

**АНАЛІЗ ГВИНТОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНА
5ДКРН 70/226,8 ЗА ПИТОМОЮ ВИТРАТОЮ ПАЛИВА**

*Гончаренко А.В.,
Херсонський державний морський інститут*

Вступ. При роботі головного суднового двигуна у складі суднової енергетичної установки (СЕУ) з прямою передачею потужності на гвинт фіксованого кроку, головний двигун (ГД) працює за гвинтовою характеристикою. Економічність і ефективність роботи СЕУ та основного її елемента, яким є ГД, оцінюється за показниками витрат палива та коефіцієнтів корисної дії.

Актуальність досліджень. Періодичний моніторинг цих показників є важливим, оскільки раціональна витрата палива – це одна з основних експлуатаційних задач. Тому розгляд характеру зміни такого параметру, як питомої витрати палива для конкретного двигуна є актуальною задачею.

Постановка даної проблеми у загальному вигляді має зв'язок із проблемами підтримання належного технічного стану СЕУ, надійності та енергозбереження у ситуаціях, які передбачають науково обґрунтований пошук альтернатив та вибір з них оптимальних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. По роботі [1] розглядаються варіанти вибору режиму керування дизелем, зокрема за критеріями економічності. Постановка однієї з задач містить:

«Снижение расхода топлива на судне и соответственно стоимости топлива может быть достигнуто путем уменьшения текущей силы сопротивления R , усовершенствования гидродинамической работы судна и гребного винта, повышения КПД главного двигателя η_e , элементов передачи η_n и утилизации тепла и мощности. Практически это означает стремление к максимальному приближению текущей винтовой характеристики к зоне минимального удельного эффективного расхода дизеля на его универсальной характеристике ...» [1, с. 274].

Робота [2] присвячена питанням розгляду режимів навантаження головних суднових дизелів, впливу зовнішніх факторів на режимні показники.

У роботі [3, с. 270, рис. 10.12] наведено гвинтову характеристику двигуна 5ДКРН 70/226,8, яку представлено на рисунку 1.

З урахуванням залежності потужності двигуна, яка, при роботі за гвинтовою характеристикою, повинна повністю поглинатися гребним гвинтом, від частоти обертання [3, с. 268, (10.5)]

$$N = c_2 \cdot n^m, \quad (1)$$

де N – потужність; c_2 – коефіцієнт пропорційності; n – частота обертання; m – показник ступеня (для водовиміщуючих суден $m=3$).

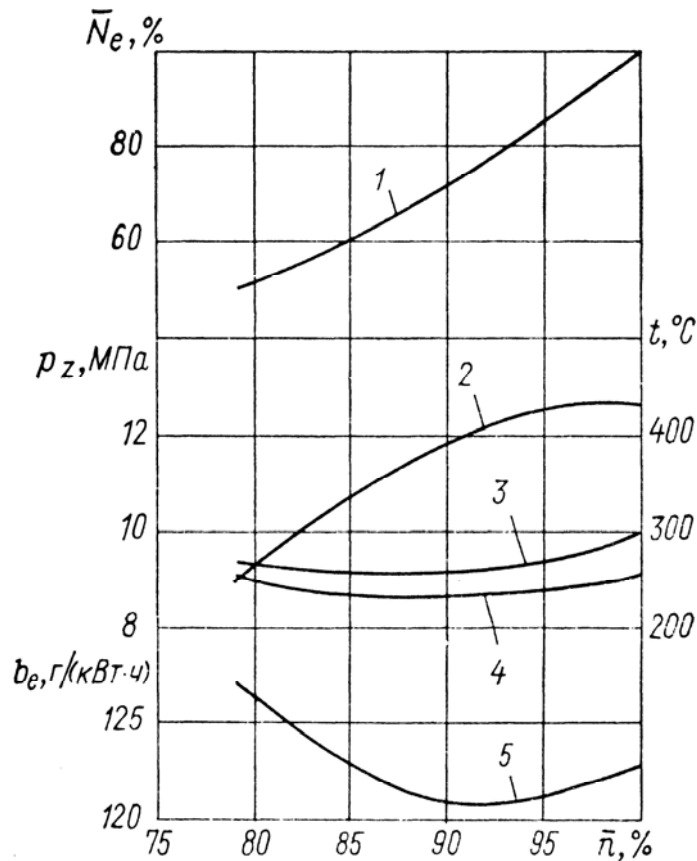


Рисунок 1. Гвинтова характеристика двигуна 5ДКРН 70/226,8:

1 – потужність; 2 – максимальний тиск у циліндрі; 3 – температура газів на виході з циліндрів; 4 – температура газів на виході з турбокомпресору; 5 – питома витрата палива

$$(N_{e \text{ ном}}=9000 \text{ кВт}, n_{\text{ном}}=95 \text{ хв}^{-1})$$

Відповідно до залежності [3, с. 268, (10.7)] зміни годинної витрати палива G_T

$$G_T \approx c_4 \cdot n^3, \quad (2)$$

де c_4 – постійна величина. Тобто, як і потужність (1), годинна витрата палива буде змінюватися приблизно за кубічною параболою.

У роботі [4] йдеться про забезпечення ресурсу та якості експлуатації дизелів на робочих режимах.

Невирішеною частиною загальної проблеми забезпечення надійності СЕУ, ГД та ефективного використання енергії лишається побудова математичної моделі, що враховує змінюваність параметрів c_2 та m при зміні частоти обертання n формули (1), так само як і параметру c_4 та показника ступеня у формулі (2), а також, у даному конкретному випадку, відсутність на рисунку 1 годинної витрати палива. До того ж абсолютні значення питомої ефективної витрати палива викликають небезпідставні сумніви.

Постановка завдання. Метою статті є побудова адекватної математичної моделі гвинтової характеристики двигуна 5ДКРН 70/226,8 за зміною параметрів потужності та питомої ефективної витрати палива і дослідження залежності для оптимальних значень питомої ефективної витрати палива.

Основний матеріал. Після зняття параметрів при побудові гвинтової характеристики застосовуються методи апроксимації. За умови постійних величин параметрів c_2 , c_4 та $m=3$ при зміні частоти обертання n та виходячи з формул (1, 2), неможливо отримати гвинтову характеристику двигуна 5ДКРН 70/226,8 у такому вигляді, як це показано на рисунку 1. Якщо годинна витрата палива буде змінюватися приблизно за кубічною параболою (2) [3, с. 268, (10.7)], при кубічній залежності потужності від частоти обертання колінчастого валу двигуна (1), то буде отримано залежність зміни питомої ефективної витрати палива від частоти обертання лінійного характеру у вигляді постійної величини. При постійних c_2 та $m=3$ потужність у відповідному діапазоні змінюється за кривою 1, показаною на рисунку 1.

Постановка задачі. Для ГД 5ДКРН 70/226,8, коли він працює за гвинтовою характеристикою [3, с. 270, рис. 10.12], з метою побудови адекватної математичної моделі за характерні точки приймемо значення

відносної частоти обертання $\bar{n} = \frac{n}{n_{\text{ном}}}$, де $n_{\text{ном}}$ – частота обертання на

номінальному режимі, що становлять \bar{n}_x , \bar{n}_o , $\bar{n}_{\text{ном}}$ на режимах знижених обертів, мінімальної питомої ефективної витрати палива та номінальному

відповідно. Відносна ефективна потужність двигуна $\bar{N}_e = \frac{N_e}{N_{e \text{ ном}}}$, де N_e –

ефективна потужність двигуна, $N_{e \text{ ном}}$ – ефективна потужність двигуна на номінальному режимі, буде виходячи з (1) пропорційною кубу \bar{n} , при незмінних коефіцієнті c_2 та $m = 3$ $\bar{N}_e = \bar{n}^3$, а на номінальному режимі

$\bar{N}_{e \text{ ном}} = \bar{n}_{\text{ном}} = 1$. Тоді, на режимах знижених обертів, мінімальної питомої ефективної витрати палива та номінальному отримаємо $\bar{N}_{e x}$, $\bar{N}_{e o}$, $\bar{N}_{e \text{ ном}}$

відповідно. Використавши графік 1 (рис. 1) [3, с. 270, рис. 10.12] та формулу (1), отримаємо:

$$c_2 = \frac{N_{e \text{ ном}}}{n_{\text{ном}}^3}, \quad N_e(n) = c_2 \cdot n^3 \quad (3)$$

Значення для погодинної витрати палива G_T на тих самих режимах дістанемо з рівняння, яке слугує для визначення вже відомої величини питомої ефективної витрати палива:

$$g_e = \frac{G_T}{N_e}, \quad (4)$$

де g_e – відповідні до вказаних режимів значення для b_e , зняті з графіка 5, рис. 1. Звідки:

$$G_T = g_e \cdot N_e. \quad (5)$$

Таким чином отримуємо G_{T_x} , G_{T_o} , $G_{T_{НОМ}}$ при відповідній частоті обертання \bar{n}_x , \bar{n}_o , $\bar{n}_{НОМ}$. Точкові значення апроксимуються залежністю (2), застосовуючи вирази для значень коефіцієнту c_4 на відповідних режимах:

$$A = \frac{G_{T_x}}{n_x^3}, \quad B = \frac{G_{T_o}}{n_o^3}, \quad C = \frac{G_{T_{НОМ}}}{n_{НОМ}^3}, \quad (6)$$

де A , B , C – відповідні до вказаних режимів значення коефіцієнту c_4 .

Коефіцієнти (6) апроксимуються системою нелінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = a \cdot \left(\frac{n_x}{n_{НОМ}} \right)^2 + b \cdot \frac{n_x}{n_{НОМ}} + d \\ B = a \cdot \left(\frac{n_o}{n_{НОМ}} \right)^2 + b \cdot \frac{n_o}{n_{НОМ}} + d \\ C = a \cdot \left(\frac{n_{НОМ}}{n_{НОМ}} \right)^2 + b \cdot \frac{n_{НОМ}}{n_{НОМ}} + d \end{array} \right\}, \quad (7)$$

де a , b , d – відповідні невідомі шукані коефіцієнти апроксимаційної формули.

Маючи систему трьох рівнянь з трьома невідомими (7), отримуємо невідомі коефіцієнти a , b , d апроксимуючої залежності для коефіцієнтів рівнянь (6) A , B , C . Відповідну формулу для параметру c_4 залежно від швидкості обертання маємо у вигляді:

$$c_4(n) = a \cdot \left(\frac{n}{n_{НОМ}} \right)^2 + b \cdot \frac{n}{n_{НОМ}} + d. \quad (8)$$

Тоді з урахуванням рівняння (2) погодинна витрата палива, як функція від частоти обертання, що задовольняє умовам (4, 5):

$$G_T(n) = c_4(n) \cdot n^3 = \left[a \cdot \left(\frac{n}{n_{НОМ}} \right)^2 + b \cdot \frac{n}{n_{НОМ}} + d \right] \cdot n^3. \quad (9)$$

Таким чином, дістаємо відсутню на рисунку 1 залежність $G_T(n)$, яка адекватно відтворює зображену графіком 5 залежність питомої ефективної витрати палива від відносної швидкості обертання колінчастого валу двигуна 5ДКРН 70/226,8, що працює за номінальною гвинтовою характеристикою. Побудовані графіки, наведені на рисунку 2, практично не відрізняються від графіків рисунку 1, чим показують ідентичність математичної моделі та доводять достовірність отриманих залежностей.

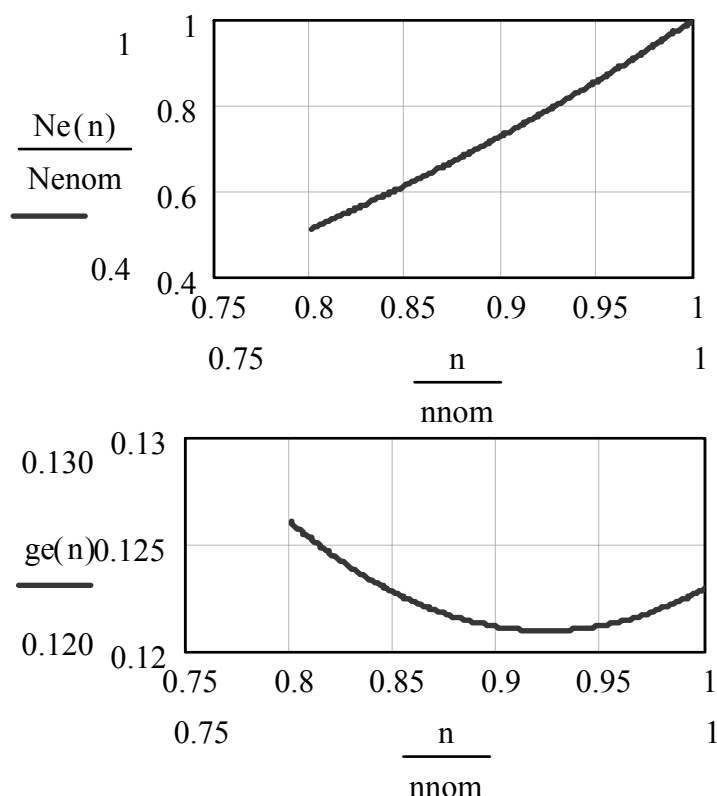


Рисунок 2. Розрахункова гвинтова характеристика двигуна 5ДКРН 70/226,8

Питома ефективна витрата палива залежно від частоти обертання з урахуванням (4, 9, 3) буде мати такий аналітичний вигляд:

$$g_e(n) = \frac{G_r(n)}{N_e(n)}. \quad (10)$$

При зміні гвинтової характеристики, відповідним чином змінюються коефіцієнти c_2 , c_4 виразів (1, 2), тобто величина $c_4(n)$ формул (8, 9) пов'язана зі зміною c_2 . У даній постановці промодельюємо цей зв'язок через коефіцієнт b , що впливає на $c_4(n)$ та входить до складу системи рівнянь (7) та виразів (8, 9).

Виходячи з нелінійності зв'язку між b та c_2 , у даній постановці застосуємо апроксимацію квадратичною параболою, подібно до залежностей (7, 8). У такому разі для номінальної гвинтової характеристики маємо пару значень (b, c_2) ; для гвинтової характеристики важчої за номінальну (b_b, c_{2b}) ; легшої (b_l, c_{2l}) .

Відповідна система нелінійних рівнянь для апроксимації залежності між коефіцієнтами b та c_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} b_b = X \cdot (c_{2_b})^2 + Y \cdot c_{2_b} + Z \\ b = X \cdot (c_2)^2 + Y \cdot c_2 + Z \\ b_l = X \cdot (c_{2_l})^2 + Y \cdot c_{2_l} + Z \end{array} \right\}, \quad (11)$$

де X, Y, Z – відповідні невідомі шукані коефіцієнти апроксимаційної формули.

Таким чином, як і у випадку системи (7), маємо три рівняння з трьома невідомими, з яких дістаємо коефіцієнти X, Y, Z . Тоді залежність b від c_2 :

$$b(c_2) = X \cdot (c_2)^2 + Y \cdot c_2 + Z. \quad (12)$$

Підставивши вираз (12) у формулу (9), маємо:

$$G_T(n) = \left[a \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)^2 + (X \cdot c_2^2 + Y \cdot c_2 + Z) \cdot \frac{n}{n_{\text{НОМ}}} + d \right] \cdot n^3. \quad (13)$$

Питома ефективна витрата палива відповідно до (10, 13, 3):

$$g_e(n) = \frac{\left[a \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)^2 + (X \cdot c_2^2 + Y \cdot c_2 + Z) \cdot \frac{n}{n_{\text{НОМ}}} + d \right] \cdot n^3}{c_2 \cdot n^3}. \quad (14)$$

Для відшукування залежності зміни оптимальних значень питомої ефективної витрати палива при зміні гвинтової характеристики застосуємо метод, залучений у роботі [5] для побудови графіків оптимальних значень. З умови:

$$\frac{\partial g_e(n, c_2)}{\partial n} = f(n, c_2) = 0 \quad (15)$$

отримуємо:

$$c_{2 \text{ опт}}(n) = \varphi(n). \quad (16)$$

Остаточно:

$$g_{e \text{ опт}}(n) = g_e(n, c_{2 \text{ опт}}(n)). \quad (17)$$

У розгорнутому вигляді:

$$g_{e \text{ опт}}(n) = \frac{\left[a \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{НОМ}}} \right)^2 + (X \cdot (c_{2 \text{ опт}}(n))^2 + Y \cdot (c_{2 \text{ опт}}(n)) + Z) \cdot \frac{n}{n_{\text{НОМ}}} + d \right] \cdot n^3}{(c_{2 \text{ опт}}(n)) \cdot n^3}. \quad (18)$$

Розв'язання задачі. При розв'язанні задачі, з графіку 1 рисунку 1 [3, с. 270, рис. 10.12] для режимів $\bar{n}_x, \bar{n}_o, \bar{n}_{\text{НОМ}}$ знімаємо відповідні значення відносної ефективної потужності $\bar{N}_{ex}, \bar{N}_{eo}, \bar{N}_{e \text{ НОМ}}$ та з графіку 5 питомої ефективної витрати палива b_e (для даної постановки застосовується позначення g_e), відповідно до яких, за процедурою, що виписана формулами (3-9), отримуємо погодинну витрату палива $G_m(n)$. З рівняння (10) маємо

питому ефективну витрату палива $g_e(n)$ при роботі ГД 5ДКРН 70/226,8 за номінальною гвинтовою характеристикою, для вказаних нижче значень параметрів формул, графік $g_e(n)$ показано на рисунку 2.

Зміна гвинтової характеристики, модельована зв'язком між b та c_2 , приводить через формули (11-13) до інших залежностей питомої ефективної витрати палива $g_e(n)$, вираз (14). Положення оптимальних значень змінюється.

Шляхом застосування методу, викладеного за формулами (15-18) отримуємо:

$$\frac{\partial g_e(n, c_2)}{\partial n} = f(n, c_2) = \frac{\left[2 \cdot a \cdot \frac{n}{n_{\text{ном}}} + \frac{(X \cdot c_2^2 + Y \cdot c_2 + Z)}{n_{\text{ном}}} \right]}{c_2} = 0. \quad (19)$$

Звідки, розв'язуючи квадратне рівняння, маємо корені:

$$c_{2 \text{ opt}}(n) = \begin{cases} c_{2_1} = \frac{-n_{\text{ном}} \cdot Y + \sqrt{n_{\text{ном}}^2 \cdot Y^2 - 8 \cdot n_{\text{ном}} \cdot X \cdot a \cdot n - 4 \cdot n_{\text{ном}}^2 \cdot X \cdot Z}}{2 \cdot n_{\text{ном}} \cdot X} \\ c_{2_2} = \frac{-n_{\text{ном}} \cdot Y - \sqrt{n_{\text{ном}}^2 \cdot Y^2 - 8 \cdot n_{\text{ном}} \cdot X \cdot a \cdot n - 4 \cdot n_{\text{ном}}^2 \cdot X \cdot Z}}{2 \cdot n_{\text{ном}} \cdot X} \end{cases}. \quad (20)$$

Корінь c_{2_2} дає від'ємні значення питомої ефективної витрати палива $g_e(n)$, тому повинен бути відкинутий, як такий, що не має фізичного сенсу. Остаточо отримуємо аналітичний вираз для кривої зміни оптимальних значень питомої ефективної витрати палива у вигляді (18).

Практичне застосування розв'язання задачі. Експериментально отримані значення для двигуна 5ДКРН 70/226,8 апроксимовані та представлені на рисунку 1 [3, с. 270, рис. 10.12]. Виходячи з чого $\bar{n}_x=0,8$; $\bar{n}_o=0,92$; $\bar{n}_{\text{ном}}=1,0$ на режимах знижених обертів, мінімальної питомої ефективної витрати палива та відповідно номінальному. З графіку 1 маємо відповідні значення відносної ефективної потужності $\bar{N}_{ex}=0,512$; $\bar{N}_{eo}=0,779$; $\bar{N}_{e \text{ ном}}=1,0$. Це становить в абсолютних значеннях $N_{ex}=4608$ кВт; $N_{eo}=7008$ кВт; $N_{e \text{ ном}}=9000$ кВт. Для g_e маємо $g_{ex}=0,126$ кг/(кВт·год.); $g_{eo}=0,121$ кг/(кВт·год.); $g_{e \text{ ном}}=0,123$ кг/(кВт·год.). Тоді погодинна витрата палива на трьох режимах роботи двигуна, що розглядаються, $G_{m \text{ x}}=581$ кг/год.; $G_{m \text{ o}}=848$ кг/год.; $G_{m \text{ ном}}=1107$ кг/год. Коефіцієнти A, B, C рівнянь (6, 7) для параметру c_4 залежно від швидкості обертання $A=1,323 \cdot 10^{-3}$; $B=1,27 \cdot 10^{-3}$; $C=1,291 \cdot 10^{-3}$. Коефіцієнти a, b, d апроксимуючої залежності $a=3,521 \cdot 10^{-3}$; $b=-6,498 \cdot 10^{-3}$; $d=4,268 \cdot 10^{-3}$. Коефіцієнти X, Y, Z $X=16,6$; $Y=0,1483$; $Z=-9,884 \cdot 10^{-3}$.

За результатами розрахунків будуються гвинтові характеристики. Обирається найбільш вигідний режим роботи двигуна у складі суднового пропульсивного комплексу.

Результати досліджень. Проведено математичне моделювання зміни гвинтової характеристики ГД 5ДКРН 70/226,8. Отримано аналітичні вирази параметрів, що використовуються для розрахунку питомої ефективної витрати палива. Залежності проілюстровано графіками на рисунках 2, 3. Зміна оптимальних значень питомої ефективної витрати палива має нелінійний характер.

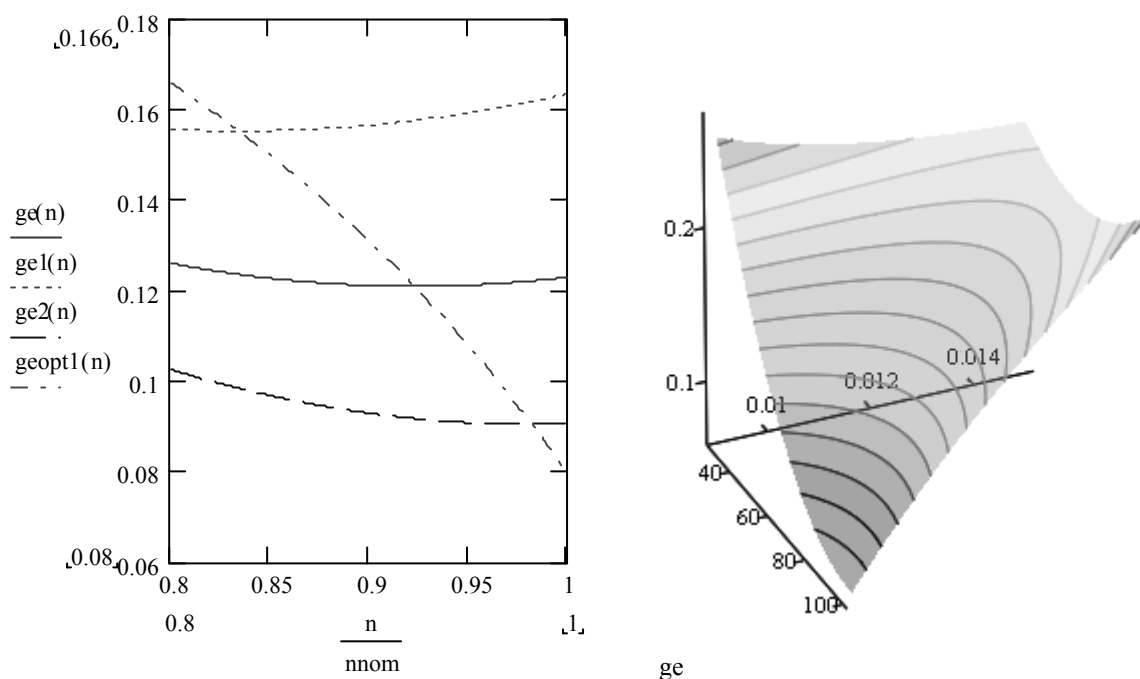


Рисунок 3. Питома ефективна витрата палива двигуна 5ДКРН 70/226,8

За формулами (16, 18–20) можна одразу визначити оптимальні значення питомої ефективної витрати палива, параметрів та частоти обертання.

Універсальна характеристика дає можливість обирати найбільш економічний режим роботи двигуна.

Реалістичні прогнозні значення питомої ефективної витрати палива для 5ДКРН 70/226,8 застосованого у якості ГД з безпосередньою передачею потужності на гребний гвинт фіксованого кроку, вказані у роботі [3, с. 270, рис. 10.12] (рис. 1) скоріш за все слід читати, як b_e , г/(к.с.·год.).

Мінімальна питома ефективна витрата палива становить у перерахунку з к.с. тієї чи іншої системи одиниць на кВт $g_{e \min} = 168 \div 170$ г/(кВт·год.).

Висновки. Проблеми надійності та енергозбереження пов'язані між собою через вибір оптимальних витрат палива (енергозбереження) та підтримання працездатного технічного стану СЕУ (надійності).

Достовірність та можливість застосування методу підтверджується ідентичністю отриманих результатів та вихідних даних випробувань, експлуатації та експериментів.

При виборі експлуатаційного режиму слід враховувати обмежувальні характеристики. Для з'ясування допустимих режимів та параметрів технічного стану СЕУ потрібні додаткові дослідження. Також необхідний статистичний матеріал стосовно однотипних суден.

У подальших дослідженнях має сенс розглянути вплив застосування економічних режимів роботи двигуна на швидкість ходу судна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Суворов П.С. Динамика дизеля в судовом пропульсивном комплексі. – Одеса : ОНМА, 2004. – 304 с.
2. Суворов П.С. Управление режимами работы главных судовых дизелей. – Одеса : ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.
3. Судовые двигатели внутреннего сгорания : учебник / [Ю.Я. Фомин, А.И. Горбань, В.В. Добровольский, А.И. Лукин и др.] – Л. : Судостроение, 1989. – 344 с.
4. Суворов П.С. Рабочие процессы и режимы судовых двигателей внутреннего сгорания : учебное пособие. – Одеса : ОНМА, 2007. – 192 с.
5. Гончаренко А.В. Керування підтриманням безпеки польотів через технічні та витратні чинники : дис. к-та техн. наук : 05.13.03. – К., 2005. – 198 с.