

УДК 629.12.001.63

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДНА ПО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Былым В.Н.

Предложена математическая модель проектирования судов, позволяющая оптимизировать основные элементы судов по экономическим критериям с учетом выполнения технических требований.

В настоящее время задачей проектирования судов является создание проекта судна, которое удовлетворяло бы требованиям по грузоподъемности, грузовместимости, скорости хода, прочности, устойчивости и т.д. и имело бы наибольшую экономическую эффективность.

Приведенная ниже математическая модель реализует постановку и решение задачи определения основных элементов судов с точки зрения достижения наибольшего экономического эффекта при удовлетворении обычных технических требований. В математической модели используются следующие понятия. Проектные переменные - независимые величины, подлежащие определению при проектировании судна. Проектные параметры - величины, заданные проектантом, исходя из существующих традиций, анализа тенденций развития техники и т.д. Нормативные параметры - величины, обусловленные заданными проектными параметрами и правилами на постройку и эксплуатацию судна. Обобщенные переменные (по акад. Поздюнину В.Л.) - важные для проекта судна величины, которые можно определить по проектным переменным, проектным и нормативным параметрам. Критерий оптимальности (целевая функция) - показатель качества проекта судна.

Структура математической модели приведена на рисунке 1. В блоке задания проектных переменных и границ их изменения в качестве проектных переменных могут приниматься следующие величины: 1 L_{pp} - длина между перпендикулярами; 2 B - ширина по летнюю ГВЛ; 3 T - осадка по летнюю ГВЛ; 4 H - высота борта на миделе; 5 c_B - коэффициент общей полноты для длины между перпендикулярами; 6 $P_{гр}$ - грузоподъемность судна; 7 v_E - эксплуатационная скорость.

Из приведенного перечня в каждой конкретной задаче можно назначать комбинацию проектных переменных.

В блоке расчета пропульсивных характеристик определяется мощность главного двигателя. Буксировочная мощность и коэффициенты взаимодействия гребного винта и корпуса рассчитываются по методу, изложенному в [1]. Состав проектных и нормативных параметров ориентирован на этот метод. Принят следующий пропульсивный

комплекс малооборотный дизель, работающий непосредственно на винт фиксированного шага.

Скорость хода судна на испытаниях определяется по эксплуатационной скорости для Средиземного, Черного и Красного морей по приближенной формуле, полученной методом регрессионного анализа данных, приведенных в [2]

$$v_S = (v_E + 0,391) / 0,996,$$

где v_S - скорость хода судна на испытаниях, уз; v_E - эксплуатационная скорость, уз. Влиянием дедвейта на эту зависимость по данным регрессионного анализа в первом приближении можно пренебречь.

В соответствии с [1] буксировочное сопротивление представляется в виде следующих составляющих

$$R_{TOT} = (1 + k_1)R_F + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A,$$

где R_{TOT} - буксировочное сопротивление; R_F - сопротивление трения эквивалентной плоской пластины, коэффициент трения рассчитывается по

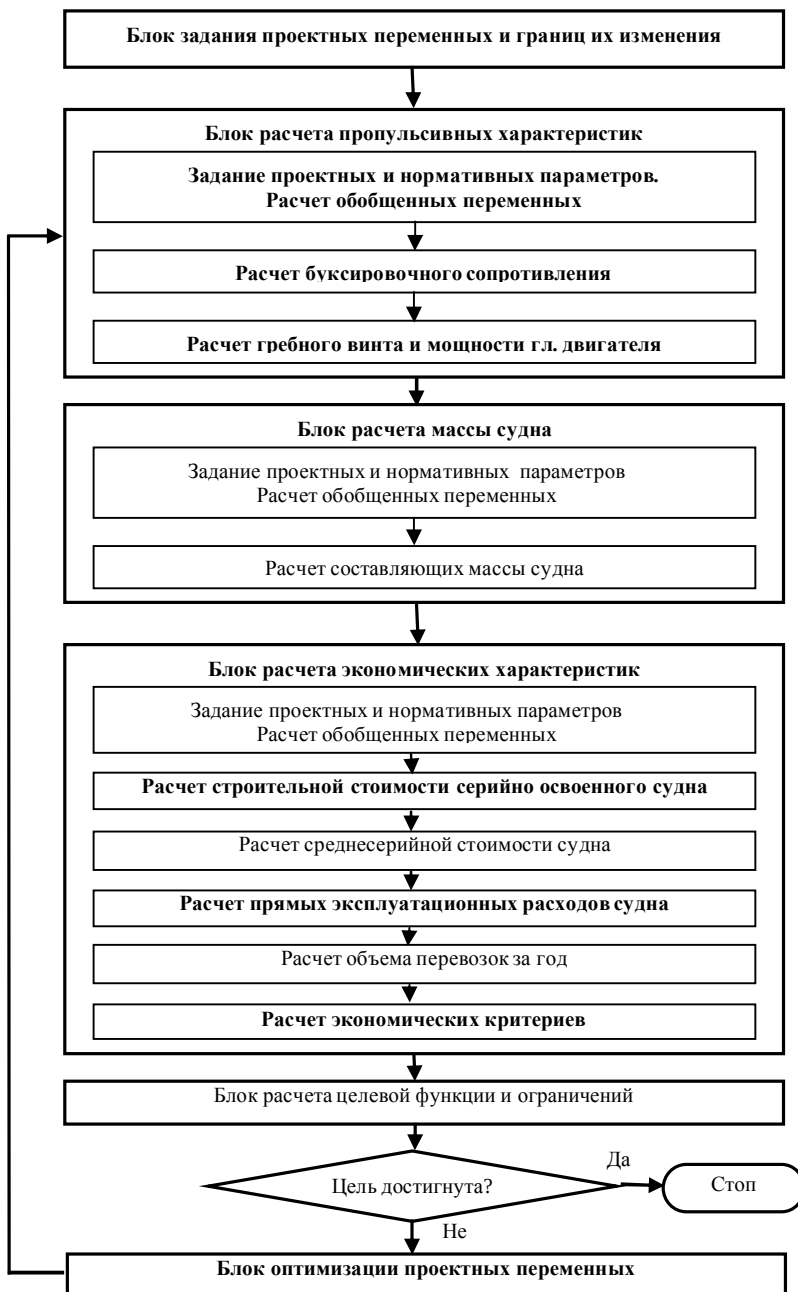


Рисунок 1 – Структура математической модели

формуле ИТТС-1957; $(1 + k_1)$ - формфактор, учитывающий увеличение вязкостного сопротивления по сравнению с R_F ; R_{AP} - сопротивления выступающих частей, ориентированных по потоку, предполагается, что оно имеет вязкостную природу и пропорционально сопротивлению трения эквивалентной плоской пластины; R_W - волновое сопротивление; R_B - дополнительное сопротивление давления от бульб; R_{TR} - дополнительное сопротивление давления от погруженной части транцевой кормы; R_A - сопротивление соответствующее корреляционной надбавке.

Для расчета всех составляющих в [1] предложены эмпирические формулы в зависимости от проектных переменных, проектных и нормативных параметров.

Мощность, потребляемая гребным винтом, рассчитывается по коэффициенту диаметра-упора. Принят четырехлопастной гребной винт фиксированного шага серии "В". Коэффициент попутного потока и коэффициент засасывания рассчитываются по эмпирическим формулам, приведенным в [1]. Дисковое отношение рассчитывается по формуле Келлера.

Гидродинамические характеристики гребного винта в свободной воде определяются по математическим моделям серии "В" для моделей винтов, затем вводятся поправки на натурное число Рейнольдса по методу ИТТС-78. По коэффициенту диаметра-упора K_{DT} рассчитывается шаговое отношение и частота вращения гребного винта, обеспечивающие наибольший к.п.д. в свободной воде. При фиксированном значении относительной поступи из уравнения для коэффициента упора K_T

$$K_T(P/D, J) = J^2 K_{DT}^{-2}$$

методом золотого сечения определяется P/D . Затем, этим же методом определяется относительная поступь J , обеспечивающая максимальное значение к.п.д. гребного винта в свободной воде. По найденным значениям относительной поступи и шагового отношения рассчитывается мощность главного двигателя P_S .

В блоке расчета массы судна её разделение на составляющие принято в соответствии с работой [3].

Полное водоизмещение на начальной стадии проектирования представляется в виде

$$D = D_{ПОР} + DW + m_{ЗВ},$$

где D - полное массовое водоизмещение; $D_{ПОР}$ - водоизмещение порожнем; DW - дедвейт; $m_{ЗВ}$ - запас водоизмещения. Водоизмещение порожнем представляется в следующем виде:

$$D_{ПОР} = m_{МК} + m_{ОК} + m_{ГД} + m_{ОМ},$$

где $m_{МК}$ - масса металлического корпуса; $m_{ОК}$ - масса оборудования корпуса; $m_{ГД}$ - масса главного двигателя; $m_{ОМ}$ - масса оборудования МКО. Дедвейт представляется в следующем виде:

$$DW = m_{СН} + m_{ТОПЛ} + P_{ГР},$$

где $m_{СН}$ - масса снабжения, имущества, экипажа, провизии, воды, расходных материалов, расходных жидких грузов; $m_{ТОПЛ}$ - масса топлива для рейса в одну сторону; $P_{ГР}$ - грузоподъемность судна

Составляющие массы судна рассчитываются на основе следующих измерителей, служащих проектными параметрами: $q_{МК}$ - массы металлического корпуса по модулю $L_{PP}BH$; $q_{ОК}$ - массы оборудования корпуса по модулю $(L_{PP}BH)^{2/3}$; $q_{ГД}$ - массы главного двигателя по модулю P_S ; $q_{ОМ}$ - массы оборудования МКО по модулю P_S ; $q_{СН}$ - массы снабжения по модулю $(\rho c_B L_{PP} BT)^{1/2}$. Приняты следующие обозначения: L_{PP} - длина между перпендикулярами м; B - ширина по КВЛ, м; T - осадка по КВЛ на миделе, м; H - высота борта на миделе, м; $c_{ВРР}$ - коэффициент общей полноты по длине между перпендикулярами $k_{МЗ}$ - коэффициент морского запаса, $k_{СТ}$ - коэффициент, учитывающий расход топлива на все судовые нужды на ходу и на стоянке; ρ - плотность морской воды.

Запас водоизмещения (в тыс. тонн) рассчитывается по формуле

$$m_{зв} = 0,001 \rho c_B L_{PP} BT / 1000.$$

Блок расчета экономических характеристик основан на методиках, изложенных в работах [2, 4]. Состав проектных и нормативных параметров ориентирован на эти методики.

Строительная стоимость серийно освоенного судна определяется по формуле

$$K_{СТР} = K_{МК} + K_{ОК} + K_{ГД} + K_{ОМ} + K_{РБ},$$

где $K_{МК}$ - стоимость металлического корпуса; $K_{ОК}$ - стоимость оборудования корпуса; $K_{ГД}$ - стоимость главного двигателя; $K_{ОМ}$ - стоимость оборудования МКО; $K_{РБ}$ - стоимость работ по судну. Среднесерийная стоимость судна определяется по формуле

$$K_{СРЕД} = \sigma K_{СТР} + (K_{ПР} + K_{ОСН}) / N_{суд},$$

где $K_{СТР}$ - строительная стоимость серийно освоенного судна; $K_{ПР}$ - стоимость проектирования; $K_{ОСН}$ - стоимость оснастки и приспособлений для постройки судна; σ - коэффициент перехода от

стоимости серийно освоенного судна к среднесерийной строительной стоимости, $N_{суд}$ - расчетное число судов в серии.

Прямые эксплуатационные расходы (в млн. грн) рассчитывались по формуле

$$Z = Z_{ТЕК} + Z_{СН} + Z_{ЭКИП} + Z_{НАВ} + Z_{ТОПЛ},$$

где $Z_{ТЕК}$ - расходы на текущий ремонт; $Z_{СН}$ - расходы на снабжение; $Z_{ЭКИП}$ - расходы на содержание экипажа; $Z_{НАВ}$ - расходы навигационные и на агентирование; $Z_{ТОПЛ}$ - расходы на топливо и бункеровку.

Расходы навигационные и на агентирование за одни сутки (в грн) определялись в зависимости от типа судна по формулам, полученным методом регрессионного анализа по данным, приведенным в [4].

Танкеры для нефтегрузов

$$Z_{НАВ1} = (124,4 + 19,90 \log DW - 13,31(\log DW)^2 + 4,03(\log DW)^3) \gamma.$$

Рефрижераторы и суда для перевозки навалочных грузов:

$$Z_{НАВ1} = (85,08 + 4,05(\log DW)^2 + 0,57(\log DW)^3) \gamma.$$

Объем перевозок за год определяется по формуле

$$Q = V_{ГР} n_{КРУГ},$$

где $V_{ГР}$ - количество груза, перевезенного за круговой рейс; $n_{КРУГ}$ - количество круговых рейсов за год.

Количество груза, перевезенного за круговой рейс, рассчитывается по формуле

$$V_{ГР} = 2P_{ГР} \eta_{ГРУЗ},$$

где $P_{ГР}$ - грузоподъемность судна; $\eta_{ГРУЗ}$ - коэффициент использования грузоподъемности судна за круговой рейс. Количество круговых рейсов за год определяется по формуле

$$n_{КРУГ} = t_{ЭКСПЛ} / (t_{ХОД} + t_{ГРУЗ} + t_{СТОЯН}),$$

где $t_{ЭКСПЛ}$ - эксплуатационный период за год; $t_{ХОД}$ - ходовое время за круговой рейс; $t_{ГРУЗ}$ - время нахождения под грузовыми операциями за круговой рейс; $t_{СТОЯН}$ - время стоянки вне грузовых операций за круговой рейс. Ходовое время за круговой рейс в днях определяется по формуле

$$t_{ХОД} = D_L / (24v_E),$$

где D_L - плечо кругового рейса, миль; v_E - эксплуатационная скорость, уз. Время нахождения под грузовыми операциями за круговой рейс в днях определяется по формуле

$$t_{ГРУЗ} = 2V_{ГР} 1000 / (24g_{НОРМ}),$$

где $g_{НОРМ}$ - норма грузовых работ (производительность погрузочно-разгрузочных работ).

Годовой доход до уплаты налога рассчитываем как произведение объема перевозок за год и фрахтовой ставки

$$A = Q c_{ГРУЗ},$$

где Q - объем перевозок за год. Фактор возмещения капитала (CRF - Capital Recovery Factor) - это отношение условно неизменного годового дохода к первоначальным капиталовложениям. Этот фактор определяем по формуле

$$CRF = A / K_{СРЕД},$$

где $K_{СРЕД}$ - среднесерийная стоимость судна (первоначальные капиталовложения). Критерий CRF максимизируется.

Эквивалентная предналоговая ставка i определяется путем численного решения уравнения [4]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^{t_{СЛУЖ}}}{(1+i)^{t_{СЛУЖ}} - 1}.$$

Эквивалентная посленалоговая ставка i_1 определяется путем численного решения уравнения [4]:

$$\frac{A}{K_{СРЕД}}(1 + s_{НАЛ}) + \frac{s_{НАЛ}}{t_{СЛУЖ}} = \frac{i_1(1+i_1)^{t_{СЛУЖ}}}{(1+i_1)^{t_{СЛУЖ}} - 1}.$$

Эквивалентная процентная ставка является максимизируемым критерием; она может применяться для сравнения судов с разными сроками службы.

Необходимая фрахтовая ставка RFR (Required Freight Rate) рассчитывается по формулам [4]

$$RFR = \frac{Z + CRF_Z K_{СРЕД}}{Q},$$

где

$$CRF_Z = \frac{CRF_{1Z} - s_{НАЛ} / t_{СЛУЖ}}{1 - s_{НАЛ}}; \quad CRF_{1Z} = \frac{i_{1Z}(1+i_{1Z})^{t_{СЛУЖ}}}{(1+i_{1Z})^{t_{СЛУЖ}} - 1}.$$

Наилучшим считается судно, которое может эксплуатироваться при наименьшей фрахтовой ставке, поскольку эквивалентная процентная ставка предпринимательской прибыли i_1 устанавливается одинаковой для всех сравниваемых вариантов.

Приведенная стоимость (Present Worth Method) рассчитывается по формуле

$$PW = K_{СРЕД} + Z \sum_{j=1}^{j=t_{СЛУЖ}} (1+i_Z)^{-j}$$

Критерий используется в тех случаях, когда варианты судов имеют одинаковый срок службы, а годовые доходы неизвестны, но одинаковы для всех сопоставляемых вариантов. Критерий является минимизируемым.

Для расчета вновь созданной стоимости (Net Present Value) предварительно рассчитаем налог на прибыль

$$S = (A - \frac{K_{СРЕД}}{t_{СЛУЖ}}) s_{НАЛ}.$$

Доход после уплаты налога равен

$$A_1 = A - S.$$

Тогда вновь созданная стоимость в млн. грн рассчитывается по формуле

$$NPV = A_1 \left(\sum_{j=1}^{j=t_{СЛУЖ}} (1 - i_{1Z})^{-j} \right) - K_{СРЕД}.$$

Критерий является максимизируемым; он широко используется в странах Западной Европы.

Удельная доходность рассчитывается по формуле

$$UD = \frac{A_1}{Z + A}.$$

Рассчитаем также *"технический критерий"*, равный произведению грузоподъемности на скорость хода судна и деленному на мощность главного двигателя

$$TEX = P_{ГР} v_E / P_S.$$

Критерий является максимизируемым.

В блоке расчета целевой функции и ограничений целевая функция представлена в виде

$$F = F_{ЭКОН} + F_{ШТРАФ},$$

где $F_{ЭКОН}$ - экономическая часть, учитывающая эффективность судна с экономической точки зрения; $F_{ШТРАФ}$ - штрафующая часть (суммарный штраф), учитывающая нарушения ограничений технического характера на проект судна

Экономическая часть целевой функции рассчитывается в зависимости от выбранного критерия экономической эффективности судна. Для эквивалентной предналоговой ставки i : $F_{ЭКОН} = 1/i$. Для фактора возмещения капитала CRF : $F_{ЭКОН} = 1/CRF$. Для эквивалентной посленалоговой ставки i_1 : $F_{ЭКОН} = 1/i_1$. Для необходимой фрахтовой ставки: $F_{ЭКОН} = RFR$. Для приведенной стоимости: $F_{ЭКОН} = PW$. Для вновь созданной стоимости: $F_{ЭКОН} = -NPV$. Для удельной доходности $F_{ЭКОН} = 1/UD$. Для *"технического критерия"*: $F_{ЭКОН} = -TEX$.

Суммарный штраф состоит из следующих составляющих:

$$F_{III} = F_{III0} + F_{III1} + F_{III2} + F_{III3} + F_{III4},$$

где F_{III0} - штраф за нарушение логического условия "высота борта должна быть больше осадки", F_{III1} - штраф за нарушение уравнения масс, F_{III2} - штраф за нарушение условия вместимости, F_{III3} - штраф за нарушение условия начальной остойчивости, F_{III4} - штраф за нарушение условия мореходности. Штраф за нарушение логического условия "высота борта должна быть больше осадки" рассчитывается по формуле

$$F_{III0} = 1000 \text{srez}(H - 1.3T),$$

где srez - функция квадратичной срезки. Штраф за нарушение уравнения масс рассчитывается по формуле

$$F_{III1} = r_1(c_B L_{PP} BT / 1000 - D)^2,$$

где D - массовое водоизмещение судна в тыс. тонн, r_1 - параметр штрафной функции, регулирующий величину штрафа. Штраф за нарушение условия вместимости рассчитывается по формуле

$$F_{III2} = r_2 \text{srez}(H / T - HT_K),$$

где HT_K - критическое значение отношения высоты борта к осадке, обеспечивающее необходимую вместимость, r_2 - параметр штрафной функции, регулирующий величину штрафа. Штраф за нарушение условия начальной остойчивости рассчитывается по формуле

$$F_{III3} = r_3 \text{srez}(B / T - BT_K),$$

где BT_K - критическое отношение ширины к осадке, обеспечивающее необходимую начальную остойчивость, r_3 - параметр штрафной функции, регулирующий величину штрафа. Штраф за нарушение условия мореходности рассчитывается по формуле

$$F_{III4} = r_4 \text{srez}(L_{PP} - L_{MOP}),$$

где L_{MOP} - минимальная длина судна, обеспечивающая необходимую мореходность, r_4 - параметр штрафной функции, регулирующий величину штрафа.

Минимальная длина судна, обеспечивающая необходимую мореходность (отсутствие слеминга и заливаемости), рассчитывается по формуле[1]:

$$L_{MOP} = 0,9174(2(c_B L_{PP} BT)^{1/3} + 5)v_E^{1/3}.$$

Параметры штрафных функций r_i позволяют изменять величину штрафа по сравнению с экономической составляющей целевой функции, т.е. выполняют роль весовых коэффициентов

В блоке оптимизации проектных переменных для заданной целевой функции и выбранного набора проектных переменных их оптимальные значения рассчитываются симплексным методом Нелдера и Мида. Поиск

происходит в многомерном кубе, размеры которого задаются в виде минимальных и максимальных значений проектных переменных. Для начала процесса оптимизации требуется задать также начальные значения проектных переменных. Если некоторые проектные переменные не включаются в число оптимизируемых, то они считаются проектными параметрами, их значения равны заданным начальным значениям.

Применяемая программа минимизации не гарантирует поиск на границах. Поэтому при расчетах целесообразно варьировать координаты начальной точки поиска (начальные значения проектных переменных).

Математическая модель реализована в виде программы на языке FORTRAN RM.

Расчеты по данной математической модели показывают, что получаются качественно верные результаты, легко прослеживается влияние отдельных проектных параметров на результат.

Структура математической модели и целевой функции позволяют вводить дополнительные модули, более полно учитывающие технические требования к судам, а также вносить уточнения в существующие модули без переработки модели в целом.

Библиографический список

1. Holtrop J.A., Mennen G.G.J An approximate power prediction method/ J.A. Holtrop, G.G.J Mennen // Intern. Shipb. Progress. — 1982. — V.29. — N 335. — P. 166 – 170.
2. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских судов/ В.И. Краев. — Л.: Судостроение 1981. — 280 с.;
3. Вашедченко А.Н. Автоматизированное проектирование судов Учеб. пособие / А.Н. Вашедченко — Л.: Судостроение 1985. — 164 с.
4. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов / В.П.Соколов — Л.: Судостроение 1987. — 162 с.

Поступила в редакцию 30.05.2001 г.