

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi81.551

Разработка технических критериев эффективности грузовых судов

Ю.А. Кочнев

ORCID: 0000-0002-6864-4473

И.Б. Кочнева

ORCID: 0000-0002-5612-3742

М.А. Попова

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Поиск элементов и характеристик транспортного судна в задачах исследовательского и оптимизационного проектирования выполняется по некоторому критерию, в качестве которого, как правило, выступает один из экономических показателей работы судна: прибыль, рентабельность, приведённые затраты и другие. Их расчёт достаточно трудоёмкий и требует наличия большого числа параметров, зависящих от быстро изменяемой (по сравнению с жизненным циклом судна) конъюнктурой рынка строительства и эксплуатации судна. Поэтому целесообразна замена экономических критериев эффективности на критерии, зависящие от главных неизвестных, таких как длина, ширина, осадка, высота борта, скорость, мощность и различные виды водоизмещения. Они определяются на начальных стадиях проектирования, когда основная цель – это выбор элементов с наилучшим показателем эффективности, а не поиск, например, непосредственно прибыли. Такие критерии позволяют упростить математическую модель, сократить её объём и сроки разработки, упростить выполнение численных экспериментов и анализ полученных результатов. В статье приведены разработанные шесть видов целевой функции для оптимизации судна, отражающие указанные выше экономические критерии, но не требующие для прогнозирования финансовых данных. Предложены частные коэффициенты для расчёта критериев наливного судна смешанного (река-море) плавания.

Ключевые слова: прибыль, приведённые затраты, математическая модель, грузовое судно, критерии эффективности.

A mathematical model of a liquid-loading vessels at the initial stages of design

Yuri A. Kochnev

ORCID: 0000-0002-6864-4473

Irina B. Kochneva

ORCID: 0000-0002-5612-3742

Marina A. Popova

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia.

Abstract. The search for elements and characteristics of a liquid-loading vessel in research and optimization design tasks is carried out according to a certain criterion, which is usually one of the economic indicators of the vessel's operation: profit, profitability, discounted costs, and others. Their calculation is quite labor-intensive and requires a large number of parameters that depend on the rapidly changing (compared to the vessel's life cycle) market conditions for shipbuilding and operation. Therefore, it is advisable to replace economic efficiency criteria with criteria that depend on the main unknowns, such as length, width, draft, height of the side, speed, power, and various types of displacement. These are determined at the initial stages of design, when the main goal is to select elements with the

best efficiency indicators, rather than seeking, for example, direct profit. Such criteria allow for the simplification of the mathematical model, reduction of its volume and development time, simplification of numerical experiments, and analysis of the obtained results. The article presents six types of objective functions developed for optimizing vessels, reflecting the above mentioned economic criteria but not requiring financial data for forecasting. Specific coefficients are proposed for calculating the criteria for a mixed (river-sea) cargo vessel.

Keywords: mathematical model, tanker, mass meters, seaworthiness, efficiency.

Введение

Задача оценки эффективности судна является одной из наиболее актуальных на всех этапах проектирования. Исследовательское проектирование, отличающиеся применением широкого спектра статистических методов и рассмотрением большого числа вариантов судов с различными главными размерениями [1], предъявляет особые требования к качеству критериев эффективности проекта. Экономические критерии требуют разработки адекватных методик, применимых на начальных стадиях проектирования, дополнительных трудоёмких модулей расчёта, и, что наиболее важно, весьма чувствительны к макроэкономическим показателям в стране и особенностям работы судна на конкретной линии. Существующие общепринятые технические критерии [2, 3], в виде тех или иных элементов и характеристик судна, даже в многокритериальной оптимизации, не могут полностью описать эффективность такого сложного объекта как судно. Таким образом разработка неэкономического критерия эффективности судна, но отражающего влияние большинства подсистем и на конечные качества, является актуальной задачей.

Материалы и методы

Применяемые экономические критерии оптимизации судна, наиболее полно отражающие его эффективность по данным [4, 5] приведена в таблице 1

Таблица 1

Измерители и модули массы

№	Наименование	Критерий	Пояснения
1	Годовая прибыль	$\Pi = Д - З \rightarrow \max$	Д – годовой доход; З – себестоимость или текущие затраты за год
2	Рентабельность	$\Xi = \frac{\Pi}{К} \rightarrow \max$	Π – годовая прибыль; К – капитальные вложения
3	Приведённые затраты	$ЗП = З + ЕК \rightarrow \min$	Е – нормативный коэффициент сравнительной эффективности вложений

Различные типы критериев, приведённые в таблице, наиболее часто состоят из доходов, текущих затрат за некоторый период и капитальных вложений, то есть определив эти три показателя для судна можно формировать достаточно широкий спектр целевых функций.

Доходы грузового судна могут быть с высокой степенью точности определены грузоподъёмностью, фрахтовой ставкой F и плечом перевозки груза [6]

$$Д = \sum_{k=1}^{n_{гр}} \Phi_k \times P_{\Sigma k} \times L_k, \quad (1)$$

где Φ_k – фрахтовая ставка перевозки k -ого типа груза;

$P_{\Sigma k}$ – суммарная масса k -ого типа груза;

L_k – плечо перевозки k -ого типа груза;

$n_{гр}$ – количество типов перевозимых грузов за рассматриваемый период.

В настоящее время, когда фрахтовая ставка может изменяться несколько раз за год, а направления перевозки грузов и их количество сложно прогнозируемы, все величины в уравнении (1) носят случайный характер. В задачах оптимизации исследовательского проектирования их можно заменить некоторым параметром относительной прибыли

$$a_p = \sum_{k=1}^{n_{гр}} \Phi_k \times w_{\Sigma k} \times L_k, \quad (2)$$

где $w_{\Sigma k}$ – доля массы k -ого перевозимого типа груза в полной грузоподъёмности судна $P_{гр}$ (т).

В таком случае доходы судна можно рассчитать по упрощённой формуле

$$Д = a_p \times P_{гр}, \quad (3)$$

где a_p – средняя стоимость дохода судна на единицы грузоподъёмности.

Капитальные вложения, представляющие собой в основной массе стоимость постройки судна [7] можно представить выражением

$$R = q_1 \times \sum_{i=1}^{10} R_i \times (1 + \varphi), \quad (4)$$

где q_1 – экспертный коэффициент;

R_i – отдельные статьи расходов строительства судна;

φ – налоговая ставка.

Стоимость материалов для постройки судна (R_1) зависит от норматива стоимости одной тонны и их массы, которые представляются через измерители и главные элементы и характеристики судна. Из теории проектирования судна [8, 9] все многообразие масс, требующих расчёта на начальном этапе проектирования, можно условно разделить на массы, зависящие от кубического модуля судна, то есть LBH (где L – длина судна; B – ширина; H – высота борта), к ним относятся масса корпуса, судовых систем, дельных вещей и т.д., и массы определяемые через мощность главных двигателей, N. Тогда стоимость постройки судна приближённо представляется уравнением

$$R_1 = \psi_{LBH} \times LBH \times \theta_{LBH} + \psi_N \times N \times \theta_N, \quad (5)$$

где ψ_{LBH}, θ_{LBH} – приведённый измеритель масс и норматив стоимости 1 тонны масс, зависящих от кубического модуля;

ψ_N, θ_N – приведённый измеритель масс и норматив стоимости 1 тонны масс, зависящих от мощности.

Основная заработная плата рабочих при изготовлении судна по мимо тарифных ставок (q_T), районного коэффициента и коэффициента различных доплат, зависящих от завода строителя, так же определяется массами и трудоёмкостью изготовления отдельных подсистем судна, то есть может быть представлена аналогично уравнению (5)

$$R_3 = q_T (\psi_{LBH} \times LBH \times \epsilon_{LBH} + \psi_N \times N \times \epsilon_N), \quad (6)$$

где $\epsilon_{LBH}, \epsilon_N$ – удельная трудоёмкость изготовления подсистем судна, определяемых через кубический модуль и мощность

Транспортно-заготовительные расходы (R_2) составляют долю от стоимости материалов, дополнительная заработная плата, единый социальный налог, расходы на

подготовку и освоение производства, общепроизводственные общехозяйственные расходы ($R_4 \dots R_8$) определяются заработной платой, а прочие и неучтённые расходы (R_9, R_{10}) зависят одновременно от R_1 и R_3 . Таким образом капитальные вложения приближённо равны

$$K = a_{LBH}LBH + a_N N \quad (7)$$

где a_{LBH}, a_N – параметры пропорциональности капиталовложений, зависящие от размерений и мощности судна, принимаемые или по статистики, или равные

$$a_{LBH} = \psi_{LBH}(k_1 \theta_{LBH} + k_2 q_T \epsilon_{LBH}) k_3, \quad (8)$$

$$a_N = \psi_N(k_1 \theta_N + k_2 q_T \epsilon_N) k_3, \quad (9)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности транспортно-заготовительных расходов, расходов на оплату труда, прочих и неучтённых расходов соответственно.

В работе [9] показано, что большинство модулей LBH, могут быть заменены на водоизмещение D . Дополнительно, если мощность судна представить через адмиралтейский коэффициент [10], уравнение (7) примет вид

$$K = a'_{LBH} D + a'_N D^{2/3} v^3 \quad (10)$$

где v – скорость хода;

a'_{LBH}, a'_N – параметры пропорциональности капиталовложений.

Текущие затраты при эксплуатации судна равны

$$З = k_{\text{доп}} \sum_{j=1}^6 З_j, \quad (11)$$

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент, учитывающий прочие прямые расходы по судну;

$З_j$ – отдельные статьи расходов на эксплуатацию судна, доминирующую составляющую в которых имеют стоимость топлива и лизинговые платежи.

Лизинговые платежи [11] будут составлять долю от строительной стоимости судна или капиталовложений

$$З_{\text{л}} = a_{\text{л}} K, \quad (12)$$

$a_{\text{л}}$ – лизинговая ставка.

Стоимость топлива за год равна

$$З_{\text{т}} = \Pi_{\text{т}} P_{\text{тс}}, \quad (13)$$

где $\Pi_{\text{т}}$ – стоимость одной тонны топлива, руб/т;

$P_{\text{тс}}$ – масса топлива, расходуемая за расчётный период, т, равная

$$P_{\text{тс}} = 1,2 q_1 t_{\text{экспл}} N, \quad (13)$$

где q_1 – удельный расход топлива, т/28Вт сут;

$t_{\text{экспл}}$ – расчётный период эксплуатации, сут.

Окончательно эксплуатационные затраты за расчётный период равны

$$З = a_{\text{л}} a_{LBH} LBH + N(a_{\text{л}} a_N + a_{\text{т}}) \quad (14)$$

или

$$З = D \left\{ a_{\text{л}} a'_{LBH} + \frac{v^3}{\sqrt[3]{D}} (a_{\text{л}} a'_N + a'_{\text{т}}) \right\}, \quad (15)$$

где $a_{\text{л}}$ – приведённый показатель лизинговых платежей;

$a_{\text{т}}, a'_{\text{т}}$ – параметр приведённых затрат на топливо, равные

$$a_T = \Pi_T 1,2q_1 t_{\text{экспл}},$$

$$a'_T = \frac{\Pi_T 1,2q_1 t_{\text{экспл}}}{Ca}.$$

Представляя значения доходов, затрат и капиталовложений в различной форме, а также объединяя приведённые и относительные величины получены технические критерии эффективности грузового судна

- отражающие прибыль

$$Q_{\Pi 1} = b_P \times P_{\text{гр}} - b_{LBH} LBH - b_N N \rightarrow \max; \quad (16)$$

$$Q_{\Pi 2} = D \left\{ b_P \eta - d_D - d_N \frac{v^3}{\sqrt[3]{D}} \right\} \rightarrow \max; \quad (17)$$

- отражающие рентабельности

$$Q_{\text{Э}1} = \frac{b_P \times P_{\text{гр}}}{f_{LBH} LBH + f_N N} \rightarrow \max; \quad (18)$$

$$Q_{\text{Э}2} = \eta \frac{b_P}{h_D + h_N \frac{v^3}{\sqrt[3]{D}}} \rightarrow \max; \quad (19)$$

- отражающий приведённые затраты

$$Q_{\text{ЗП}1} = j_{LBH} LBH + j_N N \rightarrow \min; \quad (20)$$

$$Q_{\text{ЗП}2} = D \left\{ k_D + k_N \frac{v^3}{\sqrt[3]{D}} \right\} \rightarrow \min, \quad (21)$$

где η – коэффициент утилизации водоизмещения по грузоподъёмности;

$b_P, b_{LBH}, b_N, d_D, d_N, f_{LBH}, f_N, h_D, h_N, j_{LBH}, j_N, k_D, k_N$ – весовые коэффициенты критерия эффективности (далее ВКЭ).

Следует отметить, что в уравнении (16, 18 и 20) значение кубического модуля может быть заменено на водоизмещение, которое, как было сказано выше, являются аналогичными.

В задачах исследовательского проектирования рассматривается не нахождение прибыли, рентабельности и приведённых затрат как таковое, а уровень их изменения при варьировании элементами и характеристиками судна. То есть, например, критерии $Q_{\Pi 1}$ может не равняться прибыли по абсолютным значениям, но его глобальные и локальные экстремумы должны совпадать по расположению с экстремумами функции распределения прибыли в зависимости от варьируемых величин. Тогда ВКЭ можно рассматривать как коэффициенты влияния грузоподъёмности (b_P), кубического модуля ($b_{LBH}, f_{LBH}, j_{LBH}$), мощности (b_N, f_N, j_N), водоизмещения (d_D, h_D, k_D) и удельной скорости (d_N, h_N, k_N) на конечный критерий эффективности.

При рассмотрении частного случая оптимизации одного элемента судна, перевозящего один тип груза на линии эксплуатации с заданными путевыми условиями ВКЭ можно получить аппроксимацией распределения экономических критериев в зависимости от оптимизируемого параметра.

Результаты

Экономические критерии эффективности, рассмотренные в таблице 1, для танкера класса М-СП 3,5 грузоподъёмностью 3000 т составляют: прибыль – 125998 усл. ед.,

рентабельность – 162 усл.ед., приведённые затраты – 42245 усл.ед. Расчёт значений был выполнен по методике [12], которая допускает оптимизацию при нулевом значении прямого или обратного груза, то есть оптимизацию или сухогруза или танкера без их комбинирования.

Уравнения 16-21 являются неопределёнными [13] и их решением является взаимовлияющая группа чисел, которую можно определить численными методами из предположения уровней влияния на критерий эффективности грузоподъёмности, кубического модуля и мощности.

Используя доходы судна, определяемые фрахтовой ставкой и грузоподъёмностью, величинами, не зависящими от стоимости строительства и слабо коррелирующие с условиями эксплуатации, определено значение коэффициента $b_P = 56,1$ и, приняв равное влияние LBH и N , получено, $b_{LBH} = 4,05$, $b_N = 0,13$, $f_{LBH} = 0,099$, $f_N = 0,003$, $j_{LBH} = 4,06$, $j_N = 0,13$, $d_D = 0,32$, $d_N = 0,022$, $h_D = 38,0$, $h_N = 2,6$, $k_D = 0,323$, $k_N = 0,022$.

Обсуждение

Полученные результаты носят частный характер, требуют уточнения и подробного анализа. Можно выделить два направления дальнейшего исследования основанных на численном эксперименте с большим числом вариантов различных условий эксплуатации грузового судна в диапазоне грузоподъёмностей и мощностей. Во-первых – это прямой расчёт коэффициентов исходя из уравнений (2), (5), (6), (8), (9), который даст наиболее точный результат, но потребует больших временных ресурсов. Второй – основан на регрессионном анализе прибыли, рентабельности и приведённых затрат, который позволит определить приближённые значения ВКЭ, но учитывая, применимость критериев не для расчёта экономических показателей, а для сравнения судов в задачах исследовательского проектирования, он даст результат с достаточной степенью точности.

Заключение

Для расчёта приведённых критериев эффективности достаточно использовать главные неизвестные элементы и характеристики судна, которые определяются на начальных этапах проектирования. Однако, через приближённые относительные величины они отражают применяемые в практике оптимизации экономические критерии. Их использование в задачах исследовательского проектирования и определения элементов и характеристик на начальных стадиях разработки проекта судна позволяет сократить трудозатраты на разработку и обоснование модулей математической модели судна без снижения конечной точности результата.

Список литературы

1. Худяков, Л.Ю. Исследовательское проектирование кораблей. – Л.: Судостроение, 1980. – 240 с.
2. Ашик, В.В. Проектирование судов. Учебник. – Л.: Судостроение, 1985. – 320 с.
3. Гусейнов, М. Р. Обоснование выбора критериев эффективности транспортных судов / М. Р. Гусейнов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2010. – № 3(18). – С. 89-95.
4. Бугаев, В. Г. Оценка влияния параметров модели оптимизации характеристик транспортных судов на оптимальное решение и значения критериев экономической эффективности / В. Г. Бугаев, М. В. Китаев // Морские интеллектуальные технологии. – 2013. – № S2. – С. 19-24
5. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. В 2 т. Т1. Описание системы «Корабль». – СПб.: изд. НИЦ МОРИНТЕХ, 2014 – 819с., 660рис., 154 табл., 766 формул, 688 ссылок

6. Платов, Ю. И. Определение стоимости фрахтования судов / Ю. И. Платов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2014. – № 41. – С. 326-330.
7. Васькин, С. В. К оценке стоимости постройки судов-сборщиков отходов / С. В. Васькин, Н. А. Рехалова // Проблемы экологии Волжского бассейна : Труды 6-й всероссийской научной конференции, Нижний Новгород, 24–25 ноября 2021 года. Том Выпуск 4. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2021. – С. 3.
8. Егоров, А. Г. Определение весовой нагрузки судов смешанного «река-море» плавания нового поколения в начальной стадии проектирования / А. Г. Егоров // Морской вестник. – 2013. – № 4(48). – С. 019-022.
9. Пospelov, В.И. Выбор на ЭВМ оптимальных элементов судна /В.И. Пospelov. – Л.: Судостроение, 1978. – 76с.
10. Роннов, Е.П. Проектирование судов : учебник / Е. П. Роннов.- СанктПетербург : Лань, 2022.- 294 с.
11. Трухинова, О. Л. Финансовые инструменты поддержки судостроения / О. Л. Трухинова // Актуальные проблемы управления : Сборник научных статей по итогам III Всероссийской научно-практической конференции, Нижний Новгород, 25 декабря 2016 года / Редколлегия: С.Н. Яшина, Ю.С. Ширяевой. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2016. – С. 282-288.
12. Гуляев, И. А. Оптимизация комбинированного судна типа танкер/площадка на основе имитационного моделирования / И. А. Гуляев, Е. П. Роннов, Ю. А. Кочнев // Научные проблемы водного транспорта. – 2022. – № 71. – С. 29-45. – DOI 10.37890/jwt.vi71.249.
13. Копылов, В. И. Решение неопределённых уравнений с тремя неизвестными / В. И. Копылов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. – 2008. – № 4(60). – С. 13-21.

References

1. Khudyakov, L. Yu. Research Design of Ships. – L.: Shipbuilding, 1980. – 240 p.
2. Ashik, V.V. Ship Design. Textbook. – L.: Shipbuilding, 1985. - 320 p.
3. Guseynov, M. R. Justification of the choice of efficiency criteria for transport vessels / M. R. Guseynov // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences. – 2010. – No. 3(18). – P. 89-95.
4. Bugaev, V. G. Assessment of the influence of optimization model parameters on the optimal solution and values of economic efficiency criteria for transport vessels / V. G. Bugaev, M. V. Kitaev // Marine Intelligent Technologies. – 2013. – No. S2. – P. 19-24
5. Gajkovich A.I. Theory of design of displacement ships and vessels. In 2 vols. T1. Description of the “Ship” system. St. Petersburg: SIC MORINTECH, 2014. 819 p.
6. Platov, Yu. I. Determining the Cost of Chartering Vessels / Yu. I. Platov // Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport. – 2014. – No. 41. – P. 326-330.
7. Vaskin, S. V. On the assessment of the cost of constructing waste collection vessels / S. V. Vaskin, N. A. Rekhhalova // Problems of Ecology of the Volga Basin: Proceedings of the 6th All-Russian Scientific Conference, Nizhny Novgorod, November 24–25, 2021. Volume Issue 4. – Nizhny Novgorod: Volga State University of Water Transport, 2021. – P. 3.
8. Yegorov, A. G. Determining the weight load of new generation mixed "river-sea" vessels in the initial stage of design / A. G. Yegorov // Marine Herald. – 2013. – No. 4(48). – P. 019-022.
9. Pospelov, V.I. Selection of Optimal Ship Elements on a Computer / V.I. Pospelov. – L.: Shipbuilding, 1978. – 76 p.
10. Ronnov, E.P. Ship Design: Textbook / E.P. Ronnov. - St. Petersburg: Lan, 2022. - 294 p.
11. Trukhinova, O. L. Financial Instruments for Supporting Shipbuilding / O. L. Trukhinova // Current Problems of Management: Collection of Scientific Articles Based on the Results of the III All-Russian Scientific and Practical Conference, Nizhny Novgorod, December 25, 2016 / Editorial Board: S.N. Yashina, Y.S. Shiryayeva. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, 2016. – P. 282-288.

12. Gulyaev, I. A. Optimization of a combined vessel of the tanker/platform type based on simulation modeling / I. A. Gulyaev, E. P. Ronnov, Yu. A. Kochnev // Scientific Problems of Water Transport. – 2022. – No. 71. – P. 29-45. – DOI 10.37890/jwt.vi71.249.
13. Kopylov, V. I. Solution of indeterminate equations with three unknowns / V. I. Kopylov // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I.Ya. Yakovlev. – 2008. – No. 4(60). – P. 13-21.

Кочнев Юрий Александрович, д.т.н., доцент, профессор кафедры Проектирования и технологии постройки судов ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: tmnkocho@mail.ru

Yuri A. Kochnev, doctor of Technical Sciences, Professor, professor of Department of Design and construction of ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Кочнева Ирина Борисовна, к.т.н., доцент, доцент кафедры Охраны окружающей среды и производственной безопасности ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: iringre@mail.ru

Irina B. Kochneva, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department the Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Попова Марина Александровна магистрант кафедры Проектирования и технологии постройки судов ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, email: shutovama@yandex.ru

Marina A. Popova, postgraduate student of Department of Design and construction of ships, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; опубликована онлайн 20.12.2024.
Received 29.10.2024; published online 20.12.2024.