

## ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ БАЛКЕРА НАВАЛОЧНЫМ ГРУЗОМ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Большую часть грузов, перевозимых балкерами, составляют навалочные грузы, загрузка которых имеет некоторые особенности.

Грузовые и балластные операции балкеров производятся в несколько этапов, причем для каждого стандартного варианта проведения грузовых операций в инструкции по загрузке приводится последовательность этапов загрузки судна в зависимости от удельного погрузочного объема груза.

В случае нестандартных загрузок балкеров возникают трудности с организацией размещения грузов, обеспечивающее мореходную безопасность судов и эффективное использование их грузоподъемности и грузоместимости. В такой ситуации судоводителю приходится самостоятельно формировать стратегию проведения грузовых операций, определяя число и последовательность этапов грузовых и балластных операций.

В работах [1 – 3] рассмотрены общие принципы оптимизации грузовых операций навалочных судов при нестандартных загрузках с помощью симплекс-метода. Также вопросы оптимизации загрузки судов навалочными грузами рассмотрены в работах [4, 5].

Целью статьи является рассмотрение использования методов линейного программирования для формирования предварительного грузового плана балкера при его нестандартных загрузках.

Для определения возможности безопасной загрузки балкера необходимо воспользоваться полученной в работе [7] аналитической формулировкой такой задачи в терминах теории линейного программирования, которая в данном случае принимает в стандартной форме следующий вид:

$$z = \sum_{i=1}^{Nmn} W_i \rightarrow \max ;$$

$$\sum_{i=1}^{Nmn} W_i X_{gi} + s_1 = M_{x \max} ;$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{N_{mn}} W_i X_{gi} - s_2 &= M_{x \min}; \\
\sum_{i=1}^{N_{mn}} W_i Z_{gi} + s_3 &= M_{z \max}; \\
\sum_{i=1}^{N_{mn}} W_i Z_{gi} - s_4 &= M_{z \min}; \\
\sum_{i=1}^{N_{mn}} W_i + s_5 &= G_c; \\
W_i + s_{oi} &= W_{di}; \quad (i=1 \dots N_{mn}) \\
s_1, \dots, s_5 &\geq 0; \\
s_{o1}, s_{o2}, \dots, s_{oN_{mn}} &\geq 0,
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $z$  – критерий оптимальности (суммарное количество принятого груза);  $W_i$  – количество груза в каждом из трюмов выбранного набора;  $X_{gi}$ ,  $Z_{gi}$  – координаты центра тяжести груза в  $i$ -м трюме;  $W_{di}$  – допустимое количество груза в  $i$ -м трюме;  $N_{mn}$  – количество трюмов в наборе.

Величина лимитирующих моментов  $M_{x \max}$  и  $M_{x \min}$  определяется требованиями по плавучести и посадке судна, а моментов  $M_{z \max}$  и  $M_{z \min}$  – требованиями по его остойчивости. Специфика конструкции навалочных судов обеспечивает требуемую начальную остойчивость судна, высокий уровень которой может вступать в противоречие с требованиями, лимитирующими критерий ускорения. Поэтому допустимость выбранного варианта загрузки должна проверяться величиной момента  $M_{z \min}$ , определяющего максимальную начальную остойчивость судна и моментами  $M_{x \max}$  и  $M_{x \min}$ , лимитирующими величину и знак его крена. В свою очередь, величины моментов:

$$\begin{aligned}
M_{z \min} &= D(Z_m - h_{\max} + dh) - M_{zv} - M_{zs}; \\
M_{z \max} &= D(Z_m - h_{\min} + dh) - M_{zv} - M_{zs}; \\
M_{x \max} &= DX_c - M_{xv} - M_{xs}; \\
M_{x \min} &= M_{x \max} + 100d_{\max} m_d,
\end{aligned} \tag{2}$$

где  $d_{\max}$  и  $m_d$  – соответственно максимальный допустимый дифферент на корму и удельный дифференцирующий момент на один сантиметр;  $D$  – водоизмещение судна;  $X_c$  – абсцисса центра величины;

$h_{\max}$  и  $h_{\min}$  – экстремальные значения метацентрической высоты;  $M_{zv}$ ,  $M_{xv}$ ,  $M_{zs}$  и  $M_{xs}$  – статические моменты соответственно судна порожнем и судовых запасов.

Поэтому условиями, определяющими возможность размещения груза в выбранном наборе трюмов, являются:

$$\begin{aligned} M_{x\min} &\leq W_1 X_{g1} + W_2 X_{g2} + \dots W_i X_{gi} + \dots W_{Nmn} X_{gNmn} \leq M_{x\max} ; \\ M_{z\min} &\leq W_1 Z_{g1} + W_2 Z_{g2} + \dots W_i Z_{gi} + \dots W_{Nmn} Z_{gNmn} . \end{aligned} \quad (3)$$

В приведенные выражения входят значения количества груза  $W_i$  в каждом из трюмов, которые перед решением задачи являются неизвестными. Известна только их сумма, равная значению  $G_c$ . Поэтому для проверки условия (3) в первом приближении можно считать, что количество груза во всех трюмах набора одинаково, т.е.  $W_i = G_c / N_{mn}$ . Так как окончательное распределение количества груза по трюмам может отличаться от предполагаемого, то в условии (3) следует расширить диапазон возможных значений анализируемых величин, т.е. уточненное условие:

$$\begin{aligned} 0,7 M_{x\min} &\leq W_1 X_{g1} + W_2 X_{g2} + \dots W_i X_{gi} + \dots W_{Nmn} X_{gNmn} \leq 1,5 M_{x\max} ; \\ 0,8 M_{z\min} &\leq W_1 Z_{g1} + W_2 Z_{g2} + \dots W_i Z_{gi} + \dots W_{Nmn} Z_{gNmn} . \end{aligned} \quad (4)$$

Также следует отметить, что при первоначальном допущении равенства груза во всех трюмах координаты центров тяжести  $X_{gi}$  и  $Z_{gi}$ , рассчитанные с учетом этого допущения, тоже будут отличаться от конечных значений, а так как они входят в исходную задачу (1), то это обстоятельство предполагает итерационный характер ее решения, предполагающий уточнение значений  $X_{gi}$  и  $Z_{gi}$ . При этом будут уточняться значения количества груза  $W_i$  в каждом из трюмов.

Для поиска допустимого варианта размещения груза в наборе трюмов необходимо выбрать один из минимальных наборов трюмов и запустить работу симплекс-метода, который параметризуется значениями выбранного варианта. Создается соответствующая симплекс-таблица, которая выводится на экран монитора с указанием ведущей строки, ведущего столбца и ведущего элемента, как показано на рис.

При каждой итерации очередная симплекс-таблица отображается на экране монитора.

Для получения симплекс-таблицы, соответствующей новой итерации, необходимо произвести следующие вычислительные операции метода Гаусса-Жордана. Прежде всего, необходимо найти новую ведущую строку, расположение которой соответствует предыдущей

таблице, а каждый из ее новых элементов соответствует старому элементу, деленному на ведущий элемент. Причем в первом столбце вместе базовой переменной  $s_1$  заносится новая переменная  $W_1$ , соответствующая ведущему столбцу. Затем формируются остальные строки, включая  $z$ -уравнение, по следующему алгоритму. Каждый новый элемент каждой из строк рассчитывается, как элемент старой строки, от которого отнимается произведение соответствующего элемента ведущего столбца на соответствующий элемент новой ведущей строки.

БП	Z	w1	w2	w3	w4	w5	s1	s2	s3	s4	s5	So1	So2	So3	So4	So5	Реш
Z	1	0	0	-1	-1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4546
w1	0	1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4546
s2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	74300
s3	0	0	2	9	13	15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	589341 39142
s4	0	0	2	9	13	15	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	331105 21991
s5	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	42682 25489
w5	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2554 3787
So2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	10292
So3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	10922
So4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10736
So5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8500 8500

Рис. Симплекс-таблица произвольной итерации

В полученной симплекс-таблице снова находят ведущий столбец и ведущую строку, позволяющих получить очередную итерацию. Процедура повторяется таким образом до тех пор, пока в  $z$ -уравнении очередной итерации не исчезнут отрицательные коэффициенты. Такая финальная симплекс-таблица соответствует конечному решению, где в перечне базовых переменных (первый столбец) фигурируют переменные  $W_1 \div W_{Nmn}$ , а их искомые значения находятся в соответствующих местах последнего столбца "Решение", причем последний элемент, соответствующий  $z$ -уравнению, представляет собой максимальное количество принимаемого груза, которое не превосходит заданное  $G_c$ .

Следует отметить, что полученное распределение груза по трюмам рассматриваемого набора следует также проверять по соответствию требованиям общей продольной прочности.

Указанная циклическая процедура поиска значений  $W_1 \div W_{Nmn}$  дает их первое приближение, по которому вычисляются уточненные значения координат центра тяжести груза в каждом из трюмов. Затем процедура повторяется, как второе приближение, позволяющее получить уточненные значения  $W_1 \div W_{Nmn}$ . Как показали расчеты на ЭВМ, число приближений не превосходит трех.

Полученное таким образом допустимое конечное состояние загруженного судна создает предпосылки для формирования стратегии проведения загрузки судна, включающей конечное число этапов приема груза и сдачи балласта, которое в значительной мере определяется количеством одновременно загружаемых трюмов. Если число одновременно загружаемых трюмов  $N_{eq}$  равно числу трюмов  $N_{mn}$  исходного набора, то существует только один этап, который переводит судно из начального в конечное допустимые состояния.

Предложенный в статье метод позволяет генерировать загрузки судна грузом, удельный погрузочный объем которого отличен от стандартных загрузок, а количество является произвольным. Для проверки такой возможности с помощью имитационной модели были сформированы загрузки судна "Скай Джемени" полным грузом для значений удельного погрузочного объема, равных 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,2, 1,3, 1,5, 1,6, и 1,7. Результаты имитационного моделирования приведены в табл.

Таблица

Моделирование нестандартных загрузок

$\gamma$	Трюма	$W$ , т	$Tm$ , м	$D$ , м	$h$ , м
0,50	2, 3, 5, 7	45888	11,02	0	4,08
0,60	1, 2, 5, 7, 8	47228	11,26	-1,07	4,40
0,70	1, 2, 5, 7, 8	47228	11,26	-0,98	3,77
0,80 А	1, 3, 4, 5, 6, 8	47112	11,25	-1,07	4,40
0,80 Б	1, 2, 3, 6, 7, 8	47227	11,26	-1,05	3,99
0,90 А	1, 3, 4, 5, 7, 8	47228	11,26	-0,91	3,55
0,90 Б	1, 2, 4, 6, 7, 8	47228	11,26	-0,92	3,59
1,20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	47228	11,26	-0,87	3,42
1,50	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	40473	10,06	0	3,27
1,60	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	38299	9,67	0	3,30
1,70	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	36047	9,26	-0,35	3,41

В таблице использованы следующие сокращения:  $W$  – количество принимаемого груза;  $Tm$  – средняя осадка судна;  $D$  – дифферент суд-

на;  $h$  – начальная поперечная метацентрическая высота;  $\gamma$  – удельный погрузочный объем.

Анализ приведенной таблицы показывает, что для всех рассмотренных значений удельного погрузочного объема существуют допустимые варианты загрузки в минимальные наборы трюмов. Причем для загрузки с удельным погрузочным объемом 0,80 существует шесть допустимых вариантов, а для значения удельного погрузочного объема 0,90 – три варианта.

Таким образом, использован метод линейного программирования для формирования предварительного плана в случае нестандартных грузов судна навалочным грузом, обеспечивающего прием максимального количества груза при соблюдении требований мореходной безопасности.

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что для всех рассмотренных значений удельного погрузочного объема существуют допустимые варианты загрузки в минимальные наборы трюмов. Причем для загрузки с удельным погрузочным объемом 0,80 и 0,90 существует три варианта загрузки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизов В.Г. Теория корабля. – Одесса: Феникс, 2003. – 282 с.
2. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере. – СПб.: Судостроение, 1992. – 224 с.
3. Кацман Ф.М. Теория и устройство судов /Ф.М. Кацман, Д.В. Дорогостайский, А.В. Конов, Б.П. Коваленко. – Л.: Судостроение, 1991. – 416 с.
4. Мельник В.Н. Эксплуатационные расчеты мореходных характеристик судна. – М.: Транспорт, 1990. – 142 с.
5. Васьков Ю.Ю. Некоторые вопросы оптимизации грузовых операций навалочных судов // Судовождение. – № 6. – 2003. – С. 40 – 45.
6. Цымбал Н.Н. Формирование оптимизационной задачи проведения грузовых операций навалочных судов/ Цымбал Н.Н., Васьков Ю.Ю. // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА – 2004. – Вып. 7. – Одесса: Латстар, – С. 3 – 10.
7. Васьков Ю.Ю. Оптимизация грузовых операций навалочных судов. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Одесса: ОНМА, 20053 – 24 с.