



ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ КОНТЕЙНЕРНОГО СУДНА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

¹ ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Новороссийский филиал, Новороссийск, Россия

Ключевые слова: оптимизация, проектирование, контейнерное судно, математическая модель, начальный этап проектирования, главные размерения, критерий эффективности.

THE TASK OF CONTAINER SHIP OPTIMIZING A AT THE INITIAL DESIGN STAGE

¹ FAI «Russian maritime register of shipping», Novorossiysk branch, Novorossiysk, Russia

Keywords: optimization, design, container ship, mathematical model, initial design stage, main dimensions, efficiency criterion.

В большинстве случаев, особенно на ранних этапах проектирования, в качестве оптимизируемых переменных выбираются главные размерения судна и коэффициенты

полноты. Однако, большинство современных моделей носят смешанный характер оптимизации, то есть к оптимизируемым переменным добавляются технические характеристики судна: водоизмещение, скорость, дедвейт. Такой подход позволяет сократить трудоемкость расчетов и решать с помощью модели более широкий спектр задач.

Одной из главных переменных в задачи оптимизации является критерий эффективности. В теории проектирования он определяет степень достижения желаемого результата. При этом, для начального этапа проектирования критерием эффективности могут быть приняты различные переменные, однако наиболее применяемым является условие минимальной стоимости постройки и эксплуатации судна:

$$(Z = CSC + COY \cdot N_{LIFE}) \rightarrow \min \quad (1)$$

где CSC – стоимость постройки судна, COY – стоимость эксплуатации судна в год, N_{LIFE} – расчетный срок службы судна.

Выбор данного типа критерия обусловлен в первую очередь типом судна. Контейнеровозы – суда изначально проектирующиеся и строящиеся для достижения материальной выгоды путем транспортировки необходимого груза в контейнерах до места назначения. Соответственно, чем большую прибыль способно приносить судно, тем более представленный проект будет привлекателен для Заказчика и шансы на его воплощение в жизнь возрастут. Финансовые затраты так же являются универсальным и целостным параметром оценки эффективности судна, т. к. расчеты данного показателя затрагивают самые разные свойства системы и позволяют количественно оценить их приемлемость в определенном варианте математической модели. Выбранный тип критерия, конечно, является далеко не единственно возможным.

Система ограничений – это комплекс алгебраических выражений, отсеивающий неудовлетворяющие некоторым условиям варианты расчетов математической модели. Ограничения формируются исходя из поставленной задачи: условия технического задания от Заказчика, ограничения, накладываемые Классификационными обществами на данный тип судов, условия применимости конкретных формул. Благодаря отсеиванию подавляющего числа вариантов, сокращается время на анализ полученных в конечном результате данных, что делает систему ограничений одним из важнейших компонентов успешного проектирования судна.

Контейнерные суда являются очень специфичным типом грузовых судов с широким раскрытием палубы и высоким центром тяжести, ввиду наличия большого количества палубного груза. Этот фактор обуславливает наличие к ним специальных требований в части обеспечения достаточной прочности, остойчивости и других мореходных качеств. Система наложенных ограничений в процессе оптимизации контейнерного судна имеет схожий с другими типами вид, однако значения ограничивающих значений могут значительно отличаться. В первую очередь это может касаться минимального значения начальной исправленной метацентрической высоты, минимального надводного борта, максимального значения изгибающего момента и других переменных.

При разработке алгоритма оптимизации в настоящем исследовании используется 4 основных ограничения-неравенства для значений выбранных компонентов математической модели. Нарушение любого из них делает вариант неприемлемым к дальнейшим расчетам и возвращает программу в «исходное положение» для генерации нового значения переменной.

Если математическая модель удовлетворяет всем вышеперечисленным ограничениям, процесс оптимизации продолжается путем выбора успешного варианта по величине критерия.

Основные ограничения системы:

- 1) Требование минимального надводного борта:



$$0 \leq F - F_{\text{MIN}} \quad (2)$$

Минимальная высота надводного борта строго регламентируется Классификационным обществом [1], так как является одним из важнейших требований к судну, обеспечивающих его безопасность.

2) Обеспечение минимального значения начальной исправленной метацентрической высоты по критерию:

$$0 \leq h - h_{\text{MIN}} \quad (3)$$

Регламентирование минимального значения начальной исправленной метацентрической высоты h_{min} также является обязательным условием безопасности судна и регламентируется правилами Классификационных обществ [2].

3) Обеспечение минимальной заданной контейнеровместимости судна:

$$ZADK \leq KONV \quad (4)$$

Обеспечение необходимой контейнеровместимости судна $ZADK$ – главное экономическое условие существования системы. Данный параметр, как правило, устанавливается Заказчиком на этапе технического задания.

4) Условие достаточной грузоподъемности судна:

$$0 \leq M_{\text{GR}} - P_{\text{KON}} \cdot KONV \quad (5)$$

Проверка достаточной грузоподъемности судна происходит при расчете нагрузки судна по разделам. Условие представляет собой сравнение рассчитанной массы груза M_{GR} с весом всех контейнеров.

Помимо нахождения оптимального значения критерия эффективности, система должна соответствовать наложенным ограничениям, перечень которых определяет Проектант, исходя из требований Заказчика, классификационных обществ и опыта проектирования.

В итоге, общая задача оптимизации судна будет сводиться к нахождению варианта судна, удовлетворяющему условиям:

$$\begin{cases} OGR = 0 \\ Z > Z_{\text{OPT}} \end{cases} \quad (6)$$

где OGR – количество нарушенных ограничений, а Z_{OPT} и Z – оптимальное и рассчитанное значение критерия эффективности соответственно.

Таблица 1. Основные переменные математической модели

Название раздела	Переменная
Главные размерения	Ширина судна В, Осадка судна Т, надводный борт Н
Нагрузка и общая вместимость	Дедвейт судна DWT, вместимость судна V
Непотоплаемость	Количество поперечных переборок N_{PER}
Расчет общего сопротивления	Мощность энергетической установки Р
Построение теоретического чертежа	Обводы судна
Остойчивость	Начальная метацентрическая судна h
Расчет контейнеровместимости	Контейнеровместимость судна KONV
Экономические показатели	Стоимость постройки судна CSC, стоимость эксплуатации судна COY

Базой расчетов для проектирования судна является его «электронная копия» - математическая модель, состоящая из формул и разделов, определяющих основные характеристики судна. Основные переменные, определяемые в том или ином разделе математической модели приведены в Таблице 1. Как видно из структуры Таблицы 1,



последним разделом математической модели является расчет экономических показателей, итогом вычисления которого является определение критерия эффективности системы – стоимости постройки и эксплуатации судна.

Контейнерное судно является специализированным типом судна, особенность проектирования которого состоит в необходимости выбора главных размерений, кратных размерам стандартного 20-ти футового контейнера. Таким образом, главные размерения судна, определяемые в соответствующем разделе модели «Главные размерения», в соответствии с методикой [3] будут вычисляться:

$$B_{tr} = k'_3 \cdot n_{kr} \cdot B_{KON} \quad (7)$$

$$B = B_{tr} \cdot b_{dv} \quad (8)$$

$$H_{tr} = n_{ky} \cdot H_{KON} \quad (9)$$

$$H = H_{tr} \cdot H_{dy} \quad (10)$$

$$T = V / (LPP \cdot \delta \cdot B) \quad (11)$$

$$F = H - T \quad (12)$$

где n_{kr} – количество контейнеров в одном ярусе,

B_{KON} – ширина контейнера,

H_{kon} – высота контейнера,

n_{ky} – число ярусов контейнеров в трюме,

$b_{dv} = 1.25$ - коэффициент, учитывающий ширину двойного борта,

$k'_3 = 1.14$ - эмпирический коэффициент, учитывающий зазоры между контейнерами,

B_{tr} – ширина трюма,

B – ширина контейнерного судна,

H_{tr} – высота трюма,

H – высота борта судна,

T – осадка судна,

F – высота надводного борта,

H_{dv} – высота пространства под трюмами.

В качестве оптимизируемых переменных для контейнерного судна наиболее рациональным будет выглядеть выбор следующих оптимизируемых переменных: L , δ , D , n_{kr} , n_{ky} – длины судна, коэффициента общей полноты, водоизмещения, количества трюмных контейнеров по ширине судна и количества контейнеров в трюмном ярусе.

Таблица 2. Исходные данные

№	Наименование параметра	Ед.	Обознач.
1	Длина	м	L_{PP}
2	Объемное водоизмещение	m^3	V
3	Коэффициент общей полноты	---	δ
4	Кол-во контейнеров по ширине судна	TEU	n_{kr}
5	Число ярусов контейнеров в трюме	TEU	n_{ky}
6	Заданная контейнеровместимость	TEU	ZADK
7	Удельный погрузочный объем	m^3/t	μ_z
8	Высота пространства под трюмами	м	H_{dv}
9	Дальность плавания	мили	S_{PL}
10	Частота вращения винта	об/мин	n_{ob}
18	Скорость судна	узл	v_o
19	Автономность	сут	AVTN
20	Вес контейнера	т	P_{KON}

Основные данные для заполнения вектора технического задания берутся с судна-прототипа, однако в будущем проекте могут быть и существенные отличия, которые



должны быть учтены и отображены на самом начальном этапе. Например, Заказчик может потребовать увеличенную контейнеровместимость, по сравнению с судном-прототипом, компенсируя это дополнительными финансовыми вложениями в проект. Пример возможного набора исходных данных для расчета математической модели контейнерного судна приведен в Таблице 2.

Таким образом, общая задача оптимизации контейнерного судна будет определяться выражением:

$$\begin{aligned} &C(KONT, B, T, DWT, V, N_{PER}, P, h, KONV, CSC, COY, c_{12}, \dots, c_p) \\ &X(L, \delta, D, n_{kr}, n_{ky}) \\ &F_{min} \leq F, h_{min} \leq h, ZADK \leq KONV, 0 \leq M_{GR} - P_{KON} \cdot KONV, x_i \leq x, i=1, \dots, n \\ &Z \rightarrow \min \end{aligned} \quad (13)$$

в котором C – вектор технического задания, $KONT$ – заданная контейнеровместимость судна, X – вектор оптимизируемых переменных, x_i – вектор ограничений системы.

В представленном виде задача оптимизации судна определена во многих источниках. Это позволяет утверждать, что на сегодняшний, сформировалось четкое понимание формулировки требований к процессу оптимизации и при каких условиях он должен происходить. Существуют отличия лишь в методах проведения оптимизации, которые используют различные подходы к рассматриваемым векторам исходных данных, оптимизируемым переменным и параметрам систем судна.

Список литературы:

1. Правила грузовой марке морских судов. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург. – 2025 г.;
2. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV «Остойчивость». Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург. – 2025 г.;
3. Гайкович А. И. Проектирование контейнерных судов. Учебное пособие. Л.: изд. ЛКИ, 1984. 27 с.

