

УДК 656.614.3.073.003

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ГРУЗА, ПРИНИМАЕМОГО В ТРЮМА НА ОТДЕЛЬНОМ ЭТАПЕ ЗАГРУЗКИ СУДНА

А. В. Гайченя<sup>1</sup>

*Рассмотрен способ определения принимаемого в трюма количества груза на определенном этапе, обеспечивающий требованиям посадки судна, его остойчивости и прочности.*

*Количество принимаемого груза в заданное число трюмов на некотором этапе загрузки судна определяется условием равенства статических моментов на рассматриваемом этапе соответствующим допустимым моментам, при которых соблюдаются требования мореходной безопасности.*

*Предлагаемый способ может быть использован в судовых компьютерных программах загрузки судна.*

**Ключевые слова:** мореходная безопасность, загрузка судна, статические моменты.

Эффективная работа транспортных судов возможна лишь при условии обеспечения навигационной и мореходной безопасности. Загрузка судна является ответственным этапом рейса, которая влияет на его мореходную безопасность, в частности, обеспечивая соответствие параметров посадки, остойчивости и прочности корпуса судна их допустимым значениям. О важности указанного этапа свидетельствует тот факт, что все современные суда обеспечены компьютерными грузовыми программами, которые позволяют смоделировать схему и последовательность загрузки судна (составить предварительный грузовой план) и оценить уровень его мореходности. Книга [1] посвящена общим вопросам планирования и проведения грузовых операций на морских судах. Начальная постановка задачи формализации загрузки судна генеральными грузами рассмотрена в статье [2], а в публикациях [3, 4] она получила развитие. В работе [5] рассмотрена оптимизация загрузки балкера. Алгоритм создания множества допустимых стратегий для загрузки генеральных грузов, которые удовлетворяют ограничениям, накладываемых оптимизационной задачей, предложен в работе [6].

---

<sup>1</sup> © Гайченя А. В., к.т.н., ОНМА.

**Цель статьи** – разработка способа расчета количества груза, принимаемого в каждый из трюмов судна на определенном этапе его загрузки.

**Изложение материалов исследования.** Как правило, грузовые операции производятся в несколько этапов, причем зачастую одновременно с балластными операциями.

Поэтому стратегия проведения грузовых операций в качестве определяющего параметра содержит конечное число этапов, и необходимо, чтобы в конце каждого этапа проведения грузовых работ судно находилось в допустимом мореходном состоянии. Это требование представляет собой условие выполнения статических ограничений. В этом случае для конечного состояния каждого из этапов загрузки можно записать следующее выражение для моментов  $\bar{M}_{Xk}$ ,  $\bar{M}_{Yk}$  и  $\bar{M}_{Zk}$ , учитывающие параметры стратегии проведения грузовых операций:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{Xk} &= M_{X0} + M_{X3} + \sum_{j=1}^k [\sum_{Hj} \Delta W_{cij} X_{ghij} + \sum_{tkbj} \Delta W_{bij} X_{gbij}]; \\ \bar{M}_{Yk} &= M_{Y3} + \sum_{j=1}^k [\sum_{Hj} \Delta W_{cij} Y_{ghij} + \sum_{tkbj} \Delta W_{bij} Y_{gbij}]; \quad (k = 1, \dots, N_s) \\ \bar{M}_{Zk} &= M_{Z0} + M_{Z3} + \sum_{j=1}^k [\sum_{Hj} \Delta W_{cij} Z_{ghij} + \sum_{tkbj} \Delta W_{bij} Z_{gbij}], \quad (1) \end{aligned}$$

где  $k$  – порядковый номер этапа;

$\Delta W_{cij}$  - изменение груза в  $i$ -м трюме набора трюмов  $H_j$  на  $j$ -м этапе;

$\Delta W_{bij}$  - изменение балласта в  $i$ -м танке набора танков  $tkbl_j$  на  $j$ -м этапе;

$M_{X0}$ ,  $M_{Z0}$  - статические моменты судна порожнем;

$M_{X3}$ ,  $M_{Y3}$ ,  $M_{Z3}$  - статические моменты судовых запасов.

Располагая, с одной стороны полученными зависимостями, а с другой - выражениями, связывающими граничные значения параметров мореходности судна с границами статических моментов, можно записать неравенства для каждого этапа проведения грузовых операций, которые связывают стратегии проведения грузовых операций с ограничениями по мореходному состоянию судна. При этом связывающими являются промежуточные переменные модели – статические моменты и текущее водоизмещение судна.

Для каждого этапа проведения грузовых работ значения статических моментов  $\bar{M}_{Xk}$ ,  $\bar{M}_{Yk}$  и  $\bar{M}_{Zk}$  на его конечное состояние не должны превосходить соответствующих граничных значений по ограничениям допустимого мореходного состояния судна, т. е. справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{Xk}^* &= M_{X^*}, & \bar{M}_{Xk}^* &= M_X^*, & \bar{M}_{Xk} &\in [\bar{M}_{Xk}^*, \bar{M}_{Xk}^*]; & \bar{M}_{Yk} &= 0; \\ \bar{M}_{Zk}^* &= M_{Z^*}, & \bar{M}_{Zk}^* &= M_Z^*, & \bar{M}_{Zk} &\in [\bar{M}_{Zk}^*, \bar{M}_{Zk}^*], \end{aligned}$$

где  $\bar{M}_{Xk}^*$ ,  $\bar{M}_{Xk}^*$ ,  $\bar{M}_{Zk}^*$ ,  $\bar{M}_{Zk}^*$  - нижние и верхние границы значений соответственно моментов  $\bar{M}_{Xk}$  и  $\bar{M}_{Zk}$  на завершающем состоянии k-го этапа проведения грузовых операций;

$M_{X^*}$ ,  $M_X^*$ ,  $M_{Z^*}$ ,  $M_Z^*$  - нижние и верхние границы моментов по ограничениям допустимого мореходного состояния судна.

При этом приращения моментов за рассматриваемый этап выражается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{M}_{Xk}^* &= M_{X^*} - \bar{M}_{Xk-1}, & \Delta \bar{M}_{Zk}^* &= M_{Z^*} - \bar{M}_{Zk-1}; \\ \Delta \bar{M}_{Xk}^* &= M_X^* - \bar{M}_{Xk-1}, & \Delta \bar{M}_{Zk}^* &= M_Z^* - \bar{M}_{Zk-1}, \end{aligned}$$

Воспользовавшись выражением (1), получим:

$$\begin{aligned} \Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} X_{ghik} - \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} X_{gbik} \right]^* &= M_{X^*} - \bar{M}_{Xk-1}, \\ \Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} Y_{ghik} - \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} Y_{gbik} \right]^* &= 0, \\ \Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} Z_{ghik} - \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} Z_{gbik} \right]^* &= M_{Z^*} - \bar{M}_{Zk-1}, \end{aligned} \tag{2}$$

что определяет нижнюю границу параметров стратегии проведения грузовых операций на k-м этапе, причем рассматриваются такие параметры стратегии, как набор трюмов  $H_k$  и балластных танков  $tkbl_k$ , а также изменение количества груза  $\Delta W_{cik}$  и балласта  $\Delta W_{bik}$  в каждом из них. В

приведенных выражениях величина  $\Delta_c$  является признаком грузовых операций, причем, если производится загрузка, то  $\Delta_c = 1$ , а в случае выгрузки  $\Delta_c = -1$ .

Аналогично записываются выражения для определения верхней границы тех же параметров стратегии на k-м этапе:

$$\Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} X_{ghik} - \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} X_{gbik} \right]^* = M_{X^*}^* - \bar{M}_{Xk-1},$$

$$\Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} Y_{ghik} - \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} Y_{gbik} \right]^* = 0,$$

$$\Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} Z_{ghik} - \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} Z_{gbik} \right]^* = M_Z^* - \bar{M}_{Zk-1}.$$

Предполагается, что на предыдущем этапе статические моменты  $\bar{M}_{Xk-1}$  и  $\bar{M}_{Zk-1}$ , являющиеся начальными для рассматриваемого k-го этапа, удовлетворяют требованиям допустимого мореходного состояния судна. Также будем считать, что в течение этапа обрабатывается конечное количество танков, которые к концу этапа становятся либо совсем пустыми или полностью заполненными. Поэтому значения  $\Delta W_{bik}$  являются известными величинами в зависимости от выбранных для обработки танков.

Уравнения в этом случае принимают следующий вид:

$$\Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} X_{ghik} \right]^* = M_{X^*}^* - \bar{M}_{Xk-1} + \Delta \bar{M}_{Xbk},$$

$$\Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} Y_{ghik} \right]^* = \Delta \bar{M}_{Ybk}, \quad (3)$$

$$\Delta_c \left[ \sum_{Hk} \Delta W_{cik} Z_{ghik} \right]^* = M_{Z^*}^* - \bar{M}_{Zk-1} + \Delta \bar{M}_{Zbk},$$

где  $\Delta \bar{M}_{Xbk} = \Delta_c \left[ \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} X_{gbik} \right]$ ,  $\Delta \bar{M}_{Ybk} = \Delta_c \left[ \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} Y_{gbik} \right]$ ,

$$\Delta \bar{M}_{Zbk} = \Delta_c \left[ \sum_{tkbk} \Delta W_{bik} Y_{gbik} \right].$$

Аналогично записываются уравнения, определяющие верхнюю границу параметров стратегии проведения грузовых операций:

$$\Delta \left[ \sum_{\text{Hk}} \Delta W_{\text{cik}} X_{\text{ghik}} \right]^* = M_X^* - \bar{M}_{X_{k-1}} + \Delta \bar{M}_{X_{bk}},$$

$$\Delta \left[ \sum_{\text{Hk}} \Delta W_{\text{cik}} Y_{\text{ghik}} \right]^* = \Delta \bar{M}_{Y_{bk}}, \quad (4)$$

$$\Delta \left[ \sum_{\text{Hk}} \Delta W_{\text{cik}} Z_{\text{ghik}} \right]^* = M_Z^* - \bar{M}_{Z_{k-1}} + \Delta \bar{M}_{Z_{bk}}.$$

Причем в обоих случаях при определении верхней и нижней границы параметров стратегии проведения грузовых операций в (3) и (4) необходимо учитывать, что сумма веса принимаемых грузов  $\sum_{\text{Hk}} \Delta W_{\text{cik}}$  не должна

превосходить веса оставшегося к загрузке (выгрузке) груза:

$$\sum_{\text{Hk}} \Delta W_{\text{cik}} \leq W_d - W_{k-1}, \quad (5)$$

где  $W_d$  и  $W_{k-1}$  - допустимое количество груза и концу предыдущего этапа.

С учетом (3), (4), (5) и отсутствия крена, получим уравнения:

$$\Delta \left[ \sum_{\text{Hk}} \Delta W_{\text{cik}} X_{\text{ghik}} \right]^* = \tilde{M}_X^*,$$

$$\Delta \left[ \sum_{\text{Hk}} \Delta W_{\text{cik}} Z_{\text{ghik}} \right]^* = \tilde{M}_Z^*, \quad (6)$$

$$\sum_{\text{Hk}} \Delta W_{\text{cik}} \leq W_d - W_{k-1},$$

где  $\tilde{M}_X^* = M_X^* - \bar{M}_{X_{k-1}} + \Delta \bar{M}_{X_{bk}}$ ,  $\tilde{M}_Z^* = M_Z^* - \bar{M}_{Z_{k-1}} + \Delta \bar{M}_{Z_{bk}}$ .

Для различного количества слагаемых  $\Delta W_{\text{cik}}$  система уравнений (6) решается по-разному.

Если на этапе производится обработка только одного трюма, то (6) принимает следующий вид:

$$\Delta_c \Delta W_{c1k}^* X_{gh1k} = \tilde{M}_X^*,$$

$$\Delta_c \Delta W_{c1k}^* Z_{gh1k} = \tilde{M}_Z^*,$$

$$\Delta W_{c1k}^* \leq W_d - W_{k-1}.$$

Из первого и второго уравнений получим соответственно:

$$\Delta W_{c1kX}^* = \tilde{M}_X^* / (\Delta_c X_{gh1k}), \quad (7)$$

$$\Delta W_{c1kZ}^* = \tilde{M}_Z^* / (\Delta_c Z_{gh1k}).$$

Причем  $\Delta W_{c1kZ}^* \leq \Delta W_{c1k}^* \leq \Delta W_{c1kX}^*$ , т.е. неравенство справедливо, если  $\Delta W_{c1kZ}^* \leq \Delta W_{c1kX}^*$ .

В случае, если на этапе одновременно производится обработка двух трюмов, то выражение (6) принимает вид:

$$\Delta_c (\Delta W_{c1k}^* X_{gh1k} + \Delta W_{c2k}^* X_{gh2k}) = \tilde{M}_X^*;$$

$$\Delta_c (\Delta W_{c1k}^* Z_{gh1k} + \Delta W_{c2k}^* Z_{gh2k}) = \tilde{M}_Z^*; \quad (8)$$

$$\Delta W_{c1k}^* + \Delta W_{c2k}^* \leq W_d - W_{k-1}.$$

Из первых двух уравнений (8) находим граничные значения  $\Delta W_{c1k}^*$  и  $\Delta W_{c2k}^*$ , которые имеют следующий вид:

$$\Delta W_{c1k}^* = (\tilde{M}_X^* Z_{gh2k} - \tilde{M}_Z^* X_{gh2k}) / [\Delta_c (X_{gh1k} Z_{gh2k} - X_{gh2k} Z_{gh1k})];$$

$$\Delta W_{c2k}^* = (\tilde{M}_Z^* X_{gh1k} - \tilde{M}_X^* Z_{gh1k}) / [\Delta_c (X_{gh1k} Z_{gh2k} - X_{gh2k} Z_{gh1k})].$$

Причем при наличии двух обрабатываемых на этапе трюмов существование допустимой стратегии проведения грузовых операций истинно, если выполняется условие:

$$\Delta W_{c1k}^* + \Delta W_{c2k}^* < W_d - W_{k-1}.$$

В случае трех и большего числа одновременно обрабатываемых трюмов число переменных в граничных уравнениях больше числа уравнений, поэтому область допустимых значений переменных  $\Delta W_{cik}$  является ограниченной областью многомерного пространства, причем размерность пространства равна числу одновременно обрабатываемых трюмов. В свою очередь, ограничение по суммарному весу  $\Delta W_{cik}$  является плоскостью в пространстве допустимых значений, т. е. также пространством, но на одно измерение меньшим относительно исходного.

Так при числе переменных равном трем, что обозначим  $n = 3$ , исходная система принимает следующий вид:

$$\Delta_c (\Delta W_{c1k} * X_{gh1k} + \Delta W_{c2k} * X_{gh2k} + \Delta W_{c3k} * X_{gh3k}) = \tilde{M}_X^* ;$$

$$\Delta_c (\Delta W_{c1k} * Z_{gh1k} + \Delta W_{c2k} * Z_{gh2k} + \Delta W_{c3k} * Z_{gh3k}) = \tilde{M}_Z^* ; \quad (9)$$

$$\Delta W_{c1k} + \Delta W_{c2k} + \Delta W_{c3k} \leq W_d - W_{k-1}.$$

Решение (9) предлагается производить следующим образом. Вначале необходимо его привести к виду уравнения с двумя переменными, перенося одну из переменных в правую часть и задавая ее значения из допустимого интервала. Очевидно, что имеется три варианта такого преобразования, которые дают одинаковые результаты. Рассмотрим один из них, оставляя независимой переменной  $\Delta W_{c3k}$ , т. е. перенося в правую часть выражение, содержащее эту переменную. Тогда первые два уравнения (9) принимают вид:

$$\Delta_c (\Delta W_{c1k} * X_{gh1k} + \Delta W_{c2k} * X_{gh2k}) = \tilde{M}_X^* - \Delta_c \Delta W_{c3k} * X_{gh3k} ;$$

$$\Delta_c (\Delta W_{c1k} * Z_{gh1k} + \Delta W_{c2k} * Z_{gh2k}) = \tilde{M}_Z^* - \Delta_c \Delta W_{c3k} * Z_{gh3k} .$$

Решением этих уравнений является:

$$\Delta W_{c1k}^* = \frac{(\tilde{M}_X^* - \Delta_c \Delta W_{c3k} * X_{gh3k})Z_{gh2k} - (\tilde{M}_Z^* - \Delta_c \Delta W_{c3k} * Z_{gh3k})X_{gh2k}}{\Delta_c (X_{gh1k}Z_{gh2k} - X_{gh2k}Z_{gh1k})} ,$$

$$\Delta W_{c2k}^* = \frac{(\tilde{M}_Z^* - \Delta_c \Delta W_{c3k}^* Z_{gh3k}) X_{gh1k} - (\tilde{M}_X^* - \Delta_c \Delta W_{c3k}^* X_{gh3k}) Z_{gh1k}}{\Delta_c (X_{gh1k} Z_{gh2k} - X_{gh2k} Z_{gh1k})}$$

Полученные выражения позволяют произвести вычисление граничных значений переменных  $\Delta W_{c1k}$  и  $\Delta W_{c2k}$ , как функций задаваемой независимой граничной переменной  $\Delta W_{c3k}^*$ . С учетом последнего неравенства выражения (9), которое является уравнением плоскости в трехмерном пространстве.

Для существования множества допустимых стратегий проведения грузовых операций необходимо, чтобы хотя бы одна угловая точка области была ближе к началу координат, чем ограничивающая плоскость суммарного веса

$$\Delta W_{c1k} + \Delta W_{c2k} + \Delta W_{c3k} = W_d - W_{k-1}$$

Аналитически это выражается неравенствами вида

$$\Delta W_{c1k}^* + \Delta W_{c2k}^* + \Delta W_{c3k}^* \leq W_d - W_{k-1}$$

Число неравенств равно числу угловых точек. В данном случае оно равно 8, а в произвольном – рассчитывается по формуле  $2^n$ . Аналогично поступаем в случае большего числа одновременно обрабатываемых трюмов, учитывая следующие соображения.

Во-первых, в правую часть первых двух равенств исходной системы в качестве независимых переменных переносятся те, для которых по некоторым соображениям можно указать граничные значения. Для остальных находят граничные значения в результате решения равенств.

Во-вторых, полученные граничные значения линейно зависят от независимых переменных, что позволяет проверять только угловые точки области, ограниченной допустимыми плоскостями, соответствующими граничным значениям переменных.

В-третьих, для проверки существования множества допустимых стратегий проведения грузовых операций необходимо, чтобы было справедливым хотя бы одно из  $2^n$  неравенств:



$$\Delta W_{c1k}^* + \dots + \Delta W_{cik}^* + \dots + \Delta W_{cnk}^* \leq W_d - W_{k-1}.$$

В случае, если существует множество допустимых стратегий проведения грузовых операций, необходимо произвести поиск оптимальной.

### Выводы

1. Рассмотрен способ, позволяющий рассчитать максимальное количество груза, принимаемого в трюма на конкретном этапе загрузки судна.
2. Предлагаемый способ позволяет соблюсти параметры посадки, остойчивости и прочности судна в допустимых пределах.
3. Получены расчетные формулы для определения количества груза в случае одновременной загрузки двух и трех трюмов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксютин Л. Р. Грузовой план судна. – М.: Транспорт, 1976. – 112 с.
2. Заичко В.С. Особенности формализации загрузки судов генеральными грузами // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 25 - 28.
3. Заичко В.С. Специфика учета ограничений по грузоместимости трюмов при загрузке судов генеральными грузами // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 53 - 57.
4. Заичко В.С. Моделирование укладки генеральных грузов в трюма судна // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 51 - 55.
5. Цымбал Н.Н., Васьков Ю.Ю. Выбор оптимального варианта проведения грузовых операций навалочных судов // Автоматизация судовых технических средств. – 2004. – № 9. – С. 103 – 107.
6. Заичко В.С. Алгоритм формирования множества допустимых загрузок судна генеральными грузами // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 59 - 62.

*Рукопись поступила в редакцию 29.12.2012 г.*