

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/м<sup>3</sup>],

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)  $\alpha_i$ , 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  $b_{\text{лок}}$  и  $r_{\text{лок}}$ , соответственно, перепишем систему уравнений в виде:

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

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

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

Подставляя значения  $b_{\text{лок}}$  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 <sup>3</sup>	Стоимость расчетная, $C \cdot 10^3$ (кВт·ч) <sup>2</sup> /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 <sup>3</sup>	$m_{\min} = 4,56$ 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.*