  ( $i=1..a, j=1..b, k=1..c$ ).

Как следует из рис. 1, с учетом размеров контейнера справедливы следующие выражения:

$$x_i = X_0 + \frac{2i-1}{2} \Delta x, \quad y_j = Y_0 + \frac{2j-1}{2} \Delta y, \quad z_k = Z_0 + \frac{2k-1}{2} \Delta z.$$

С учетом того, что  $X_0 = -\frac{a}{2} \Delta x$ ,  $Y_0 = -\frac{b}{2} \Delta y$  и  $Z_0 = 0$ :

$$x_i = \left(\frac{2i-1}{2} - \frac{a}{2}\right) \Delta x, \quad y_j = \left(\frac{2j-1}{2} - \frac{b}{2}\right) \Delta y, \quad z_k = \frac{2k-1}{2} \Delta z.$$

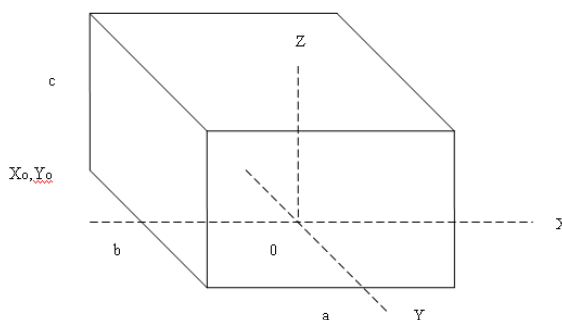


Рис. 1. Система координат грузового помещения

Загружаемые контейнеры с массами  $m_{ijk}$  необходимо распределить по ячейкам, т. е. загрузка подразумевает дополнение каждого элемента матрицы скалярной величиной, равной весу контейнера. В этом случае каждый элемент матрицы характеризуется координатами  $X_i, Y_j, Z_k$  и весом  $gm_{ijk}$ .

Приращения статических моментов  $\Delta M_x, \Delta M_y$  и  $\Delta M_z$ , которые возникают в результате приема груза, зависят от координат  $x_i, y_j, z_k$  и весов  $gm_{ijk}$  следующим образом:

$$\Delta M_x = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} x_i; \Delta M_y = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} y_j; \Delta M_z = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} z_k.$$

С учетом ранее полученных выражений для  $x_i, y_j$  и  $z_k$ :

$$\begin{aligned} \Delta M_x &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left( \frac{2i-1}{2} - \frac{a}{2} \right) \Delta x; \\ \Delta M_y &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left( \frac{2j-1}{2} - \frac{b}{2} \right) \Delta y; \\ \Delta M_z &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left( \frac{2k-1}{2} \right) \Delta z. \end{aligned} \quad (1)$$

Для обеспечения мореходной безопасности приращение статических моментов  $\Delta M_x, \Delta M_y$  и  $\Delta M_z$  должны удовлетворять следующим требованиям:

$$\Delta M_x = \Delta M_d; \Delta M_y = 0; \Delta M_z = \Delta M_h,$$

где  $\Delta M_d$  и  $\Delta M_h$  - моменты, которые обеспечивают требуемые значения дифферента, остойчивости и общей продольной прочности судна.

В уравнениях (1) вакантные массы в матрице загрузки необходимо заместить массами  $m_{ijk}$  контейнеров загружаемого множества таким образом, чтобы разница между правой и левой частями каждого из уравнений была минимальна.

**Результаты и их обсуждение.** Исследуем планирование загрузки контейнеровоза в ситуации, когда прием груза и его выгрузка производятся в нескольких портах. Для примера рассмотрим рейс судна, в котором оно заходит в четыре порта, причем в первом и втором портах судно принимает груз для выгрузки в третьем и четвертом портах, а после выгрузки в третьем порту принимает еще партию груза для четвертого порта, как показано на рис.1.

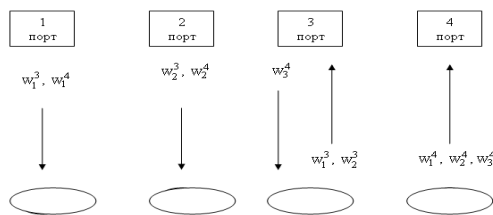


Рис. 1. Схема приема и сдачи груза в течение рейса

В первом порту загрузка судна  $L_1$  характеризуется приемом партии груза для третьего порта  $w_1^3$  и партией груза для четвертого порта  $w_1^4$ , судовыми запасами  $w_{z1}$ , балластом  $w_{b1}$  и их размещением  $q_1$ . Поэтому

формально загрузку судна в первом порту  $L_1$  можно записать следующим образом:

$$L_1 = \{W_1^3, w_1^4, w_{b1}, W_{z1}, q_1\}.$$

После завершения грузовых операций в первом порту загрузка  $L_1$  должна обеспечить допустимое мореходное состояние  $P_{b1} \in Mn_{sf}$ , где  $Mn_{sf}$  - множество безопасных мореходных состояний, и значение сил инерции качки  $F_{jk}$  в допустимых пределах, т. е.  $F_{jk1} < F_{jd}$ . Во втором порту производится прием партии груза  $w_2^3$  для третьего порта и партии груза  $w_2^4$  для четвертого порта. Загрузка судна во втором порту  $L_2$  также характеризуется судовыми запасами  $P_{z2}$ , балластом  $P_{b2}$  и размещением груза, балласта и запасов  $q_2$ . Обозначим через  $\tilde{W}_i$  партию груза, к которой имеется свободный доступ для выгрузки. Учитывая, что в третьем порту предусматривается выгрузка партий груза  $w_1^3$  и  $w_2^3$ , то загрузку судна во втором порту  $L_2$  можно формализовать так:

$$L_2 = \{\tilde{W}_1^3, w_1^4, \tilde{w}_2^3, w_2^4, w_{b2}, W_{z2}, q_2\},$$

обеспечивая свободный доступ к выгружаемым партиям. Размещение груза, балласта и запасов  $q_2$  должно удовлетворить требованиям мореходной безопасности и допустимости сил инерции на качке:

$$P_{b2} \in Mn_{sf}, F_{jk2} < F_{jd}.$$

В третьем порту после выгрузки принимается партия груза  $w_3^4$  для четвертого порта. Поэтому загрузка судна в третьем порту  $L_3$ :

$$L_3 = \{\tilde{W}_1^4, \tilde{w}_2^4, \tilde{w}_3^4, w_{b3}, W_{z3}, q_3\}.$$

Размещение груза, балласта и запасов  $q_3$  формируется таким образом, чтобы были удовлетворены условия:  $P_{b3} \in Mn_{sf}, F_{jk3} < F_{jd}$ .

Таким образом, каждая из загрузок судна  $L_s$  должна отвечать требованию свободного доступа к грузу, который должен выгружаться в следующем порту, а размещение груза, балласта и запасов  $Q_s$  обеспечивать мореходную безопасность  $P_{bs} \in Mn_{sf}$  и допустимость сил инерции на качке  $F_{jks} < F_{jd}$ , на предстоящем переходе. Обращаем внимание, что размещение груза, балласта и запасов  $Q_s$  может иметь постоянную и переменную составляющие. Так в рассматриваемом случае постоянная составляющая для всех трех загрузок определяется партией груза  $\bar{q}$ , а остальные части каждого из тензоров являются переменными составляющими. Поэтому переменные составляющие загрузок  $\hat{q}_s$ :  $\hat{q}_1 = q_1^3$  - от партии груза  $w_1^3$ ;

$$\hat{q}_2 = q_1^3 \cup q_2^3 \cup q_2^4 - \text{от партий груза } w_1^3, w_2^3 \text{ и } w_2^4;$$

$$\hat{q}_3 = q_2^4 \cup q_3^4 - \text{от партий груза } w_2^4 \text{ и } w_3^4.$$

Следовательно, размещение груза, балласта и запасов  $q_s$ :  $q_1 = \bar{q} \cup \hat{q}_1 = \bar{q} \cup q_1^3$ ;  $q_2 = \bar{q} \cup \hat{q}_2 = \bar{q} \cup q_1^3 \cup q_2^3 \cup q_2^4$ ;

$$Q_3 = \bar{q} \cup \hat{q}_3 = \bar{q} \cup q_2^4 \cup q_3^4.$$

Анализируя полученные выражения, делаем вывод о том, что формирование загрузки контейнеровоза следует начинать из определения постоянной составляющей  $\bar{q}$  размещения партии груза  $w_1^4$ , выгрузка которой предусматривается последней в четвертом порту. Следующей производится загрузка партии  $w_1^3$ , размещение которой должно обеспечить свободный доступ к ней для выгрузки в третьем порту, поэтому размещение груза, балласта и запасов  $q_1$  получим, дополняя постоянную составляющую  $\bar{q}$  переменной составляющей  $\tilde{q}_1^3$  со свободным доступом в третьем порту. Поэтому партию контейнеров  $w_1^3$  следует разместить в отдельных грузовых помещениях, либо поверх партии  $w_1^4$ .

При загрузке во втором порту ее размещение  $q_2$  включает в себя размещение  $q_1$  с дополнением составляющих  $\tilde{q}_2^3$  размещения партии  $w_2^3$  со свободным доступом и  $w_2^4$  размещения партии  $w_2^4$ . Следовательно,  $q_2 = q_1 \cup \tilde{q}_2^3 \cup q_2^4$ .

В третьем порту составляющие загрузки  $\tilde{q}_1^3$  и  $\tilde{q}_2^3$  замещаются составляющей  $q_3^4$ , а размещение загрузки  $q_3$  отражает размещение партий груза для выгрузки в четвертом порту, т. е.  $q_3 = q_1^4 \cup q_2^4 \cup q_3^4$ .

Таким образом, для формирования размещения груза, балласта и запасов загрузки судна используются следующие операции: определение постоянной составляющей  $\bar{q}$ , дополнение размещения, наследование, когда одна загрузка включает в себя вторую, и замещение состав-

ляющих загрузки. При формировании размещения  $q_1$  использована операция дополнения постоянной составляющей, размещение  $q_2$  получено наследованием размещения  $q_1$  и дополнением переменных составляющих, а для размещения  $q_3$  использована операция замещения в размещении  $q_2$ .

Способ формирования размещения загрузки связан с балластировкой судна для обеспечения требований мореходной безопасности. При этом размещение загрузки формируется с условием приема минимального количества балласта, и оно должен удовлетворять требованиям мореходной безопасности и допустимости сил инерции на качке, что формально можно выразить следующим образом:

$$L_s = \{ \cup W_s, W_{bs}, W_{zs}, q_s \}$$

$$W_{bs} \rightarrow \min, P_{bs} \in Mn_{sf}, F_{jks} < F_{jd}$$

### Выводы

1. Приведены общие требования формирования загрузки контейнеровоза с учетом условий обеспечения мореходной безопасности и сил инерции качки.
2. Рассмотрен пример рейса судна с загрузкой и разгрузкой партий контейнеров. Показана процедура формирования оптимальной загрузки судна, использующая минимальное количество балласта.
3. Выделены специальные операции формирование загрузки контейнеровоза, к которым относятся определение постоянной составляющей загрузки, дополнение размещения, наследование, когда одна загрузка включает в себя вторую, и замещение составляющих загрузки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. RO-RO ship/ferry with buoyancy tanks to prevent capsizing/ Заявка 2264665 Великобритания МКИ6 В 63 В 43/12 / Shataw Ahmed Ahmed El. - № 9422061.3; Заявл. 2.11.94; Оpubл. 8.5.96; НКИ В7А.
2. Kulesh Victor A. Computer investigation of construction reliability / Kulesh Victor A. // Proc. 6<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Los Angeles, Calif., May 26-31, 1996. Vol. 4. - Golden (Golo), 1996. - p. 395-401.
3. Сизов В.Г. Теория корабля. - Одесса: Феникс, 2003.-282с.
4. 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.
5. 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.
6. Чепок А.О. Разработка процедуры отображения укладки генерального груза в трюмах судна / Чепок А.О. // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 20. - Одесса: «ИздательИнформ», 2011. - С. 243-246.
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. Miller Lutz. Advanced calculation techniques for ship structural design./ Miller Lutz.// Germ. Maritime Ind. J. - 1992. - 8, Spec. Issue. - P. 37 - 40.
10. Власенко Е.А. Допустимая загрузка контейнеровоза / Власенко Е.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- С. 87 - 96.

### REFERENCES

3. Sizov V.G. Theory of ship. - Odessa: Phenix, 2003. - 282 p.
6. 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.
8. Vaskov Yu.Yu. Some questions of optimization of cargo operations of loading vessels / Vaskov Yu.Yu. // Sudovozhdenie. - № 6. - 2003. - P. 40 - 45.
10. Vlasenko E.A. Possible loading of containership / Vlasenko E.A. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- P. 87 - 96.

### Planning of loading of containership in the case of conducting of cargo operations in a few ports

M. N. Tsymbal

The common requirements of forming of loading of containership taking into account the terms of providing of nautical safety and forces of inertia of tossing are resulted. The example of voyage of ship with the loading and unloading of parties of containers is considered. Procedure of forming of optimum loading of ship is shown, using the least of ballast. The special operations are selected forming of loading of containership, to which behave determination of permanent making loading, addition of placing, inheritance, when one loading includes the another, and substitution of constituents of loading.

**Keywords:** nautical safety, loading of ship, containership.