

УДК 629.5.01

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Богданов А.В.,

Херсонский филиал Европейского университета,

Свиридов В.И., Кобяков Н.Н.,

Вуз «Херсонский государственный морской институт»

В статье предложен алгоритм нахождения оптимальных значений технических параметров судовых энергетических установок для получения максимальных значений комплексного параметра качества. Правильность найденного выражения для K_0 в его локальном минимуме подтверждается приведённым примером расчёта. Приведённый алгоритм нахождения максимального значения K_0 может быть использован для практического выбора более экономичного дизеля.

Ключевые слова: комплексный параметр качества, оптимизационная модель, алгоритм.

Постановка проблемы и её связь с практическими задачами. Стоимость судовой энергетической установки (СЭУ) составляет примерно половину стоимости всего судна. Выбор оптимальной для данного судна СЭУ позволяет экономить значительные средства, что обуславливает актуальность разработки оптимизационной модели выбора СЭУ.

Анализ последних публикаций и постановка задачи исследования. При выборе наиболее экономичных дизелей СЭУ пользуются их комплексным параметром качества [1,2]:

$$K_0 = \alpha_1 \frac{p}{p_{\max}} + \alpha_2 \frac{m_{\min}}{m} + \alpha_3 \frac{b_{e\min}}{b_e} + \alpha_4 \frac{b_{m\min}}{b_m} + \alpha_5 \frac{r}{r_{\max}} + \alpha_6 J + \alpha_7 \frac{C_{\min}}{C}, \quad (1)$$

учитывающим 7 параметров:

1) удельную мощность дизеля – $p = \frac{P_e}{l \cdot s \cdot h}$ [кВт/м³],

где P_e – номинальная эффективная мощность дизеля;

$l \cdot s \cdot h$ – габаритные размеры СЭУ (длина, ширина и высота) [м];

2) удельную массу – $m = \frac{M}{P_e}$ [кг/кВт],

где M – масса дизеля;

3) удельный эффективный расход топлива дизеля – b_e [кг/кВт·ч];

4) удельный эффективный расход масла дизеля – b_m [кг/кВт·ч];

5) ресурс работы до капитального ремонта – r [тыс.ч.];

б) условный показатель рода топлива, используемого дизелем – J (для тяжелого топлива – $J = 1$, для дизельного – $J = 0$);

7) стоимость дизеля – C .

Комплексный параметр качества СЭУ K_0 , как видно из приведенной выше формулы, равен сумме произведений относительных значений соответствующих параметров (кроме шестого слагаемого, в котором $J = 1$, или $J = 0$), на их вероятности (коэффициенты весомости) α_i , где $i = 7$. Экспериментально установлены значения коэффициентов весомости:

$$\alpha_1 = 0,1; \alpha_2 = 0,12; \alpha_3 = 0,24; \alpha_4 = 0,14; \alpha_5 = 0,19; \alpha_6 = 0,14; \alpha_7 = 0,07.$$

Причём $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 = 1$.

Стоимость дизеля (в условных единицах) рассчитывают по формуле:

$$C = \frac{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}}{b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}} \text{ [условных единиц]}. \quad (2)$$

Комплексный параметр качества СЭУ K_0 , согласно (1), определяется экстремальными значениями параметров СЭУ, из имеющегося их списка: максимальной удельной мощностью – p_{\max} , минимальной удельной массой – m_{\min} , минимальным удельным эффективным расходом топлива – $b_{e\min}$, минимальным удельным эффективным расходом масла – $b_{m\min}$, максимальным ресурсом работы r_{\max} и минимальной стоимостью C_{\min} .

Несмотря на достаточно широкое использование для практических расчётов приведенного выражения комплексного параметра качества, его анализ и построение на его основе оптимизационной модели выбора СЭУ в литературе не приводится.

Формулирование целей статьи. Целью статьи является не только разработка оптимизационной модели выбора СЭУ для практических расчетов, но и представление её в виде, удобном для использования курсантами соответствующих специальностей морских институтов при их обучении.

Изложение материалов исследований. Исследуем зависимость комплексного параметра качества от параметров СЭУ (1). Комплексный параметр качества K_0 монотонно растет с увеличением относительного значения удельной мощности (p), с уменьшением габаритных размеров ($l \cdot s \cdot h$) и удельной массы ($m = \frac{M}{P_e}$) СЭУ, а также с использованием мазута в качестве топлива. Для заданной P_e СЭУ экстремальное (максимальное или минимальное) значение K_0 определяется функцией трех переменных:

$$K_0 = f(r, b_e, b_m). \quad (3)$$

Рассмотрим K_0 , как функцию двух переменных $K_0 = f(b_e, r)$. Для определения локального экстремума функции K_0 от значения b_e , перепишем уравнение (1) в виде:

$$K_0 = A_1 + \frac{\alpha_3 \cdot b_{e \min}}{b_e} + \frac{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}} b_e^{1,58}, \quad (1a)$$

где

$$A_1 = \alpha_1 \frac{p}{p_{\max}} + \alpha_2 \frac{m_{\min}}{m} + \alpha_4 \frac{b_{m \min}}{b_m} + \alpha_5 \frac{r}{r_{\max}} + \alpha_6 J,$$

определяется величинами, которые явно не зависят от b_e . Экстремальное значение K_0 находится из приравнивания первой производной K_0 к нулю, т.е.

$$\frac{\partial K_0}{\partial b_e} = -\frac{\alpha_3 \cdot b_{e \min}}{b_e^2} + \frac{1,58 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}} b_e^{0,58} = 0. \quad (4)$$

Для определения экстремального значения K_0 от ресурса до капитального ремонта r перепишем уравнение (1) в виде:

$$K_0 = A_2 + \alpha_5 \cdot \frac{r}{r_{\max}} + \frac{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87}} \cdot \frac{1}{r^{0,48}}. \quad (1b)$$

где $A_2 = \alpha_1 \frac{p}{p_{\max}} + \alpha_2 \frac{m_{\min}}{m} + \alpha_3 \frac{b_{e \min}}{b_e} + \alpha_4 \frac{b_{m \min}}{b_m} + \alpha_6 J$

определяется величинами, которые явно не зависят от r .

Экстремальное значение K_0 находится при приравнивании первой производной K_0 к нулю, т.е.

$$\frac{\partial K_0}{\partial r} = \frac{\alpha_5}{r_{\max}} - \frac{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87}} \cdot \frac{0,48}{r^{1,48}} = 0. \quad (5)$$

Для определения вида экстремума (максимум или минимум) необходимо взять вторые производные, которые обозначим соответствующими коэффициентами A_0, B_0, C_0 :

$$\frac{\partial^2 K_0}{\partial b_e^2} = \frac{2 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e \min}}{b_e^3} + \frac{1,58 \cdot 0,58 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}} b_e^{-1,58} = A_0 \geq 0;$$

$$\frac{\partial^2 K_0}{\partial b_e \partial r} = -\frac{1,58 \cdot 0,48 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{1,48}} b_e^{0,58} = B_0 \leq 0;$$

$$\frac{\partial^2 K_0}{\partial r^2} = \frac{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87}} \cdot \frac{0,48 \cdot 1,48}{r^{2,48}} = C_0 \geq 0.$$

Экстремум функции $K_0 = f(b_e, r)$ существует при выполнении условия:

$$A_0 C_0 - B_0^2 = \left(\frac{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}}{r^{1,48} \cdot P_e^{0,87}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1,845 \alpha_3 \cdot b_{e \min} \cdot r^{0,48} \cdot P_e^{0,87}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,42} \cdot b_m^{0,23}} + 0,0298 \right) > 0. \quad (6)$$

Отсюда, локальный экстремум функции $K_0 = f(b_e, r)$ существует. Положительные значения A_1 и C_1 означают, что локальный экстремум функции $K_0 = f(b_e, r)$ является минимумом.

Для определения локального экстремума функции K_0 от значения удельного эффективного расхода масла дизеля b_m , т.е. $K_0 = f(b_e, b_m)$, и $K_0 = f(b_m, r)$ перепишем уравнение (1) в виде:

$$K_0 = A_1 + \frac{\alpha_4 \cdot b_{m \min}}{b_m} + \frac{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58}}{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}} b_m^{0,23}, \quad (1B)$$

где через

$$A_1 = \alpha_1 \frac{p}{p_{\max}} + \alpha_2 \frac{m_{\min}}{m} + \alpha_3 \frac{b_{e \min}}{b_e} + \alpha_5 \frac{r}{r_{\max}} + \alpha_6 J,$$

обозначены величины, которые явно не зависят от b_m . Максимальное значение K_0 находится из приравнивания первой производной K_0 к нулю, т.е.

$$\frac{\partial K_0}{\partial b_m} = -\frac{\alpha_4 \cdot b_{m \min}}{b_m^2} + \frac{0,23 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58}}{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}} b_m^{-0,77} = 0. \quad (7)$$

Можно показать, что локальные экстремумы функции K_0 от b_m , т.е. $K_0 = f(b_e, b_m)$ и $K_0 = f(b_m, r)$, аналогично как и функция $K_0 = f(b_e, r)$, также существуют и соответствуют минимумам.

Отсюда, локальный экстремум функции $K_0 = f(r, b_e, b_m)$, существует и соответствует минимуму, что в нашем случае не подходит.

Максимальное значение K_0 можно найти в определённой, наперёд заданной области, так называемый глобальный экстремум. Нахождение глобального экстремума заключается в поиске максимальных и минимальных значений функции $K_0 = f(r, b_e, b_m)$ в области исключающей локальные экстремумы, т.е. в области, где данная функция будет гладкой.

Для рассмотрения глобальных экстремумов функций $K_0 = f(b_e, r)$, $K_0 = f(b_e, b_m)$ и $K_0 = f(b_m, r)$ необходимо убедиться, что минимумы данных функций не находятся в выделенных областях значений

$$\begin{cases} b_{e1} \leq b_e \leq b_{e2} \\ b_{m1} \leq b_m \leq b_{m2} \\ r_{m1} \leq r \leq r_{m2} \end{cases} \quad (8)$$

где $b_{e1}, b_{e2}, b_{m1}, b_{m2}, r_{m1}, r_{m2}$ – минимальные и максимальные значения соответствующих параметров в выделенной области.

Нахождение локального минимума означает нахождение координат минимума функции $K_0 = f(r, b_e, b_m)$, т.е. значений параметров b_e, b_m, r , при заданном значении P_e . Для нахождения значений b_e, b_m, r в минимумах функций $K_0 = f(b_e, r)$, $K_0 = f(b_e, b_m)$ и $K_0 = f(b_m, r)$ необходимо решить систему трёх уравнений с тремя неизвестными b_e, b_m, r .

$$\begin{cases} \frac{\partial K_0}{\partial b_e} = -\frac{\alpha_3 \cdot b_{e\min}}{b_e^2} + \frac{1,58 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}} b_e^{0,58} = 0 \\ \frac{\partial K_0}{\partial r} = \frac{\alpha_5}{r_{\max}} - \frac{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}}{0,77 \cdot P_e^{0,87}} \cdot \frac{0,48}{r^{1,48}} = 0 \\ \frac{\partial K_0}{\partial b_m} = -\frac{\alpha_4 \cdot b_{m\min}}{b_m^2} + \frac{0,23 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58}}{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}} b_m^{-0,77} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Из первых двух уравнений данной системы находим значения b_e и r при заданном значении P_e :

$$b_e^{2,58} = \frac{\alpha_3 \cdot b_{e\min} \cdot 0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}}{1,58 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}}$$

или

$$b_e = \left(\frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e\min} \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}} \right)^{0,388}$$

и ресурс до капитального ремонта

$$r = \left(\frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot r_{\max} \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}}{\alpha_5 \cdot P_e^{0,87}} \right)^{0,676}$$

Запишем данные уравнения как систему двух уравнений с двумя неизвестными b_e и r :

$$\begin{cases} b_e = \left(\frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e\min} \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}} \right)^{0,388} \\ r = \left(\frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot r_{\max} \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}}{\alpha_5 \cdot P_e^{0,87}} \right)^{0,676} \end{cases}$$

Подставив значение r со второго уравнения в первое, а значение b_e с первого уравнения во второе, получим:

$$\begin{cases} b_e = \left(\frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e \min} \cdot P_e^{0,87}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}} \right)^{0,388} \cdot \left(\frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot r_{\max} \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}}{\alpha_5 \cdot P_e^{0,87}} \right)^{0,126} \\ r = \left(\frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot r_{\max} \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}}{\alpha_5 \cdot P_e^{0,87}} \right)^{0,676} \cdot \left(\frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e \min} \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}} \right)^{0,414} \end{cases}$$

В данной системе уравнений b_e , r входят как в левую, так и в правую часть уравнений. Найдём значения b_e и r , соответственно, в первом и во втором уравнениях системы:

$$\begin{cases} b_e = \left(\frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e \min} \cdot P_e^{0,87}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}} \right)^{0,484} \cdot \left(\frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot b_m^{0,23} \cdot r_{\max} \cdot C_{\min}}{\alpha_5 \cdot P_e^{0,87}} \right)^{0,157} \\ r = \left(\frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot b_m^{0,23} \cdot r_{\max} \cdot C_{\min}}{\alpha_5 \cdot P_e^{0,87}} \right)^{0,843} \cdot \left(\frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e \min} \cdot P_e^{0,87}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}} \right)^{0,516} \end{cases}$$

Вынося значение P_e за знак скобок и обозначая b_e и r в локальном минимуме K_0 через b_{elok} и $r_{\text{лок}}$, соответственно, перепишем систему уравнений в виде:

$$\begin{cases} b_{\text{elok}} = \left(\frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e \min}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}} \right)^{0,483} \cdot \left(\frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot b_m^{0,23} \cdot r_{\max} \cdot C_{\min}}{\alpha_5} \right)^{0,156} \cdot P_e^{0,284} \\ r_{\text{лок}} = \left(\frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot b_m^{0,23} \cdot r_{\max} \cdot C_{\min}}{\alpha_5} \right)^{0,844} \cdot \left(\frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e \min}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_m^{0,23}} \right)^{0,517} \cdot P_e^{-0,284} \end{cases} \quad (10)$$

Из третьего уравнения системы (9) можно найти b_m при заданном P_e :

$$b_m^{1,23} = \frac{\alpha_4 \cdot b_{m \min} \cdot 0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}}{0,23 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_e^{1,58}}$$

или

$$b_m = \left(\frac{3,35 \cdot \alpha_4 \cdot b_{m \min} \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}}{\alpha_7 \cdot b_e^{1,58} \cdot C_{\min}} \right)^{0,813} \quad (11)$$

Для нахождения значения $b_{\text{тлок}}$, аналогично как в системе уравнений (10), примем значения b_e , r в формуле (11) за b_{elok} и $r_{\text{лок}}$. Тогда формула (11) примет вид:

$$b_{\text{тлок}} = \frac{2,67 \cdot (\alpha_4 \cdot b_{m \min})^{0,813}}{(\alpha_7 \cdot C_{\min})^{0,813}} \cdot \frac{r_{\text{лок}}^{0,39}}{b_{\text{elok}}^{1,285}} \cdot P_e^{0,707}$$

Подставляя значения b_{elok} и $r_{\text{лок}}$ из системы уравнений (10) в данное уравнение, получим:

$$b_{\text{млок}} = \frac{3,39 \cdot (\alpha_4 \cdot b_{m \text{ min}})^{0,813} \cdot b_{\text{млок}}^{0,1265}}{(\alpha_7 \cdot C_{\text{min}})^{0,265} \cdot (\alpha_3 \cdot b_{e \text{ min}})^{0,419}} \cdot \left(\frac{r_{\text{max}}}{\alpha_5} \right)^{0,129} \cdot P_e^{0,232}.$$

Т.к. $b_{\text{млок}}$ входит в правую и левую часть уравнения, то вынося $b_{\text{млок}}$ в левую часть уравнения получим:

$$b_{\text{млок}} = \frac{4,05 \cdot (\alpha_4 \cdot b_{m \text{ min}})^{0,93}}{(\alpha_7 \cdot C_{\text{min}})^{0,303} \cdot (\alpha_3 \cdot b_{e \text{ min}})^{0,48}} \cdot \left(\frac{r_{\text{max}}}{\alpha_5} \right)^{0,148} \cdot P_e^{0,266}. \quad (12)$$

Для нахождения b_e, b_m, r в минимуме функций $K_0 = f(b_e, r)$, $K_0 = f(b_e, b_m)$ и $K_0 = f(b_m, r)$ перепишем систему уравнений (9) в виде:

$$\begin{cases} b_{\text{елок}} = (A)^{0,483} \cdot (B)^{0,156} \cdot P_e^{0,284} \\ r_{\text{лок}} = (B)^{0,844} \cdot (A)^{0,517} \cdot P_e^{-0,284} \\ b_{\text{млок}} = \frac{4,05 \cdot (\alpha_4 \cdot b_{m \text{ min}})^{0,93}}{(\alpha_7 \cdot C_{\text{min}})^{0,303} \cdot (\alpha_3 \cdot b_{e \text{ min}})^{0,48}} \cdot \left(\frac{r_{\text{max}}}{\alpha_5} \right)^{0,148} \cdot P_e^{0,266} \end{cases}. \quad (13)$$

где: $A = \frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e \text{ min}}}{\alpha_7 \cdot C_{\text{min}} \cdot b_{\text{млок}}^{0,23}}$; $B = \frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\text{min}} \cdot b_{\text{млок}}^{0,23} \cdot r_{\text{max}}}{\alpha_5}$ определяются

значением удельного эффективного значения расхода масла дизелем в локальном минимуме $b_{\text{млок}}$.

Алгоритм нахождения глобального максимума значения K_0 по заданной P_e следующий:

1. Составляется таблица 1 параметров из списка дизелей, которыми может быть укомплектовано данное судно, включающих кроме марки дизеля и его производителя также:

- номинальную эффективную мощность двигателя – P_e [кВт];
- габаритные размеры – $l \cdot s \cdot h$ (длину, ширину и высоту) [м];
- M – массу [кг];
- удельный эффективный расход топлива дизеля – b_e [кг/кВт·ч];
- удельный эффективный расход масла дизеля – b_m [кг/кВт·ч];
- ресурс работы до капитального ремонта – r [тыс.ч.];
- условный показатель рода топлива, используемого дизелем – J (для тяжелого топлива – $J = 1$, для дизельного – $J = 0$);

2. Рассчитываются по известным формулам параметры каждого из имеющихся двигателей и заносятся в таблицу 2:

- удельная мощность (p) рассчитывается по формуле: $p = \frac{P_e}{l \cdot s \cdot h}$;
- удельная масса (m) рассчитывается по формуле: $m = \frac{M}{P_e}$;

- теоретическая стоимость (в условных единицах) рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r^{0,48}}{b_e^{1,58} \cdot b_m^{0,23}};$$

- из таблицы параметров и расчётной таблицы определяются максимальные и минимальные значения соответствующих параметров: p_{\max} ; m_{\min} ; $b_{e\min}$; $b_{m\min}$; r_{\max} ; C_{\min} ;

- по формуле:

$$K_0 = \alpha_1 \frac{p}{p_{\max}} + \alpha_2 \frac{m_{\min}}{m} + \alpha_3 \frac{b_{e\min}}{b_e} + \alpha_4 \frac{b_{m\min}}{b_m} + \alpha_5 \frac{r}{r_{\max}} + \alpha_6 J + \alpha_7 \frac{C_{\min}}{C}. \quad (1)$$

рассчитывается значение K_0 исходного двигателя.

3. Рассчитывается локальный минимум комплексного параметра качества K_0 :

- рассчитываются коэффициенты: $\frac{\alpha_1}{p_{\max}}$; $\alpha_2 \cdot m_{\min}$; $\alpha_3 \cdot b_{e\min}$; $\alpha_4 \cdot b_{m\min}$;

$\frac{r_{\max}}{\alpha_5}$; $\alpha_7 \cdot C_{\min}$, которые для выбранного списка двигателей являются

постоянными;

- значение $b_{\text{тлок}}$ для известного списка параметров дизелей полностью определяется постоянными коэффициентами и P_e и находится из третьего уравнения системы уравнений (13):

$$b_{\text{тлок}} = \frac{4,05 \cdot (\alpha_4 \cdot b_{m\min})^{0,93}}{(\alpha_7 \cdot C_{\min})^{0,303} \cdot (\alpha_3 \cdot b_{e\min})^{0,48}} \cdot \left(\frac{r_{\max}}{\alpha_5} \right)^{0,148} \cdot P_e^{0,266};$$

- подставляя найденное значение $b_{\text{тлок}}$ в первые два уравнения системы уравнений:

$$\begin{cases} b_{\text{елок}} = (A)^{0,483} \cdot (B)^{0,156} \cdot P_e^{0,284} \\ r_{\text{лок}} = (B)^{0,844} \cdot (A)^{0,517} \cdot P_e^{-0,284} \\ b_{\text{тлок}} = \frac{4,05 \cdot (\alpha_4 \cdot b_{m\min})^{0,93}}{(\alpha_7 \cdot C_{\min})^{0,303} \cdot (\alpha_3 \cdot b_{e\min})^{0,48}} \cdot \left(\frac{r_{\max}}{\alpha_5} \right)^{0,148} \cdot P_e^{0,266} \end{cases}, \quad (13)$$

где: $A = \frac{0,487 \cdot \alpha_3 \cdot b_{e\min}}{\alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_{\text{тлок}}^{0,23}}$; $B = \frac{0,623 \cdot \alpha_7 \cdot C_{\min} \cdot b_{\text{тлок}}^{0,23} \cdot r_{\max}}{\alpha_5}$,

находятся значения $b_{\text{елок}}$, $r_{\text{лок}}$;

- используя рассчитанные значения $b_{\text{тлок}}$, $b_{\text{елок}}$, $r_{\text{лок}}$, при заданной P_e по формуле:

$$C_{лок} = \frac{0,77 \cdot P_e^{0,87} \cdot r_{лок}^{0,48}}{b_{елок}^{1,58} \cdot b_{тлок}^{0,23}} \quad (2a)$$

находится теоретическая стоимость двигателя $C_{лок}$, обладающего параметрами, соответствующими локальному минимуму;

- рассчитывается значение $K_{лок}$ при полученных значениях, $b_{тлок}$, $b_{елок}$, $r_{лок}$, $C_{лок}$ и заданной номинальной эффективной мощности P_e по формуле:

$$K_{лок} = \alpha_1 \frac{p}{p_{max}} + \alpha_2 \frac{m_{min}}{m} + \alpha_3 \frac{b_{e min}}{b_{елок}} + \alpha_4 \frac{b_{m min}}{b_{тлок}} + \alpha_5 \frac{r}{r_{лок}} + \alpha_6 J + \alpha_7 \frac{C_{min}}{C_{лок}} \quad (1г)$$

4. Из опытных данных следует, что K_0 , при заданной P_e , увеличивается при уменьшении – b_e , b_m и увеличении – r , т.е. при увеличении стоимости двигателя. Нахождение K_0 , стоимости и других параметров производится следующим образом:

- выбирают область допустимых значений, учитывающей увеличение стоимости дизеля:

$$\begin{cases} b_{e1} \leq b_e \leq b_{e2} < b_{елок} \\ b_{m1} \leq b_m \leq b_{m2} < b_{тлок} \\ r_{лок} < r_{m1} \leq r \leq r_{m2} \end{cases} \quad (8a)$$

для каждого из выбранных значений b_{e1} , b_{e2} , b_{m1} , b_{m2} , r_{m1} , r_{m2} , по алгоритму п.2 рассчитывается теоретическая стоимость и K_0 ;

- из полученных результатов выбирают те параметры b_e , b_m , r , которым соответствует максимальный K_0 ;

- сравнивают полученные K_0 , стоимости и других параметров в существующей и оптимизированной модели и делаются выводы.

Предлагаемую оптимизацию выбора параметров СЭУ проведём на примере сухогрузного судна проекта № 507 Б, имеющего дизель марки 6NVD48A-U (Производитель SKL DDR) по приведённому выше алгоритму.

1. Составляем список параметров двадцати дизелей (таблица 1), необходимых для расчета оптимизационной модели с более высоким комплексным параметром качества.

2. Рассчитываем удельную мощность, удельную массу и теоретическую стоимость (в условных единицах) (табл. 2) и определяем максимальные и минимальные значения соответствующих параметров, рассчитываем коэффициенты формулы (1) (табл. 3).

Рассчитываем значение комплексного параметра качества K_0 для каждого двигателя и заносим полученные значения в таблицу 2.

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

Таблица 1 – Исходные параметры ГСЭУ

№	Производитель	Заводская марка дизеля	Эффективная мощность P_e , кВт	Габаритные размеры, м: (длина) x (ширина) x (высота)	Масса, М, кг	Значение J (вид топлива)	Удельный расход топлива b_e , кг/(кВт·ч.)	Ресурс до капитального ремонта г, тыс. часов	Удельный расход масла, b_m , кг/(кВт·час.)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	SKL DDR	6NV D48- U	662	3,84x 1,6x 2,65	16200	0	0,217	36	0,0021
2	DDR- модель	6NV D48A -U	485	3,7x 2,59x 1,5	9400	0	0,160	10	0,00174
3	NVD	8NV D	412	4,44x 1,07x 2,46	10210	0	0,217	36	0,00158
4	Daiyatsu Diesel	6DL- 16	441	3,7x 1,8x 1,23	3000	0	0,203	30	0,0007
5	МАК	6M20	930	3,18x 1,42x 2,42	10500	0	0,186	32	0,00173
6	Дизель- пром	6V39 6TC4	330	1,75x 1,35x 1,52	2440	0	0,203	60	0,0007
7	SKL	8NV D48- 2U	853	6,12x 1,76x 2,84	23745	0	0,217	36	0,00171
8	SKL	6NV D48- U	540	3,84x 1,6x 2,65	16200	0	0,238	36	0,0021
9	Watsila NSD	4L20	665	2,43x 1,43x 2,09	6800	0	0,194	36	0,00185
10	Niigata	6MG DL-M	1029	4,25x 1,64x 2,36	12600	0	0,222	36	0,00176
11	Niigata	6NSD L-M	610	2,5x 1,1x 1,85	4400	0	0,198	36	0,00205
12	Yammar	6LAH -STE	570	2,13x 1,01x 1,49	2600	0	0,202	32	0,00183

Продолжение табл. 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	Yamar-DE	65185A-ET	650	2,49х 1,13х 2,11	5500	0	0,198	36	0,00205
14	Yamar Disel Engine CO LTD	6M220-UM	100 0	2,91х 1,16х 2,24	7300	0	0,211	36	0,00124
15	Yamar Disel Engine 16CO LTD	6S165-UT	450	2,21х 1,07х 1,58	2850	0	0,218	30	0,0008
16	M17AN B&W	9L16/24	900	3,85х 1х 2,22	9400	0	0,205	30	0,0021
17	MAN B&W	6L60MC	794 0	8,45х 3,23х 9,3	353000	1	0,185	12	<u>0,00045</u>
18	Wartsila NSD	6RTA48T	816 0	5,78х 3,17х 9,03	195000	1	0,19	15	0,00048
19	Mitsubishi HI	6UEC52LS	794 0	7,33х 3,22х 8,11	256000	1	0,186	12	0,00047
20	«Брянс- кий дизель» БМЗ	6ДКРН74/160- 3	853 0	9,965х 3,845х 7,86	4600000	1	0,192	10	0,00052

3. Согласно системе уравнений (13) и полученным значениям коэффициентов (табл. 3), находим параметры оптимизационной модели дизеля с номинальной эффективной мощностью $P_e = 662$ кВт в локальном минимуме $M(b_{\text{тлок}}, b_{\text{елок}}, r_{\text{лок}})$: $b_{\text{тлок}} = 0,0029$ кг / кВт·час; $b_{\text{елок}} = 0,244$ кг / кВт час; $r_{\text{лок}} = 15073$ часов. Подставляя данные значения в формулу для стоимости получаем: $C_{\text{лок}} = 789500$ условных единиц. Подставляя полученные значения $b_{\text{тлок}}, b_{\text{елок}}, r_{\text{лок}}, C_{\text{лок}}$, в формулу (1г), получаем значение комплексного параметра качества в локальном минимуме функции $K_0 = f(r, b_e, b_m) - K_{\text{лок}} = 0,3675$.

Таблица 2 – Расчётные данные параметров ГСЭУ

№	Заводская марка дизеля	Эффективная мощность, P_e , кВт	Удельная масса, m кг/кВт	Удельная мощность p , кВт/м ³	Стоимость расчетная, $C \cdot 10^3$ (кВт·ч) ² /кг
1	6NVD48-U	662	24,47	40,66	1556
2	6NVD48A-U	485	39,2	58,8	1084
3	8NVD	412	24,28	35,29	1098
4	6DL-16	441	6,80	53,83	1432
5	6M20	930	11,29	83,18	2633
6	6V396TC4	330	7,27	91,8	1553
7	8NVD48-2U	853	23,75	32,70	2041
8	6NVD48-U	540	30,00	33,17	1520
9	4L20	665	10,23	91,69	1920
10	6MGDL-M	1029	12,24	62,91	2294
11	6NSDL-M	610	7,21	119,88	1684
12	6LAH-STE	570	4,56	177,51	1492
13	65185A-ET	650	8,46	109,27	1779
14	6M220-UM	1000	7,30	132,02	2628
15	6S165-UT	450	6,33	120,22	1262
16	9L16/24	900	10,44	105,68	2037
17	6L60MC	7940	44,46	31,31	14623
18	6RTA48T	8160	23,90	49,30	15813
19	6UEC52LS	7940	32,24	41,51	14355
20	6ДКРН74/160-3	8530	539,3	28,32	13003

Таблица 3 – Расчётные коэффициенты

$\alpha_1 = 0,1$	$\alpha_2 = 0,12$	$\alpha_3 = 0,24$	$\alpha_4 = 0,14$	$\alpha_5 = 0,19$	$\alpha_6 = 0,14$	$\alpha_7 = 0,07$
$p_{\max} = 177,5$ кВт/м ³	$m_{\min} = 4,56$ кг/кВт	$b_{e \min} = 0,160$ кг/кВт · ч	$b_{m \min} = 0,00045$ кг/кВт · ч	$r_{\max} = 60$ тыс. ч.	0	$C_{\min} = 1084000$ (усл.ед.)
$\frac{\alpha_1}{p_{\max}} = 0,000563$	$\alpha_2 \cdot m_{\min} = 0,547$	$\alpha_3 \cdot b_{e \min} = 0,0384$	$\alpha_4 \cdot b_{m \min} = 0,000063$	$\frac{r_{\max}}{\alpha_5} = 315789$	0	$\alpha_7 \cdot C_{\min} = 75880$

4. Согласно (8), выберем две области допустимых значений :

$$\begin{cases} 0,00045 \leq b_m \leq 0,0028 \\ 0,16 \leq b_e \leq 0,24 \\ 16000 \leq r \leq 60000 \end{cases}$$

Таблица 4 – Расчётные параметры эталонного дизеля, дизеля в локальном минимуме K_0 и на границах области допустимых значений параметров

Параметр	Эталон	Локальный минимум	Границы области допустимых значений параметров							
			0,00045				0,0028			
b_m	0,0021	0,0029	0,16				0,24			
b_e	0,217	0,244	0,16		0,24		0,16		0,24	
$r \cdot 10^3$	36	15,073	16	60	16	60	16	60	16	60
$C_3 \cdot 10^3$	1556	789,5	2428	4581	1280	2415	1594	3007	840	1585
K_0	0,4148	0,3675	0,5070	0,6316	0,4550	0,5664	0,4058	0,5227	0,3682	0,4654

Как видно из таблицы, комплексный параметр качества в локальном минимуме действительно минимален ($K_{лок} = 0,3675$), что подтверждает правильность проведённых расчётов. Комплексный параметр качества K_0 эталонного дизеля уступает большинству параметров дизеля в граничных областях (кроме двух) и находится близко к локальному минимуму. Наблюдается тенденция к увеличению K_0 , с возрастанием стоимости двигателя.

Выводы. Из общего уравнения для комплексного параметра качества K_0 получено значение для его минимального значения и найдены области значений параметров при которых K_0 максимально. Правильность найденного выражения для K_0 в его локальном минимуме подтверждается приведённым примером расчёта. Разработанный алгоритм нахождения максимального значения K_0 может быть использован для практического выбора более экономичного дизеля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков В. В. Определение экономической эффективности проектированных СЭУ: Методические указания / В. В. Волков, А. В. Ломоносов. – Херсон : ОТД ХСЗ, 1998. – 42 с.
2. Корнилов Э. В. Технические характеристики современных дизелей : Справочник / Э. В. Корнилов, П. В. Бойко, Э. И. Голофастов. – Одесса : Негоциант, 2008. – 512 с.

Богданов О.В., Свиридов В.І., Кобяков М.М. ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ ВИБОРУ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

В статті запропонований алгоритм знаходження оптимальних значень технічних параметрів судових енергетичних установок для отримання максимальних значень комплексного параметру якості. Правильність знайденого виразу для K_0 в його локальному мінімумі підтверджується наведеним прикладом розрахунку. Наведений алгоритм знаходження максимального значення K_0 може бути використаний для практичного вибору більш економічного дизеля.

Ключові слова: комплексний параметр якості, оптимізаційна модель, алгоритм.

Bogdanov A.V., Sviridov V.I., Kobayakov N.N. OPTIMIZATION MODEL OF A SHIP'S POWER PLANT

This paper proposes an algorithm for finding the optimal values of technical parameters of marine power plants for maximum values of the complex quality setting (K_0). The found expression for K_0 in its local minimum confirmed by the example of calculation. The algorithm for finding the maximum value K_0 can be used for the practical selection of more economical diesel engine.

Key words: comprehensive quality setting, the optimization model, an algorithm.