

TOMASZ KNIAZIEWICZ, LESZEK PIASECZNY*

WPŁYW GŁĘBOKOŚCI AKWENU MORSKIEGO NA CHARAKTERYSTYKI ŚRUBOWE EMISJI TOKSYCZNYCH SKŁADNIKÓW SPALIN SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

EFFECT OF DEPTH OF THE SEA AREA ON THE SCREW CHARACTERISTICS OF EMISSIONS OF TOXIC COMPOUNDS IN EXHAUST FROM MARINE DIESEL ENGINES

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę identyfikacji charakterystyk emisji toksycznych składników spalin silników okrętowych, wykorzystującą uogólnione charakterystyki oporowe okrętów i charakterystyki śrubowe ich silników. Charakterystyki te wyznaczono na podstawie identyfikacji parametrów ruchu statków morskich rejestrowanych w systemie AIS. Przedstawiono sposoby uwzględniania rzeczywistych warunków pracy okrętowego układu napędowego podczas pływania jednostki na akwenu o małej głębokości wody i podano wyniki badań silnika Sulzer typu 6AL20/24, dla którego symulowano warunki obciążeń, wynikające ze zmian głębokości akwenu, na którym pływa odpowiadający mu okręt. Badania te pozwoliły uzyskać wiele charakterystyk śrubowych stężenia, natężenia i emisji jednostkowej toksycznych składników spalin.

Słowa kluczowe: silniki okrętowe, charakterystyki emisji

Abstract

This paper presents a method to identify the determining of the characteristics of toxic compounds in exhaust from marine Diesel engines using generalized resistance characteristics of ships and the screw characteristics of their engines. These characteristics were determined on the basis of the identification of the ships movement registered in the AIS. The paper presents how to integrate real working conditions of ship propulsion system during navigation on the area of low depth of water and gives the results of the study of Sulzer 6AL20/24 engine for which simulated the conditions of the engine load resulting from changes in the depth of the basin in which the corresponding the navigation ship. These studies have generated a number of the screw characteristics of concentration, intensity and emission of toxic compounds in exhaust.

Keywords: marine engines, characteristics of emission

* Prof. dr hab. inż. Leszek Piaseczny, dr in. Tomasz Kniaziewicz, Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni.

1. Wstęp

W warunkach użytkowania okrętu rozróżnia się żeglugę na drodze wodnej nieograniczonej, której wpływ na zmiany oporu kadłuba jest pomijalnie mały, oraz na drodze wodnej ograniczonej, na której wpływ jej głębokości na opory ruchu okrętu jest znaczący. Kryteria oceny wpływu ograniczeń drogi wodnej (toru wodnego) na kształtowanie opływu kadłuba nie są jednoznaczne. Na przykład, według [1, 2] woda nieograniczona pod względem głębokości powinna spełniać warunek, że $h > 20 \cdot T$ (gdzie: h – głębokość wody, T – maksymalne zanurzenie okrętu). Ustalenia PIANC (Międzynarodowe Stowarzyszenie Żeglugowe) wprowadzają cztery różne rodzaje wody ograniczonej (płytkiej): woda głęboka, gdy $h/T > 3$; woda średnio głęboka, gdy $1,5 < h/T < 3,0$; woda płytka, jeżeli $1,2 < h/T < 1,5$, oraz bardzo płytka woda, kiedy $h/T < 1,2$.

Na wzrost oporów kadłuba znaczący wpływ ma pogorszenie warunków zewnętrznych, a mianowicie: pływanie na wodach płytkich, w kanałach, przy silnych prądach wodnych, pływanie w sztormie, a także w następstwie zwiększenia zanurzenia (np. w wyniku zwiększenia ładunku, balastowania pustych zbiorników i przestrzeni ładunkowych czy też zmniejszenia gęstości – zasolenia wody), zwiększenia części wystających oraz chropowatości kadłuba w następstwie jego porostania organizmami morskimi i korozji.

Ogólne zasady modelowania wpływu warunków zewnętrznych na opory okrętu i obciążenie silnika napędu śrubowego w kontekście ich wpływu na emisję związków toksycznych zawartych w spalinach podano w pracach [3, 4]. W niniejszym artykule autorzy przedstawiają szczegółowe informacje o toku modelowania wpływu głębokości akwenu morskiego na charakterystyki oporowe i charakterystyki emisji toksycznych składników spalin.

2. Wpływ głębokości wody na opór pływania okrętu

Ograniczenie głębokości wody wpływa na wszystkie składowe opory pływania okrętu. Ograniczona głębokość wody h , wyrażona podanym wyżej stosunkiem do zanurzenia okrętu $h/T > 1$, w sposób znaczący wpływa na charakter opływu kadłuba przez wodę i wartość generowanego oporu. Przy przejściu okrętu z wody głębokiej na wodę płytką zmienia się charakterystyka układu falowego, zmieniają się wielkości amplitud generowanych fal, powodując przede wszystkim znaczną zmianę oporu falowego. Jednocześnie zmianie ulegają lokalne wartości liczby Reynoldsa, wskazujące na zmiany własności przepływu związane z lepkością wody. Pojawia się także zjawisko przepływu wstecznego oraz występują efekty wywołane oderwaniem przepływu. W rezultacie następują zmiany oporu lepkościowego (składowej oporu tarcia) w porównaniu z oporem kadłuba na wodzie głębokiej.

Ogólnie ocenia się, że dla stosunku głębokości wody do zanurzenia $h/T > 3$ zmiana oporu tarcia i kształtu jest nieznaczna, natomiast dla mniejszych głębokości wody w granicach $h/T = 1,5-2,5$ opór ten może wzrosnąć o 10–15% w porównaniu do oporu kadłuba na wodzie głębokiej [1, 2, 5, 6].

Zasadnicze zmiany dotyczą składowej oporu falowego, które wynikają ze zmian charakterystyki układu falowego na wodzie płytkiej, kiedy to zwiększenie się prędkości okrętu powoduje zwiększenie długości fal w układzie fal poprzecznych. Zwiększa się również kąt pochylenia obwiedni układu tych fal, co sprawia, że wierzchołki układu fal skośnych zbliżają się do fal poprzecznych. W okolicy dziobu kadłuba tworzy się fala odosobniona przemiesz-

czająca się razem z okrętem. Na rufie powstaje również fala odosobniona, ale o mniejszej wysokości. Opór falowy osiąga maksymalną wartość przy prędkości krytycznej, po przekroczeniu której kadłub okrętu generuje wtórny układ fal, składający się z dwóch pęków fal skośnych. Prędkość krytyczna okrętu, która jest równa prędkości krytycznej rozchodzenia się generowanej fali na wodzie płytkiej, określona jest zależnością:

$$v_{kr} = \sqrt{g \cdot h} \quad (1)$$

gdzie: g [m/s²] jest przyspieszeniem ziemskim.

W opisie oporu okrętu na wodzie stosuje się często jedno z podstawowych kryteriów podobieństwa hydrodynamicznego, a mianowicie liczbę Froude'a Fn_h , odniesioną do głębokości wody:

$$Fn_h = Fn \cdot \sqrt{\frac{L}{h}} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2)$$

gdzie:

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad \text{– podstawowa postać liczby Froude'a, odniesiona do długości } L \text{ kadłuba okrętu.}$$

Można zauważyć, że prędkość rozchodzenia się fali poprzecznej na wodzie płytkiej jest funkcją liczby Fn_h . Prędkość v_h osiąga wartość krytyczną v_{kr} przy krytycznej liczbie Froude'a, której wartość wynosi $Fn_{h(kr)} = 1$.

Z podanej w pracach [1, 2, 6] analizy charakterystyki układu falowego na wodzie płytkiej wynika, że zasadniczy wpływ na zmianę kształtu generowanego układu falowego ma malejąca prędkość, z jaką przemieszcza się energia zawarta w falach przy przejściu z wody głębokiej na wodę płytką o głębokości h , co wyraża się relacją:

$$v_h = v \sqrt{\operatorname{tg} h \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right)} \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} v_h \text{ [m/s]} &\text{ – prędkość fali na wodzie płytkiej o głębokości } h, \\ v \text{ [m/s]} &\text{ – prędkość fali na wodzie głębokiej,} \\ \lambda \text{ [m]} &\text{ – długość fali.} \end{aligned}$$

Na podstawie powyższych uwag należy podkreślić, że o ile prędkość rozchodzenia się fal na wodzie głębokiej jest równa prędkości okrętu, o tyle po wplynięciu na wodę płytką prawidłowość ta zostaje zakłócona, ponieważ długość fal rośnie, a ich prędkość maleje. Prędkość krytyczna okrętu na wodzie płytkiej o ustalonej głębokości jest przy tym równa maksymalnej prędkości, z jaką może przemieszczać się fala odosobniona na wodzie płytkiej o takiej samej głębokości. Charakterystyczną cechą fali odosobnionej jest to, że cały jej profil jest wypiętrzony ponad poziom wody niezakłóconej, co jest związane z wydatkowaniem odpowiedniego nakładu energii i stąd wzrostem siły oporu kadłuba okrętu. Fala odosobniona przenosi przy tym energię z prędkością jej przemieszczania.

Przy prędkości pływania mniejszej od $v_h = 0,4 \cdot v_{kr}$ opływ kadłuba praktycznie nie różni się od opływu na wodzie głębokiej i stąd można przyjąć, że i wartość oporu danego okrętu na wodzie płytkiej przy tych prędkościach nie różni się istotnie od oporu na wodzie głębokiej. Przy prędkościach pływania mieszczących się w przedziale $0,4 \cdot v_{kr} < v_h \leq 0,75 \cdot v_{kr}$ charakte-

rystyka układu falowego ulega znacznej zmianie, to znaczy zwiększa się kąt propagacji fal skośnych, rosną amplitudy fal skośnych i fal poprzecznych, a opór wzrasta w porównaniu z oporem na wodzie głębokiej. Przy prędkościach w przedziale $0,75 \cdot v_{kr} < v_h \leq v_{kr}$ prawie cały układ falowy koncentruje się w dwóch spiętrzonych falach poprzecznych, mających charakter fal odosobnionych, generowanych w pobliżu rufy i dziobu kadłuba. W tym zakresie prędkości opór okrętu osiąga maksymalną wartość. Przy prędkości $v_h > v_{kr}$ fale, nie nadążając za okrętem, pozostają w tyle, generowane są jedynie drobne fale skośne, okręt płynie ze znacznym udziałem wyporu hydrodynamicznego, a opór całkowity po przekroczeniu prędkości krytycznej zmniejsza się [1, 2].

Powyższe dane wskazują, że do wyznaczenia oporu okrętu na akwenach o ograniczonych głębokościach można zastosować sposób, polegający na porównaniu wartości oporu na wodzie głębokiej przy określonej prędkości pływania v z oporem na wodzie płytkiej przy innej ekwiwalentnej prędkości ruchu v_h . Przyjęto więc, że opór kadłuba na wodzie głębokiej przy prędkości v jest równy oporowi na wodzie płytkiej przy prędkości:

$$v_h = v \sqrt{\operatorname{tg} h \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right)} \quad (4)$$

Do wyznaczenia oporu kadłuba określonego okrętu na wodzie płytkiej konieczna jest zatem znajomość jego standardowej charakterystyki oporowej (oporu w zależności od prędkości pływania) podczas pływania na wodzie głębokiej.

3. Charakterystyki oporowa i śrubowa dla pływania na akwenach o różnej głębokości

Podstawowa charakterystyka opisująca warunki pracy silnika głównego w okrętowym układzie napędowym wynika z charakterystyki oporowej jednostki pływającej oraz charakterystyki śruby napędowej. Charakterystyki oporowe wyznaczać można metodami obliczeniowymi na podstawie dostępnych danych dla określonej jednostki pływającej. Do wyznaczania oporu całkowitego jednostek pływających o kadłubach wypornościowych użytkowanych w normalnych warunkach jest często stosowana metoda opisana w pracy [7]:

$$R = g \left\{ 0,17 \cdot \Omega \cdot v^{1,825} + 1,45 \left(24 - \frac{L}{B} \right) \delta^{\frac{s}{2}} \frac{D}{L^2} v^4 \right\} \quad (5)$$

gdzie:

- g [m/s²] – przyspieszenie ziemskie,
- Ω [m²] – pole powierzchni zwilżonej kadłuba,
- v [m/s] – prędkość okrętu,
- B, L [m] – szerokość kadłuba i długość wodnicy konstrukcyjnej,
- δ – współczynnik pełnotliwości kadłuba,
- D [t] – wyporność okrętu.

Charakterystyki mocy holowania jednostki oraz zapotrzebowanej mocy użytecznej silnika napędowego z zależności o ogólnych postaciach:

$$P_h = R \cdot v \quad (6)$$

$$P_e = \frac{R \cdot v}{\xi_o \cdot \eta_{LW} \cdot \eta_r} \quad (7)$$

gdzie:

- P_h [kW] – moc holowania,
- P_e [kW] – moc użyteczna silnika głównego (silników głównych),
- R [kN] – opór całkowity okrętu na wodzie głębokiej (R),
- ξ_o [-] – sprawność napędowa układu,
- η_{LW} [-] – sprawność linii wałów,
- η_r [-] – sprawność przekładni redukcyjnej.

Przyjmując na podstawie literatury [5] średnie wartości współczynników dla układów napędowych wyposażonych w tłokowe silniki spalinowe wolnoobrotowe ($\xi_o = 0,65$, $\eta_{LW} = 0,985$, $\xi_k = 1$), wzór do przybliżonego obliczenia użytecznej mocy zapotrzebowanej uprosi się do postaci:

$$P_{e_w} \approx 1,56 \cdot R \cdot v \quad (8)$$

natomiast w przypadku układów napędowych z tłokowymi silnikami spalinowymi szybkoobrotowymi ($\xi_o = 0,55$, $\eta_{LW} = 0,985$, $\eta_r = 0,97$, $\xi_k = 1$) do postaci:

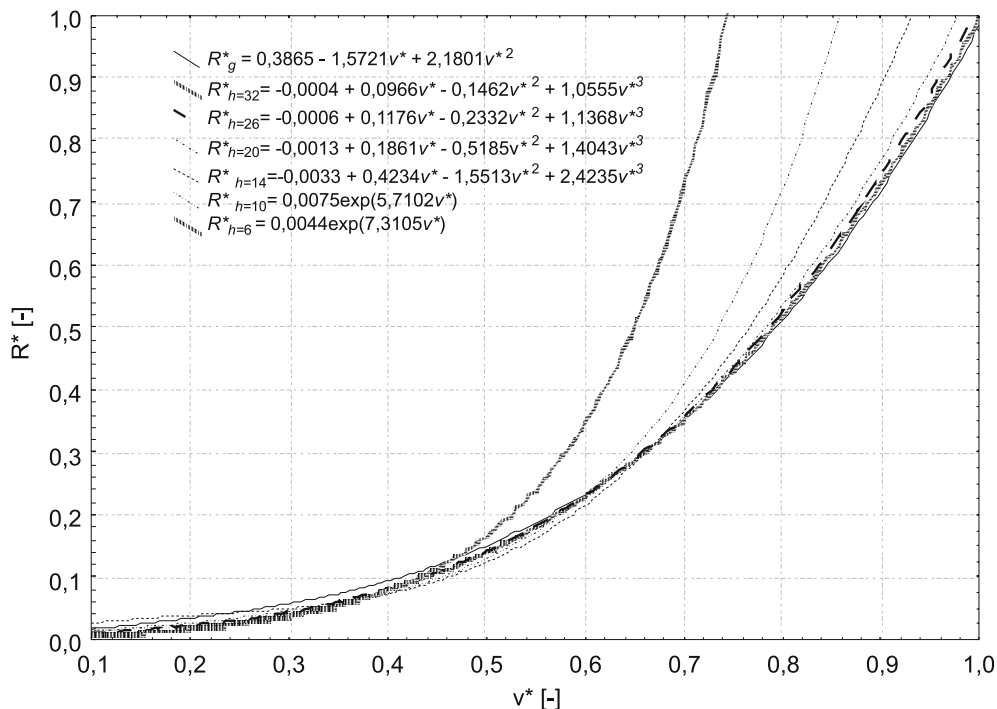
$$P_{e_s} \approx 1,9 \cdot R \cdot v \quad (9)$$

Do obliczeń charakterystyk śrubowych oporu i mocy silnika napędowego, w ramach pracy [8] opracowano program Power, w którym wielkości podstawowe (w tym pobierane z systemu identyfikacji ruchu statków AIS) stanowią: prędkość nominalna okrętu, moc nominalna silnika napędu śrubowego, wymiary główne okrętu ($L \times B \times T$), prędkość bieżąca okrętu [w], współczynnik pełnotliwości kadłuba δ (dobierany w zależności od rodzaju okrętu). Program oblicza wielkości stałe: pole powierzchni zwilżonej kadłuba, moc holowania P_h – według wzoru (6), moc użyteczną P_e – według wzoru (7), współczynnik smukłości kadłuba, powierzchnię poprzeczną rzutu nadwodnej części kadłuba, współczynnik oporu powietrza dla nadbudówek opływowych, kąt pomiędzy kierunkiem wiatru i kursem okrętu oraz inne zależności:

- przelicznik prędkości v [m/s] = $0,5145 \cdot v$ [w],
- liczba Reynoldsa $Re = v \cdot L / \nu$ gdzie: $\nu = 1,18 \cdot 10^{-6}$ [m²/s],
- liczba Froude'a $Fn = v \cdot (g \cdot L)^{-0,5}$,
- współczynnik tarcia płyty $c_{Fo} = 0,075 / (\lg Re - 2)^2$,
- współczynnik tarcia kadłuba okrętu $c_v = (1 + k) \cdot c_{Fo}$,
- opór tarcia kadłuba okrętu $R_v = c_v \cdot \rho \cdot \Omega \cdot v^2 / 2$ [kN],
- gęstość wody morskiej $\rho = 1026$ [kg·m⁻³],
- współczynnik korygujący $k_1 = c_w / c_v = c_1 \cdot (Fn)^{4,2} \cdot (L/L_o)^{0,3}$,
- skorygowany opór tarcia kadłuba okrętu $R_o = [k_1 (v/v_n)^6 + (v/v_n)^{1,8}] \cdot R_v$ [kN],
- dodatkowy opór uwzględniający konstrukcyjną chropowatość powierzchni kadłuba okrętu $\Delta R_F = \Delta c_F \cdot \Omega \cdot v^2 / 2$ [kN] gdzie: $\Delta c_F = 0,4 \cdot 10^{-3}$,
- opór części nawodnej okrętu $R_p = c_p \cdot \rho_{pow} \cdot A_p \cdot \cos \varphi \cdot v^2$ [kN],
- gęstość powietrza $\rho_{pow} = 1,2$ [kg·m⁻³],
- współczynnik porośnięcia kadłuba R_{por}

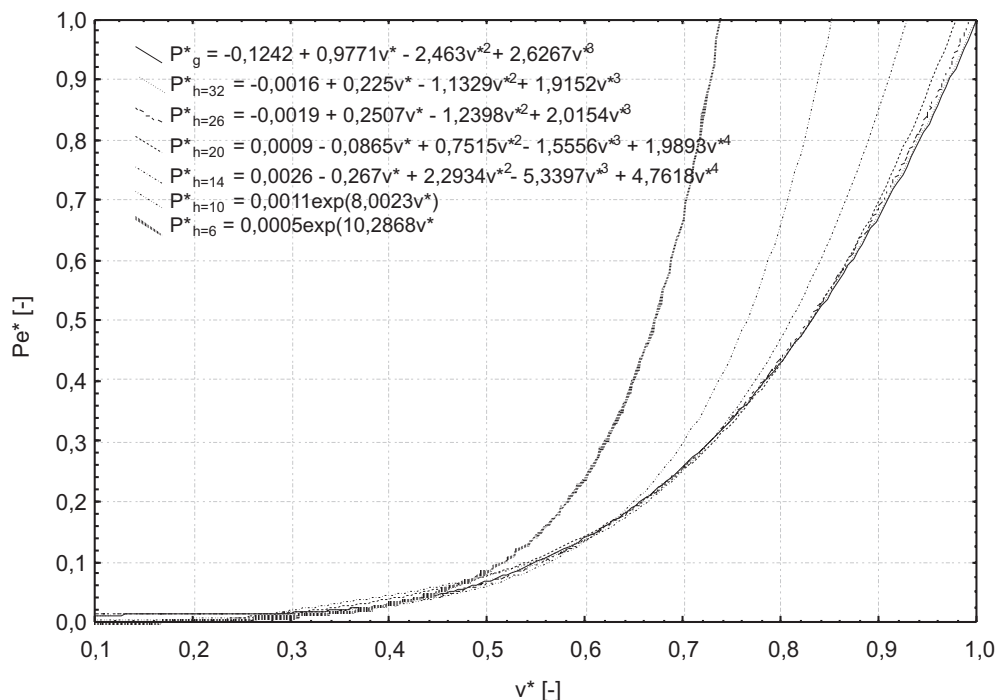
- opór całkowity okrętu $R = (1 + R_{\text{por}}) \cdot (R_o + \Delta R_F) + R_p$ [kN],
- moc efektywna $P_{e(w)} = 1,56 \cdot R \cdot v$ [kW].

Obliczone z użyciem programu Power dla około 3500 jednostek identyfikowanych przez system AIS [9] wartości oporu względnego R^* oraz mocy użytecznej silnika P_e^* , w zależności od początkowych wartości prędkości (na wodzie głębokiej) v_g oraz zmienionych wartości na wodzie płytkiej, wyznaczają charakterystyki oporową oraz mocy silnika (pęki krzywych) w rzeczywistych warunkach użytkowania jednostki na ograniczonej i nieograniczonej głębokości akwenu pływania, które przedstawiono na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Uśrednione charakterystyki oporowe (w wartościach względnych) w rzeczywistych warunkach pływania okrętu na akwenach o różnej głębokości wody

Fig. 1. Averaged resistance characteristics (in relative value) in real conditions of the ship navigation by changes in depth of water area



Rys. 2. Uśredniona zależność mocy silnika napędu głównego okrętu od prędkości pływania na akwenach o różnej głębokości wody (wartości względne)

Fig. 2. Average of dependence of relative effective power of main engine on relative vessel speed on areas of varying water depth (relative value)

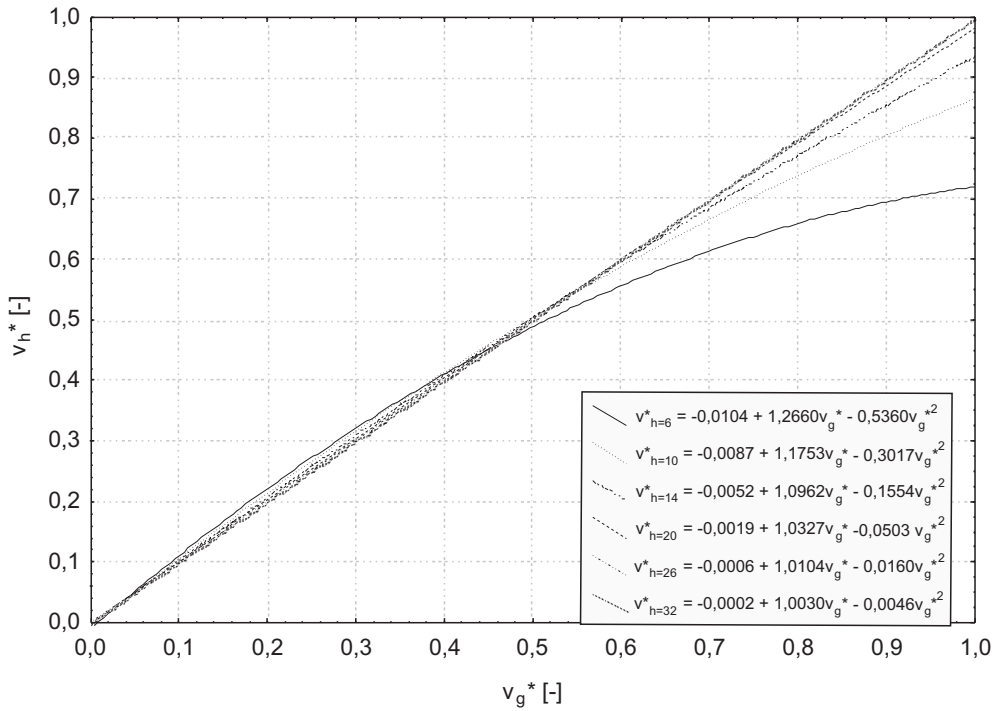
Z charakterystyk tych wynika, że istotne zmiany oporu oraz mocy silnika występują przy zmniejszonej głębokości akwenu do $h \leq 20$ m (są coraz większe wraz ze zmniejszaniem się głębokości wody).

Na rys. 3 pokazano zmiany (spadek) prędkości w następstwie wplynięcia jednostki na akwen o ograniczonej głębokości wody.

Zależność mocy silnika głównego od oporu jednostki pływającej $P_e^* = f(R^*)$, przedstawiono na rys. 4.

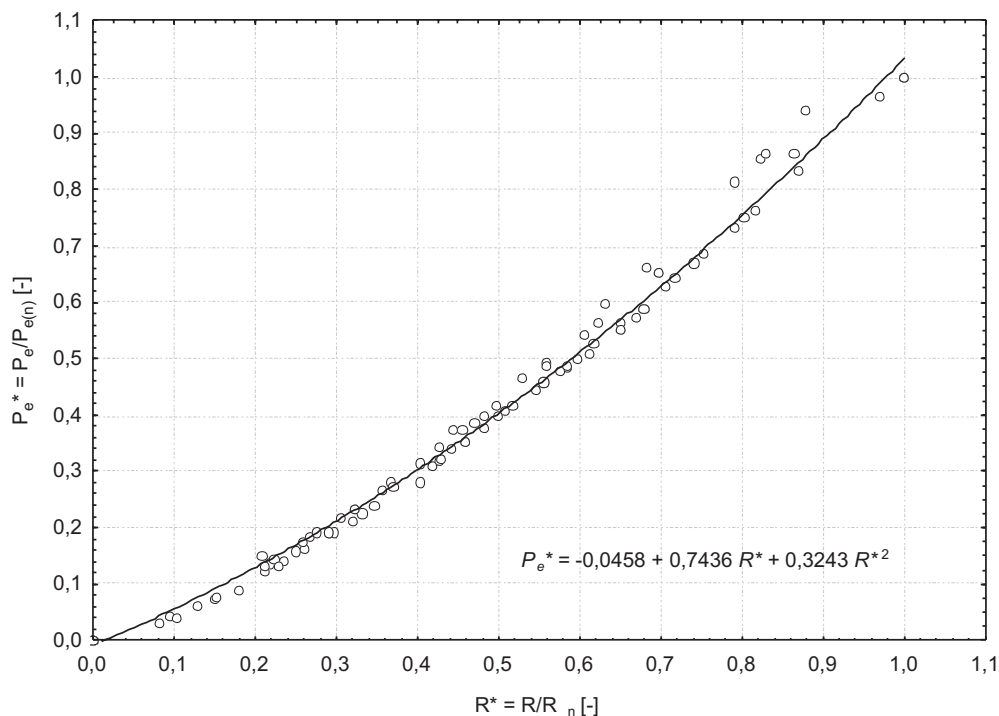
Szczególną cechą tej charakterystyki jest to, że nie ulega ona zmianie pod wpływem oddziaływania warunków zewnętrznych pływania statku i wykorzystania okrętowego układu napędowego. Przy niezmiennym stanie technicznym elementów układu napędowego położenie tej charakterystyki nie zmienia się po zmianie oporu (zmianie warunków zewnętrznych pływania i wykorzystania) jednostki pływającej. Właściwość ta wynika stąd, że zmiana warunków pracy układu napędowego pod wpływem warunków zewnętrznych w sposób ciągły pociąga za sobą również w sposób ciągły zmianę:

- prędkości pływania jednostki,
- użytecznej mocy holowania silnika napędowego.



Rys. 3. Zależność prędkości okrętu na wodzie płytkiej od prędkości początkowej na wodzie głębokiej dla różnych głębokości akwenu

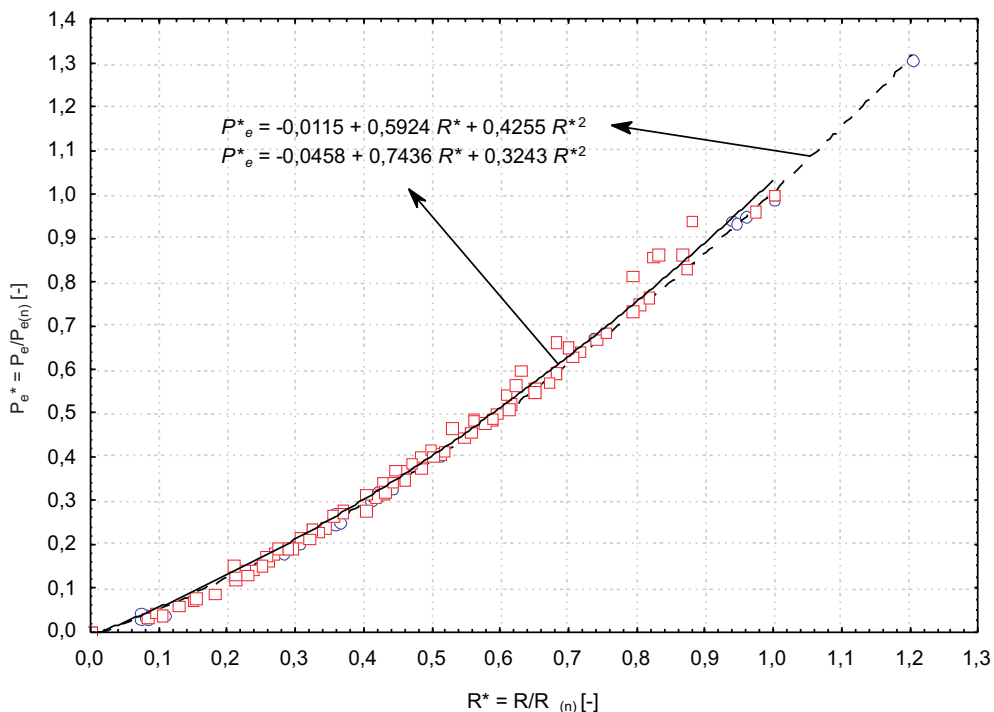
Fig. 3. Dependence of the ship's speed in shallow water from the initial speed on the water depth for different depths of the water area



Rys. 4. Uśredniona charakterystyka obciążeniowa głównego silnika napędowego, R^* – opór względny, P_e^* – moc względna

Fig. 4. Average of load characteristic of main engine, R^* – relative resistance, P_e^* – relative effective power

Niezmienność tej charakterystyki potwierdzają wykresy zamieszczone na rys. 5, które wyznaczone zostały na podstawie charakterystyk standardowych oraz na podstawie charakterystyk opisujących pracę silnika napędowego w innych warunkach użytkowania. Aktualną wartość mocy użytecznej P_e , jako podstawowej składowej określającej charakterystykę emisji toksycznych składników spalin silnika napędu śrubowego o znanej mocy nominalnej $P_{e(n)}$, podczas pływania z prędkością v na akwenu o różnej znanej głębokości pływania h [m], można wyznaczyć na podstawie zależności aproksymowanych zamieszczonych na rys. 1, 2 i 4.



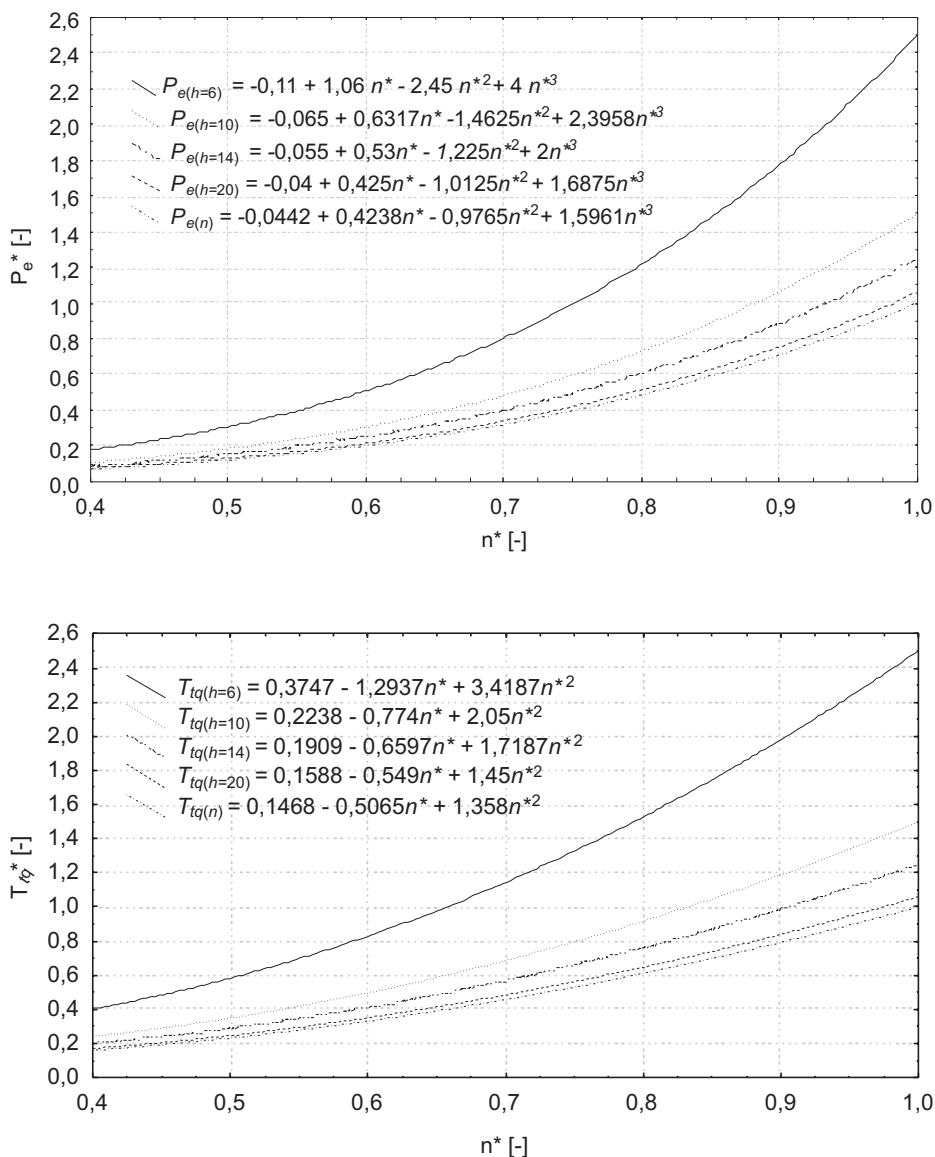
Rys. 5. Charakterystyki obciążeniowe silnika podczas pływania okrętu w normalnych (linia przerywana) i pogorszonych (linia ciągła) warunkach zewnętrznych

Fig. 5. Load characteristics of main engine during navigate of the ship in standard (dashed line) and deteriorate (solid line) external conditions

4. Określanie charakterystyk emisji toksycznych składników spalin

Na podstawie wyznaczonych analitycznie uśrednionych charakterystyk oporowych i wynikającego z nich zapotrzebowania mocy silnika napędowego można określić charakterystyki śrubowe mocy silnika okrętu pływającego na akwenach o różnej głębokości (rys. 6).

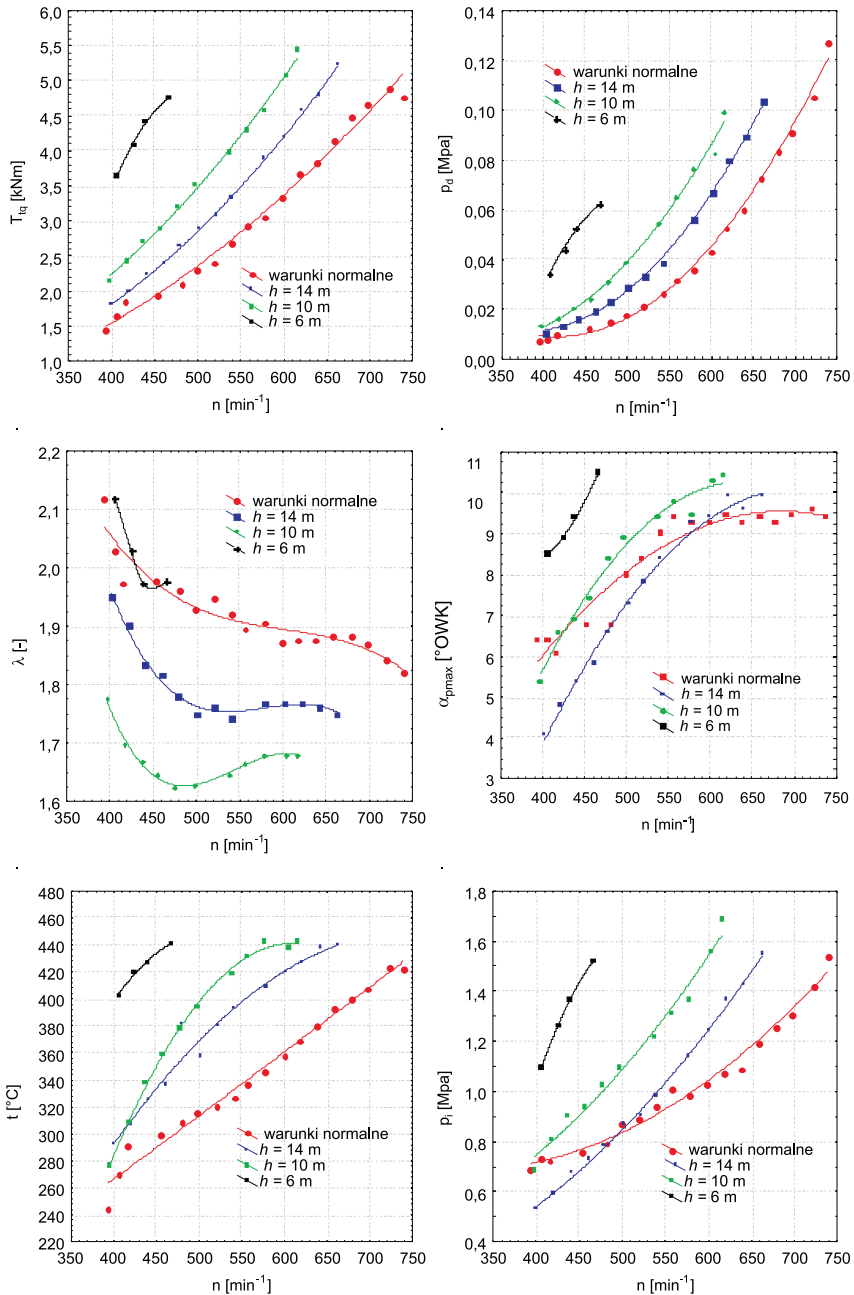
Na podstawie tych charakterystyk opracowano program badań na stanowisku hamowniowym silnika Sulzer typu 6AL20/24 ($P_{en} = 420 \text{ kW}$, $n_n = 750 \text{ min}^{-1}$). Celem tych badań było wyznaczenie charakterystyk śrubowych emisji toksycznych składników spalin w zadawanych warunkach obciążeń – odpowiednio do opracowanych charakterystyk śrubowych mocy i momentu obrotowego dla różnych głębokości akwenu morskiego, na którym pływa okręt o mocy napędu równej mocy badanego silnika.



Rys. 6. Charakterystyka śrubowa mocy P_e^* (a) i momentu obrotowego T_{tq} (b) silnika dla normalnych i małych głębokości akwenu

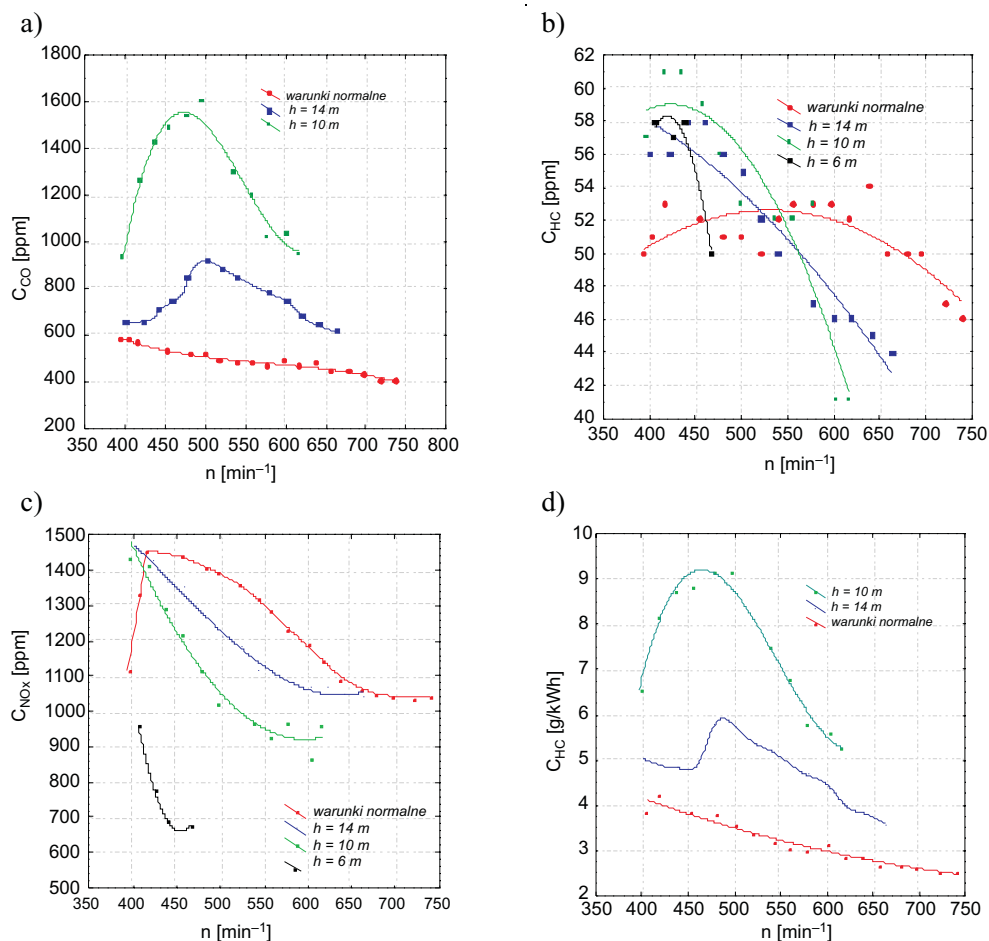
Fig. 6. Screw characteristic of power P_e^* (a) and torque T_{tq} (b) of the engine in standard and low depth of water area

Na rys. 7 przedstawiono charakterystyki śrubowe wybranych parametrów pracy badanego silnika w zadawanych warunkach pracy, odpowiadających charakterystyce oporowej dla różnych głębokości akwenu pływania okrętu, a na rys. 8 i 9 uzyskane wyniki tych badań: charakterystyki stężeń, natężenia i jednostkowej emisji toksycznych składników spalin.



Rys. 7. Charakterystyki śrubowe wybranych parametrów pracy silnika Sulzer typu 6AL20/24 w stanach pracy odpowiadających różnym głębokościom pływania okrętu – h

Fig. 7. Screw characteristics of selected parameters of engine Sulzer 6AL20/24 in condition of work by different depth of water area – h

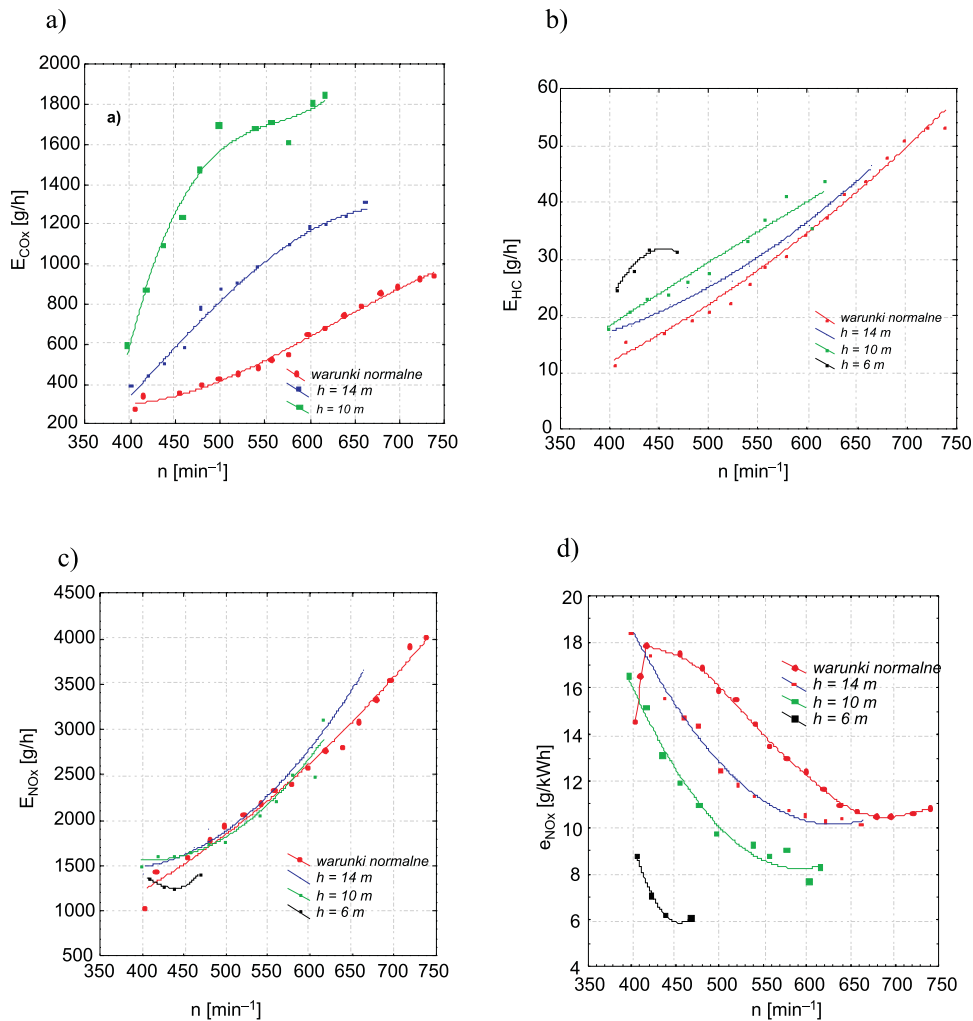


Rys. 8. Charakterystyki śrubowe stężeń CO, HC, NO_x (a, b, c) oraz emisji jednostkowej CO (d) dla różnych głębokości akwenu – h

Fig. 8. Screw characteristics of concentrations CO, HC, NO_x (a, b, c) and brake specific emissions CO (d) by changes in depth of water area – h

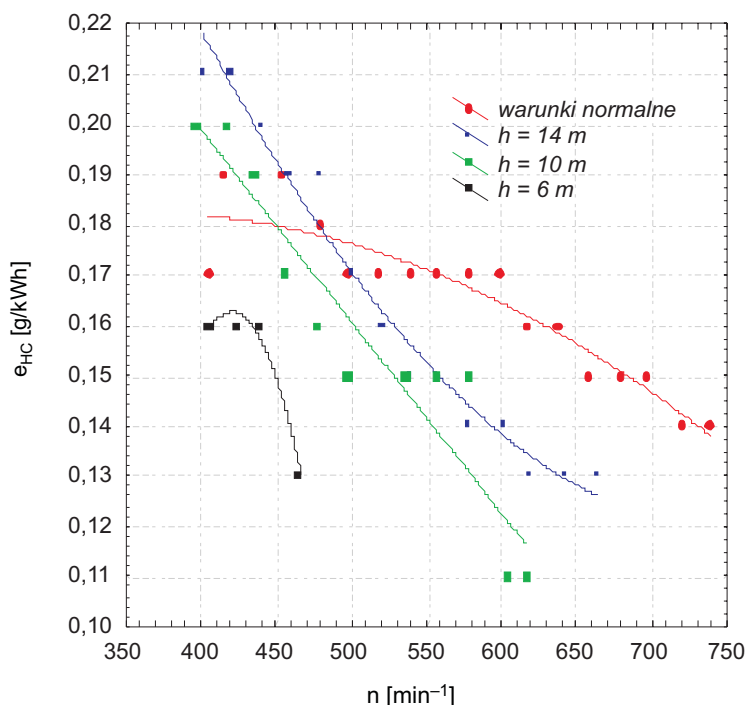
Z wykresów na rys. 7–10 wynika, że w następstwie pływania okrętu w pogorszonych warunkach spowodowanych zmniejszeniem głębokości akwenu (rys. 7 – wykres T_{iq}), występuje znaczny wzrost stężenia tlenu węgla w spalinach, a charakterystyka śrubowa stężenia CO zmienia przebieg na krzywą z wyraźnie zaznaczonym ekstremum (rys. 8a). Początkowo, wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej silnika, występuje zwiększenie się stężenia CO, które uzyskuje maksymalną wartość przy $n \cong 500$ min⁻¹, a następnie, mimo dalej zwiększającego się obciążenia, maleje i stabilizuje się na znacznie niższym poziomie. W punktach ekstremalnych stężenie CO zwiększa się blisko dwukrotnie podczas pływania na akwenu o głębokości $h = 14$ m i o ponad 3-krotnie na akwenu o głębokości $h = 6$ m w stosunku do stężenia podczas pracy w normalnych warunkach pływania okrętu – na akwenu o dużej

głębokości. Oprócz niekorzystnych warunków przygotowania procesu spalania (tworzenia jednorodnej mieszanki przy zwiększonej dawce paliwa) przyczyną początkowego zwiększenia się stężenia CO do wartości maksymalnej jest zmniejszający się współczynnik nadmiaru powietrza λ do wartości minimalnej przy $n \cong 500 \text{ min}^{-1}$ (rys. 7).



Rys. 9. Charakterystyki śrubowe natężenia emisji CO i NO_x (a, b, c) oraz emisji jednostkowej NO_x (d) dla różnych głębokości akwenu – h

Fig. 9. Screw characteristics of emission intensity CO, HC, NO_x (a, b, c) and brake specific emissions of NO_x (d) by changes in depth of water area – h



Rys. 10. Charakterystyki śrubowe emisji jednostkowej NO_x dla okrętu pływającego na akwenach o różnej głębokości – h

Fig. 10. Screw characteristics of brake specific emissions of NO_x for the ship navigate by changes in depth of water area – h

Zmniejszanie się stężenia CO po przekroczeniu prędkości obrotowej silnika $n = 500 \text{ min}^{-1}$, mimo dalszego zwiększania obciążenia, jest skutkiem użytecznego oddziaływania układu doładowania – następuje usprawnienie procesu roboczego przy stabilizacji wartości współczynnika λ na nieco wyższym poziomie. Należy jednak zauważyć, że stężenie CO zmniejsza się wtedy do wyższych wartości w porównaniu z charakterystyką śrubową normalną, które są zbliżone do wartości początkowych przy $n = 400 \text{ min}^{-1}$. Ogólnie można przyjąć, że duży wpływ na stężenie CO ma w tym przypadku układ doładowania, który praktycznie nie oddziałuje na przebieg procesu roboczego silnika przy jego prędkości obrotowej $n \leq 500 \text{ min}^{-1}$ – wg charakterystyki śrubowej. Należy również przyjąć, że bardzo niekorzystne warunki procesu roboczego silnika występują w skrajnie ciężkich warunkach, odpowiadających pływaniu okrętu na akwenie o głębokości $h = 6 \text{ m}$, dla których nie zdołano dokonać pomiaru stężenia CO ze względu na znaczne przekroczenie skali urządzenia pomiarowego (stacjonarny analizator „Horiba” serii 9000).

Zmiany stężenia węglowodorów w całym zakresie programu badań laboratoryjnych są bardzo małe i wynoszą $\Delta C_{\text{HC}} \cong 20 \text{ ppm}$ (rys. 8b). Rozważane pogorszenie warunków pracy silnika spowodowało wzrost stężenia HC od około 50 ppm do 60 ppm (około 8%), pomimo nieznacznych zmian wartości stężenia HC. Począwszy od prędkości obrotowej silnika $n = 500 \text{ min}^{-1}$, dostrzegalne jest zmniejszenie stężenia HC w pogorszonych warunkach pły-

wania okrętu w stosunku do normalnej charakterystyki śrubowej. Podobnie do charakterystyki śrubowej stężenia CO, wraz z pogorszeniem warunków zewnętrznych (rys. 7 – wykres T_{iq}) stężenie tlenków azotu C_{NOx} (rys. 8c) ulega znacznym zmianom, które dotyczą zarówno przebiegu charakterystyki śrubowej w normalnych, jak i pogorszonych (głębokością akwenu) warunkach pływania okrętu. Wypukła krzywa śrubowa (z wyraźnym ekstremum), odpowiadająca normalnym warunkom użytkowania okrętu, zmienia się tu jednak na krzywe o postaci wklęsłej bez widocznych punktów ekstremalnych. Przebieg charakterystyki śrubowej stężenia NO_x w normalnych warunkach pracy silnika znacznie odbiega od pozostałych charakterystyk. Zgodnie z tą charakterystyką stężenie NO_x , począwszy od minimalnej prędkości obrotowej, gwałtownie zwiększa się i w punkcie ekstremalnym – niewiele przekraczającym prędkość minimalną ($n \cong 430 \text{ min}^{-1}$) – uzyskuje wartość maksymalną $C_{NOx(max)} = 1460 \text{ p.p.m.}$, a następnie wraz ze zmniejszaniem prędkości obrotowej silnika maleje, a począwszy od $n \cong 650 \text{ min}^{-1}$, stabilizuje się na poziomie $C_{NOx} \cong 1040 \text{ ppm}$, któremu odpowiada ciśnienie doładowania $p_d > 0,06 \text{ MPa}$ i $\lambda \cong 1,85$ (rys. 7 – wykresy p_d, λ). Charakterystyki śrubowe odpowiadające użytkowaniu silnika w cięższych warunkach (mniejszej głębokości akwenu), wykazują maksymalne wartości stężenia NO_x dla obciążenia, odpowiadających głębokości pływania $h = 14 \text{ m}$ i $h = 10 \text{ m}$ są w przybliżeniu jednakowe – wynoszące $C_{NOx} \cong 1040 \text{ ppm}$, oraz są równe stężeniu w ekstremum minimalnym charakterystyki śrubowej normalnej. Pewnym zaskoczeniem może być tu położenie krzywych śrubowych C_{NOx} w pogorszonych warunkach pływania okrętu. Z wykresów wynika, że wraz ze zwiększeniem się oporu pływania w całym zakresie pracy silnika maleje stężenie tlenków azotu mimo zwiększonego obciążenia i średniej temperatury spalin wylotowych z cylindrów (rys. 7 – wykresy T_{iq}, t). O takim przebiegu charakterystyki śrubowej stężenia NO_x w pogorszonych warunkach pływania decydują głównie warunki procesu spalania w cylindrach, które przyczyniają się do wzrostu stężenia CO i jednocześnie zmniejszenia stężenia NO_x w spalinach wylotowych silnika.

Charakterystyki śrubowe emisji jednostkowej analizowanych związków toksycznych (e_{CO}, e_{HC}, e_{NOx} – rys. 8d, 9d, 10) oraz natężenia emisji (E_{CO}, E_{HC}, E_{NOx} – rys. 9a, b, c) są charakterystykami obliczeniowymi na podstawie bezpośrednio mierzonych wartości stężenia związków toksycznych, strumieni powietrza i paliwa zasilających silnik, momentu obrotowego i prędkości obrotowej w poszczególnych punktach programu badań laboratoryjnych statycznych. Z wyżej wymienionych wykresów wynika, że krzywe śrubowe emisji jednostkowej e_{CO}, e_{HC}, e_{NOx} mają podobne przebiegi do krzywych śrubowych stężenia odpowiednio C_{CO}, C_{HC}, C_{NOx} , natomiast charakterystyki natężenia emisji E_{HC} i E_{NOx} dla rozważanych warunków pływania okrętu są podobne do charakterystyki śrubowej mocy użytecznej silnika. Wyjątek stanowi tu natężenie emisji E_{CO} , którego charakterystyka śrubowa kształtem odbiega od tej reguły.

5. Wnioski

Z zamieszczonego opisu metody wyznaczania charakterystyk emisji toksycznych składników spalin silników okrętowych oraz przykładów takich charakterystyk wyznaczonych dla wybranego silnika, który odpowiada jednostce napędowej niewielkiego okrętu, wynika, że właściwości ekologiczne (ze względu na emisję zanieczyszczeń) okrętowych silników spalinowych są silnie zależne od warunków spowodowanych zmianą głębokości akwenu pływania okrętu i związanego z tym stanu ich pracy.

Opisany model pracy okrętowego silnika spalinowego, zawierający wzajemne relacje charakterystyki oporowej oraz charakterystyk śrubowych momentu, mocy, stężeń toksycznych składników w spalinach, natężeń i emisji jednostkowej tych składników, pozwala wyznaczać nieznane charakterystyki emisji zanieczyszczeń dowolnych statków morskich.

Najczęściej wykorzystywane są charakterystyki statyczne, które są łatwiejsze do uzyskania i w świetle obecnych wymagań w żegludze wystarczające.

Autorzy podali przykłady takich charakterystyk dla silników okrętowych wyznaczonych na podstawie identyfikacji charakterystyk oporowych dużej liczby statków, uzyskane na podstawie zapisów systemu AIS.

Literatura

- [1] Dudziak J., *Teoria okrętu*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 2008.
- [2] Pawłowski M., *Opór okrętu. Raport Techniczny Nr 58*, Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2010.
- [3] Merkisz J., Piaseczny L., *Statyczne warunki użytkowania okrętowych silników spalinowych*, „Logistyka” Nr 4/2010, 20-28.
- [4] Kniaziewicz T., Piaseczny L., *Modeling of Ecological Characteristics of Marine Main Propulsion Diesel Engines*, „Combustion Engines” No. 3/2011.
- [5] Wojnowski W., *Okrętowe silownie spalinowe*. Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1991.
- [6] Kulczyk J., Winter J., *Śródlądowy transport wodny*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [7] Wroblewska L.N., Sirotina G.N., *Opriedielenije moszcznosti energiczeskoj 16 stanowi w naczalnoj stadii projektowanija gruzowych sudow wnutrienniego i smieszanogo plawanija*, „Trudy GIIWT” nr 144, 1975.
- [8] *Metody wyznaczenia statycznych i dynamicznych charakterystyk emisji związków toksycznych z silników spalinowych statków morskich*, sprawozdanie z I etapu realizacji projektu badawczego nr N N509 572839, AMW, Gdynia 2011.