

Tomasz Kniaziewicz
Leszek Piaseczny
Akademia Marynarki Wojennej

IDENTYFIKACJA OBCIĄŻENIA OKRĘTOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH W ASPEKTCIE OCENY EMISJI TOKSYCZNYCH SKŁADNIKÓW SPALIN

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono metodykę identyfikacji obciążenia silników okrętowych celem jej wykorzystania do oceny emisji związków toksycznych zawartych w spalinach. Opisano zakres niezbędnych prac analitycznych do określania charakterystyk oporowych okrętów, charakterystyk obciążeniowej, śrubowej, prędkości pływania oraz parametrów ruchu okrętu. Podano przykłady rzeczywistych charakterystyk jednostek o kadłubie wypornościowym określonych w toku własnych badań ruchu około 3500 jednostek. Przedstawiono sposoby uwzględniania rzeczywistych warunków pracy okrętowego układu napędowego podczas pływania jednostki na akwencie o małej głębokości wody, w sztormie oraz po zmianie zanurzenia.

Słowa kluczowe:

emisja, jednostki pływające, silniki okrętowe, rzeczywiste warunki pracy.

WSTĘP

Podstawowym wskaźnikiem emisji zanieczyszczeń zawartych w spalinach emitowanych przez silnik do atmosfery jest emisja jednostkowa związku toksycznego spalin e_{ZT} [g/kW·h]. Przy znanej charakterystyce śrubowej emisji jednostkowej związku toksycznego $e_{ZT} = f(n)$ o wartości natężenia emisji i -tego związku do atmosfery decyduje wartość mocy odpowiadająca aktualnemu obciążeniu układu napędowego, przy określonej prędkości obrotowej, zgodnie z zależnością:

$$E_{ZT_i} = e_{ZT_i} \cdot P_{e_i} \left[\frac{g}{h} \right], \quad (1)$$

gdzie:

$e_{ZT_i} = f(n, WZ_i = idem)$ — emisja jednostkowa związku toksycznego (ZT);

$P_{e_i} = f(n, WZ_i = idem)$ — moc silnika;

n — prędkość obrotowa silnika;

WZ — warunki zewnętrzne.

Najbardziej istotnym zadaniem z zakresu wyznaczania charakterystyk toksyczności silników spalinowych jest opis rzeczywistego procesu ich obciążeń. W porównaniu z silnikami stosowanymi w trakcji drogowej, powietrznej oraz w napędach innych urządzeń specjalnych, warunki użytkowania okrętowych silników napędu głównego są specyficzne, kształtowane przez charakterystyki oporowe jednostki pływającej i charakterystyki pędników okrętowych. Na obecnym etapie (i przypuszczalnie w najbliższym okresie rozwoju transportu morskiego) warunki te odpowiadają powszechnie użytkowanym jednostkom pływającym o kadłubach wypornościowych oraz klasycznym rozwiązaniom śrub napędowych o stałym skoku.

Warunki pracy silnika i jego emisji zanieczyszczeń w spalinach są w dużej mierze kształtowane także przez tak zwane warunki zewnętrzne, spośród których, ze względu na znaczący wpływ na opór kadłuba, należy wyróżnić pływanie na akwenach ograniczonych (o ograniczonej głębokości wody i w kanałach), pływanie w sztormie, zmiany zanurzenia kadłuba (np. w wyniku zwiększenia załadunku, zmian w balastowaniu zbiorników i przestrzeni ładunkowych czy zmian gęstości wody), zmiany rozmiarów części wystających oraz chropowatości kadłuba w następstwie jego porostania i korozji. Rzeczywiste warunki i procesy użytkowania jednostek pływających, niezależnie od zadanych nastaw sterowania układem napędowym, mogą być zarówno statyczne, jak i dynamiczne, ze względu na przebiegi procesów zmian parametrów układu napędowego oraz (w konsekwencji) mocy i związanej w tym emisji zanieczyszczeń z silników napędowych. Na warunki pracy silnika i emisję zanieczyszczeń mają wpływ również zadane przez załogę zmiany ruchu jednostki pływającej (ruszanie z miejsca, przyspieszanie, hamowanie).

Charakterystyki tej emisji, jako zależności funkcyjne opisujące zjawiska związane z obciążeniem okrętowego układu napędu głównego, mają charakter wyłącznie empiryczny. W powszechnie stosowanych metodach wyznaczania charakterystyk emisji związków toksycznych przez silniki spalinowe podstawę stanowią testy toksyczności wyznaczone na podstawie empirycznych badań w rzeczywistych warunkach ich użytkowania. Dokładność szacowania emisji zależy więc od dokładności odwzorowania stosowanymi testami rzeczywistych warunków użytkowania silników opisanych zwykle parametrami ich obciążenia. W odniesieniu do okrętowych silników głównych, zgodnie z normą ISO 8178, istniejące tego typu testy opierają się

na teoretycznej charakterystyce śrubowej $P_e = a \cdot n_3$ i służą w zasadzie do wyznaczenia emisji jednostkowej związków toksycznych podczas fabrycznych badań hamowniowych. Na podstawie tych testów nie można jednak wyznaczyć emisji związków toksycznych w rzeczywistych warunkach ich użytkowania.

ZAŁOŻENIA OPISU WARUNKÓW DETERMINUJĄCYCH OBCIĄŻENIE SILNIKÓW

Ze względu na rozważany problem oraz dostępność niezbędnych danych uznano, że zmiany emisji związków toksycznych w następstwie zmiany zewnętrznych warunków pracy układu ruchowego okrętu są konsekwencją w każdym przypadku zmiany użytecznej mocy zapotrzebowanej przez zmieniony opór kadłuba, co oznacza, że mogą być określone w sposób przybliżony na podstawie następującego zestawu aproksymowanych zależności i wzorów (1–7):

- charakterystyki oporowej kadłuba uwzględniającej
 - wpływ głębokości drogi wodnej na opór kadłuba,
 - dodatkowe opory podczas sztormu od wiatru oraz fali,
 - zmianę zanurzenia kadłuba,
 - zmianę chropowatości kadłuba;
- charakterystyki mocy w zależności od prędkości okrętu;
- charakterystyki obciążeniowej;
- charakterystyki śrubowej mocy silników napędu głównego;
- parametrów układu ruchowego w nominalnych oraz przejściowych warunkach obciążenia (podczas ruszania z miejsca, przyspieszania i hamowania okrętu — czasu t i drogi S).

Dla wyznaczenia analitycznych związków aproksymujących opór i jego składowe w zależności od parametrów kadłuba i ruchu jednostki, a w konsekwencji również charakterystyk emisji, w istniejących aktualnie warunkach zewnętrznych pływania należy dysponować następującymi danymi:

- zależnością wysokości fali i prędkości jej przemieszczania od prędkości wiatru;
- udziałem składowych oporów od wiatru i fali;
- oporem względnym nadwodnej zabudowy kadłuba;
- charakterystyką fali na wodzie głębokiej i ograniczonej;
- danymi o parametrach kadłubów i układów napędowych oraz aktualnymi danymi dotyczącymi ruchu i zmian parametrów jednostek pływających;
- aktualnymi danymi meteorologicznymi.

W przypadku rozważanych zagadnień najwygodniejszymi parametrami charakteryzującymi stan obciążenia silników napędu głównego jest ich moc odpowiadająca prędkości jednostki pływającej $P_e = f(v)$ w określonych warunkach zewnętrznych użytkowania, których występowanie ma często charakter przypadkowy (np. zmiana siły wiatru i stanu morza, w tym zmiana kierunku wiatru lub kursu okrętu). Zmiana zewnętrznych warunków pływania w konsekwencji ma wpływ na pracę układu napędowego, zarówno o charakterze dynamicznym, jak i statycznym.

RZECZYWISTE OBCIĄŻENIA OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Podział i klasyfikacja rzeczywistego stanu ruchu jednostki pływającej są trudne i zależą od dokładności prowadzonej analizy oraz przyjętych kryteriów oceny istniejących warunków żeglugi. Przemieszczanie się jednostki, z przyjmowaną zwykle ustaloną średnią prędkością, w istocie charakteryzuje się także dynamiką wynikającą ze zmieniających się warunków zewnętrznych pływania oddziałujących w sposób istotny na przebieg charakterystyki oporowej, a tym samym wymagających zmiany siły napędzającej (mocy silników głównych) przy danej prędkości pływania.

W świetle powyższych rozważań oraz analizy rzeczywistych warunków obciążeń okrętowych układów napędowych można przyjąć, że silniki napędu głównego mogą pracować zasadniczo w trzech różnych umownie zdefiniowanych warunkach obciążeń:

1. Typowo projektowych (standardowych), odpowiadających wykorzystaniu jednostki pływającej przy normalnych wartościach oporu całkowitego kadłuba (chropowatość kadłuba oraz stan załadowania jednostki nie ulegają zmianie i odpowiadają warunkom projektowym, pływanie przy stanie morza do 3 °B na nieograniczonym akwenu morskim). Właściwości okrętowego układu napędowego w tych warunkach można opisać charakterystykami:

$$\begin{aligned}
 R &= f(v) & WZ &= idem; \\
 P_e &= f(v) & WZ &= idem & (2) \\
 P_e &= f(R) & WZ &= var; \\
 P_e &= f(n) & WZ &= idem,
 \end{aligned}$$

gdzie:

R, v — opór całkowity i prędkość jednostki pływającej;

P_e, n — odpowiednio moc użyteczna i prędkość obrotowa silnika napędowego.

2. *Rzeczywistych*, które są następstwem zmienionych warunków zewnętrznych. Właściwości układu napędowego można opisać bardziej złożonymi charakterystykami uwzględniającymi warunki zewnętrzne $WZ_{i,j}$ (i — liczba typu warunków, j — liczność przedziałów danego typu WZ), dotyczącymi:

- oporu całkowitego jednostki pływającej w zależności od prędkości pływania

$$R_{i,j} = f(v; WZ_{i,j} = idem); \quad (3)$$

- użytecznej mocy zapotrzebowanej (zainstalowanej) od prędkości pływania

$$P_{e(i,j)} = f(v; WZ_{i,j} = idem); \quad (4)$$

- charakterystyki obciążeniowej silnika napędowego

$$P_e = f(R; WZ = var); \quad (5)$$

- charakterystyki śrubowej silnika napędowego

$$P_{e(i,j)} = f(n; WZ_{i,j} = idem). \quad (6)$$

3. *Dynamicznych*, podczas których w określonym czasie następuje zmiana parametrów pracy układu napędowego w następstwie jego sterowania, jak i samoistnego oddziaływania warunków zewnętrznych. Typowe warunki o charakterze dynamicznym występują podczas zadanych przez operatora zmian parametrów ruchu jednostki pływającej (ruszania z miejsca, przyspieszania, zmian prędkości, hamowania aktywnego) oraz podczas nagłych zmian warunków zewnętrznych (np. głębokości akwenu pływania, kierunku ruchu jednostki, zwłaszcza podczas sztormu, itp.).

STANDARDOWE WARUNKI PRACY OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Podstawowa charakterystyka opisująca warunki pracy silnika głównego w okrętowym układzie napędowym wynika z charakterystyki oporowej jednostki pływającej oraz charakterystyki śruby napędowej. Obydwa rodzaje charakterystyk wyznacza się w fazie projektowania doświadczalnie podczas badań modelowych. Stopień zgodności z rzeczywistością tak sporządzonej charakterystyki zależy więc od dokładności odwzorowania rzeczywistego obiektu w modelu oraz warunków realizowanych pomiarów i obliczeń. Wykonane w ten sposób charakterystyki mogą być obciążone znacznymi błędami w stosunku do rzeczywistych warunków użytkowania silników w okrętowym układzie napędowym. Z wymienionych przyczyn i innych względów najczęściej w praktyce wykorzystywane są metody obliczeniowe charakterystyk oporowych opracowane 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 [4]. W metodzie tej opór całkowity kadłuba okrętu, wyrażony w [N], opisuje zależność w postaci:

$$R = g \left\{ 0,17 \cdot \Omega \cdot v^{1,825} + 1,45 \left(24 - \frac{L}{B} \right) \cdot \delta^{\frac{5}{2}} \cdot \frac{D}{L^2} \cdot v^4 \right\}, \quad (7)$$

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.

Wyznaczona w ten sposób charakterystyka oporowa pozwala na obliczenie charakterystyki mocy holowania jednostki oraz zapotrzebowanej mocy użytecznej silnika napędowego z zależności o ogólnych postaciach:

$$P_h = R \cdot v; \quad (8)$$

$$P_e = \frac{R \cdot v}{\xi_o \cdot \eta_{LW} \cdot \eta_r}, \quad (9)$$

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 [8] 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 uprości się do postaci:

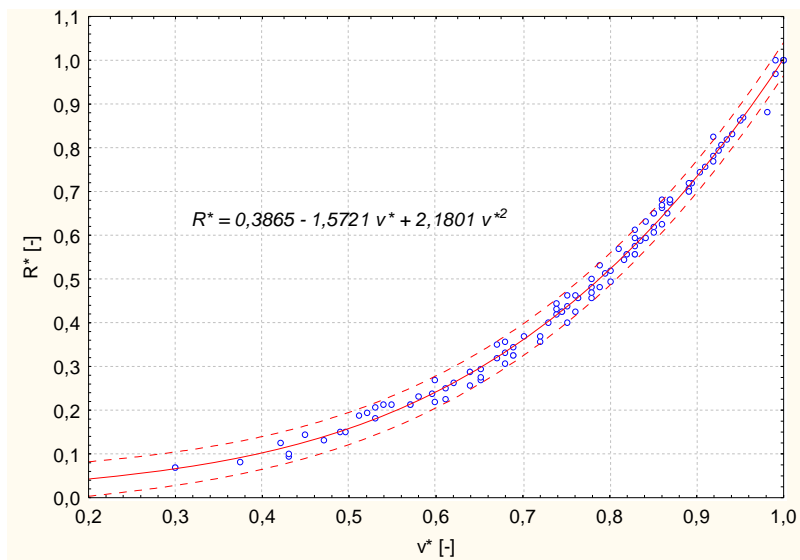
$$P_{e_w} \cong 1,56 \cdot R \cdot v, \quad (10)$$

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:

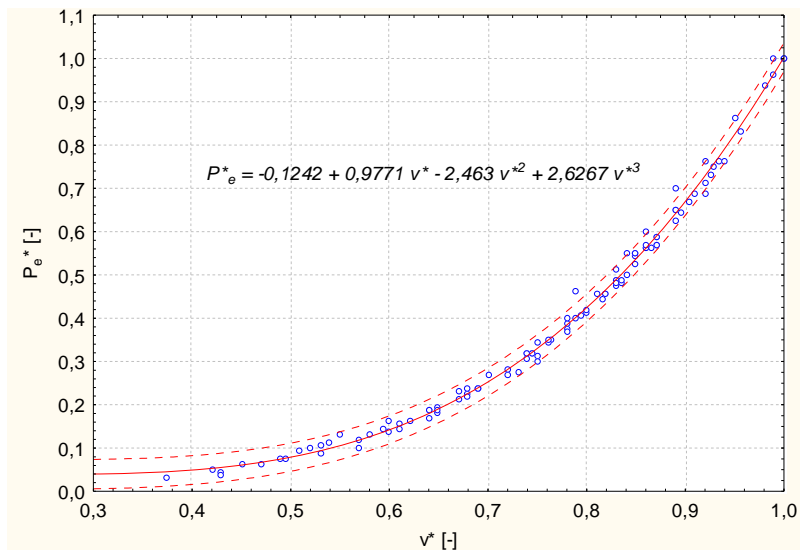
$$P_{e_s} \cong 1,9 \cdot R \cdot v. \quad (11)$$

Standardowe (normalne) warunki użytkowania okrętów o kadłubach wypornościowych opisują charakterystyki przedstawione na rysunku 1. Zostały one wyznaczone w pracy [6] na podstawie danych od wielu lat gromadzonych przez system AIS.

a)



b)



Rys. 1. Standardowa charakterystyka: a) oporowa okrętu o kadłubie wypornościowym, b) zależność mocy użytecznej silnika głównego od prędkości pływania okrętu; R^* — opór względny, P_e^* — moc względna, v — prędkość względna

Źródło: opracowanie własne.

RZECZYWISTE STATYCZNE WARUNKI PRACY OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Zmiany warunków zewnętrznych pływania oddziałują na okręt i w efekcie deformują parametry ruchu okrętu i obciążenia silnika napędowego. Zmiany składowych obciążenia (momentu i prędkości obrotowej) z kolei wpływają w sposób istotny na strukturę oraz emisję związków toksycznych przez silniki główne [6]. Należy stwierdzić, że każda zmiana warunków zewnętrznych wywołuje dynamiczny okres przejściowy warunków pracy silnika głównego okrętu. Okres ten jest stosunkowo krótki i wynika z charakterystyki regulatorowej silnika (w rozwiązaniach współczesnych regulatorów prędkości obrotowej nie powinien przekraczać jednej minuty), co oznacza, że występujące w tym czasie zmiany obciążenia nie mają istotnego wpływu na charakterystykę toksyczności spalin jednostki pływającej. Można przyjąć, że po zmianie warunków zewnętrznych pływania okrętu praca silnika napędu głównego przebiega w zmienionych warunkach zbliżonych do statycznych. W konsekwencji standardowa (projektowa) przedział zmian wokół charakterystyki oporowej $R = f(v)$ ulega znacznemu poszerzeniu, w zależności od rodzaju i liczności uwzględnionych warunków zewnętrznych oraz przyjętych w obliczeniach zakresów ich zmienności. Na przykład w czterech uwzględnionych rodzajach i pięciu zakresach zmienności WZ rzeczywiste podstawowe warunki pracy okrętowego układu napędowego są opisane dwudziestoma krzywymi oporowymi jednostki pływającej.

OGRANICZONA GŁĘBOKOŚĆ WODY

Ograniczona głębokość wody h , wyrażona stosunkiem do zanurzenia okrętu $h/T > 1$, w sposób znaczący wpływa na charakter opływu kadłuba przez wodę i wielkość wszystkich składowych oporów. 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 do piętnastu procent.

Zasadnicze zmiany dotyczą jednak oporu falowego, które są wynikiem zmienionej charakterystyki układu falowego na wodzie płytkiej, gdzie wzrost prędkości okrętu powoduje wzrost długości fal w układzie fal poprzecznych. Wzrasta również kąt pochylenia obwiedni układu tych fal. Sprawia to, że wierzchołki układu fal skośnych zbliżają się do fal poprzecznych. W okolicy dziobu kadłuba tworzy się fala odosobniona przemieszczająca się razem z okrętem. Na rufie powstaje również

fala odosobniona, ale o mniejszej wysokości. Opór falowy osiąga przy tym maksymalną wartość przy prędkości krytycznej:

$$v_{kr} = \sqrt{g \cdot h}, \quad (12)$$

gdzie

g [m/s²] — przyspieszenie ziemskie.

Z opisu matematycznego [4] i analizy charakterystyki układu falowego na wodzie płytkiej wynika, że zasadniczy wpływ na zmianę kształtu generowanego układu falowego ma malejąca prędkość v , z jaką przemieszcza się energia zawarta w falach przy przejściu z wody głębokiej na wodę płytką o głębokości h , co wyraża się relacją:

$$v_h = v \cdot \sqrt{\operatorname{tgh} \cdot \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right)}, \quad (13)$$

gdzie:

v_h [m/s] — prędkość fali na wodzie płytkiej o głębokości h ;

v [m/s] — prędkość fali na wodzie głębokiej;

λ [m] — długość fali;

h [m] — głębokość wody.

Należy przyjąć, że o ile prędkość rozchodzenia się fal na wodzie głębokiej jest równa prędkości okrętu, to po wpłynięciu 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 przy tym przenosi energię z prędkością jej przemieszczania.

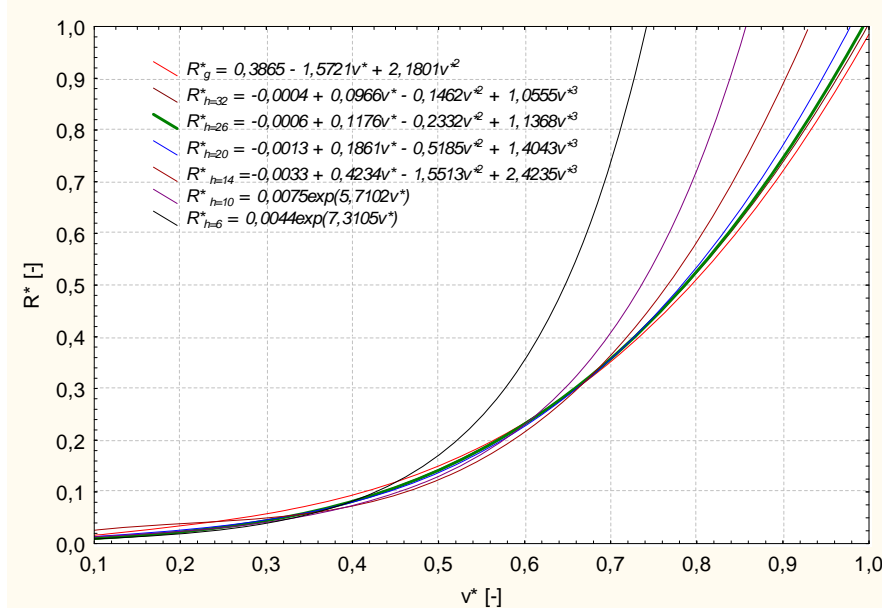
Z danych empirycznych wynika, że przy prędkości pływania mniejszej od $v_h = 0,4 \cdot v_{kr}$ opływ kadłuba praktycznie nie różni się od opływu na wodzie głębokiej i stąd można przyjąć, że i wartość oporu danego okrętu na wodzie płytkiej przy tych prędkościach nie różni się istotnie od oporu na wodzie głębokiej. Przy prędkościach pływania mieszczących się w przedziale $0,4 v_{kr} < v_h \leq 0,75 v_{kr}$ charakterystyka 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 $0,75 v_{kr} < v_h \leq v_{kr}$ 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 prędkościach $v_h > v_{kr}$ fale nie nadążają za okrętem, pozostają w tyle, generowane są jedynie drobne fale skośne, okręt płynie za znacznym udziałem wyporu hydrodynamicznego, a opór całkowity po przekroczeniu prędkości krytycznej zmniejsza się.

Powyższe dane wskazują, że do wyznaczenia oporu okrętu na akwenach o małych 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:

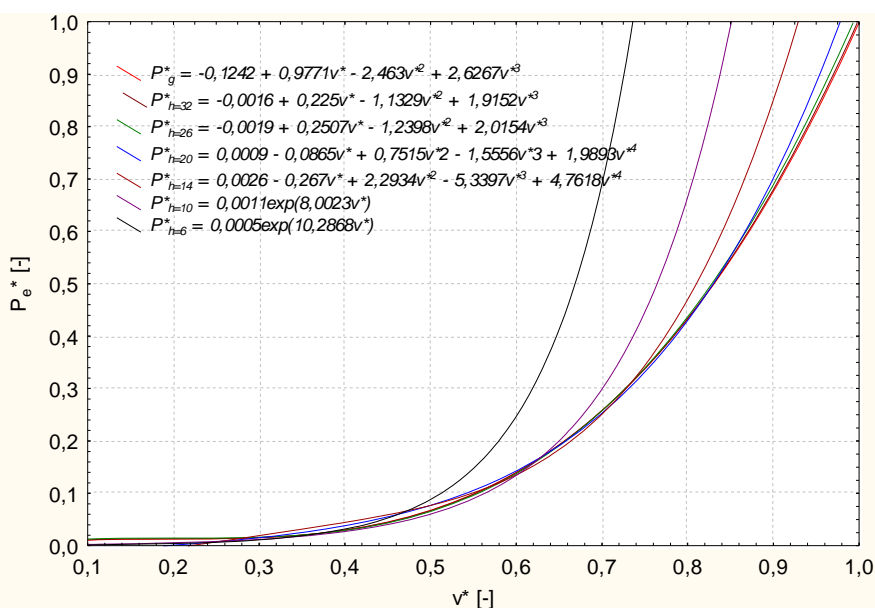
$$v_h = v \cdot \sqrt{\operatorname{tgh} h \cdot \left(\frac{g \cdot h}{v^2} \right)}. \quad (14)$$

Warunki użytkowania okrętów o typowych kadłubach wypornościowych na akwenach o ograniczonej głębokości wody opisują charakterystyki zamieszczone na rysunkach 2. i 3. Można zauważyć, że istotne zmiany oporu oraz mocy silnika pojawiają się przy zmniejszonej głębokości akwenu do $h \leq 20$ m i są coraz większe ze zmniejszaniem się głębokości wody. Stąd zmienia się również charakter krzywych od wielomianu drugiego stopnia przez wielomian trzeciego stopnia do krzywych wykładniczych.



Rys. 2. Charakterystyka oporowa okrętu na akwenach o małej głębokości wody

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Zależność mocy silników napędowych od prędkości pływania na akwenach ograniczonych
 Źródło: opracowanie własne.

PLYWANIE W SZTORMIE

Podczas pływania w sztormie rozważany jest zwykle problem zmniejszenia prędkości pływania okrętu, które może być niezamierzone lub zamierzone przez załogę okrętową. W pierwszym przypadku zmniejszenie prędkości zależy bezpośrednio od stanu morza, kąta kursowego względem głównego kierunku rozchodzenia się fal, a także od własności dynamicznych okrętu. Jest to następstwem: wzrostu oporu aerodynamicznego i hydrodynamicznego, zmniejszonej sprawności pędników pracujących w niejednorodnym polu prędkości wody oraz w warunkach ich wynurzania, zmieniającego się kierunku ruchu (myszkowania) okrętu. Natomiast zmniejszenie prędkości przez załogę okrętową może mieć miejsce z powodu: zalewania pokładu; dużego obciążenia dynamicznego kadłuba; zwiększenia się ciśnień w dziobowej części dna okrętu przy uderzeniu o wodę podczas kołysania podłużnego; intensywnego kołysania poprzecznego.

Ogólnie należy więc przyjąć, że podczas pływania w warunkach sztormowych siła i kierunek wiatru oraz falowanie wody sprawia, iż opór okrętu zwiększa się o dodatkowy opór od wiatru i fali oraz w niewielkim stopniu o dodatkowy opór od zmiany kierunku kursu i pracy sterów.

Wartość dodatkowego oporu od wiatru zależy od jego prędkości (siły wiatru), kąta zawartego pomiędzy jego kierunkiem i kursem okrętu, a także od kształtu i rozmiarów części nadwodnej. Szacuje się, że przy pogodzie bezwietrznej opór ten wynosi od dwóch do trzech procent oporu całkowitego. Ze wzrostem prędkości wiatru udział oporu powietrza rośnie i osiąga bardzo wysokie wartości. Przy silnym sztormie (prędkości wiatru $v_w > 70$ w) może stanowić składową o najwyższej wartości w oporze całkowitym okrętu. Najwyższe wartości dodatkowego oporu od wiatru występują, kiedy kąt pomiędzy kierunkiem wiatru i kursem okrętu wynosi od trzydziestu do czterdziestu stopni. Wówczas może on przekraczać nawet o pięćdziesiąt procent wartość oporu występującego podczas pływania pod wiatr (przy kącie 0°), ponieważ o wartości oporu dodatkowego od wiatru decyduje także sposób zabudowy i kształt nadbudówek.

Opory dodatkowe od wiatru oraz falowania można obliczyć z często podawanych w literaturze (np. [1]) zależności. Opór dodatkowy od wiatru można obliczyć z zależności:

$$R_p = c_o \cdot \rho \cdot A_p \cdot \cos \varphi \cdot (v_w^2 + v^2 + 2v_w \cdot v \cos \varphi), \quad (15)$$

gdzie:

- R_p [N] — dodatkowy opór od wiatru;
- ρ [kg/m³] — gęstość powietrza $\rho = 0,2928$;
- A_p [m²] — pole powierzchni poprzecznej rzutu nadwodnej części kadłuba;
- φ [°] — kąt pomiędzy kierunkiem wiatru i kursem okrętu;
- v [m/s] — prędkość okrętu;
- v_w [m/s] — prędkość wiatru;
- c_o [–] — współczynnik oporu powietrza.

Dodatkowy opór od falowania wody jest efektem dodatkowego kołysania wzdłużnego, poprzecznego i pionowego okrętu. Powodują one wzrost oporu, który jest tym większy, im większa jest wysokość fali i prędkość okrętu. Zależność pomiędzy prędkością wiatru i wysokością fali można przy tym wyznaczyć na przykład ze wzoru:

$$v_w = 8\sqrt{h_f}, \quad (16)$$

gdzie:

- v_w [w] — prędkość wiatru;
- h_f [ft] — wysokość fali w stopach.

Dodatkowy opór od fali określane jest zwykle dla warunków pływania w sztormie, kiedy fale są największe. Metody rachunkowe dotyczą więc przede wszystkim wyznaczania oporu okrętu na fali przeciwnej do kierunku pływania. Przybliżony dodatkowy opór od falowania wody podczas sztormu można wyznaczyć w oparciu o metody empiryczne, spośród których na uwagę zasługuje wzór Dawidsona:

$$R_F = \frac{\rho(v + v_f)^2}{2} \cdot \frac{B \cdot h_f}{\pi} \cdot (1 - \cos \psi_d), \quad (17)$$

gdzie:

R_F [N] — dodatkowy opór od fali;

ρ [kg/m³] — gęstość wody;

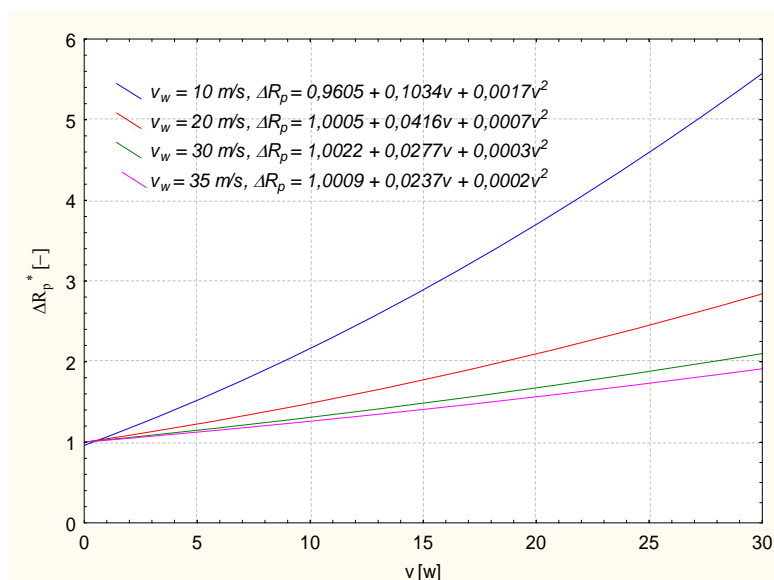
v_f [m/s] — prędkość rozchodzenia się fali;

λ [m] — długość fali;

B [m] — szerokość okrętu na linii wodnej;

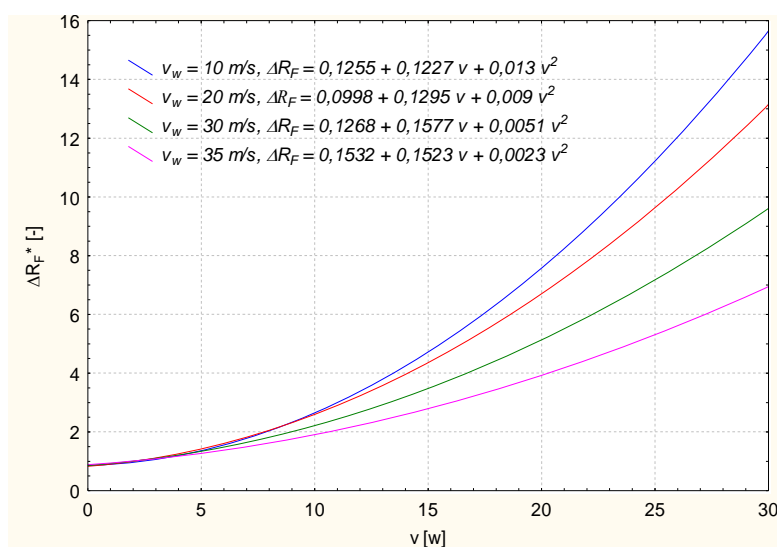
ψ_d [°] — połowa kąta zaostrenia dziobu kadłuba na linii wodnicy.

Wzrost jednostkowego oporu od wiatru oraz falowania morza, wyznaczony ze wzoru (18), przedstawiono na rysunkach 4. i 5.



Rys. 4. Wzrost jednostkowego oporu od wiatru podczas pływania w sztormie

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Wzrost jednostkowego oporu od wysokości fali podczas pływania w sztormie

Źródło: opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

Podane w artykule charakterystyki opisujące warunki pracy okrętowych tłokowych silników spalinowych mają cechy zależności uniwersalnych, możliwych do zastosowania w procesie wyznaczania testów oraz charakterystyk emisji zanieczyszczeń jednostek podobnych. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, w opisie warunków użytkowania okrętowych silników napędu głównego podstawową zależnością jest charakterystyka oporowa standardowa (projektowa, normalna).

Ogólną względną charakterystykę oporową i charakterystykę mocy użytecznej silnika napędowego wyznaczono z danych wyselekcjonowanych spośród około 3500 zarejestrowanych rejsów jednostek pływających i przedstawiono w postaci funkcji regresji o silnej korelacji. W selekcji danych kryterium ich przyjęcia do obliczeń był rejestrowany zakres zmienności rzeczywistej prędkości pływania okrętu. Zasadnicze informacje dotyczących kadłuba, napędu okrętowego oraz parametrów ruchu jednostki pływającej uzyskano z systemu automatycznej identyfikacji ruchu jednostek pływających AIS.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Charchalis A., *Opory okrętów i pędniki okrętowe*, Wydawnictwo WSMW, Gdynia 1985.
- [2] Dudziak J., *Teoria okrętu*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 2008.
- [3] Kulczyk J., Winter J., *Śródlądowy transport wodny*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [4] Michalski J. P., *Metody przydatne do wymaganego komputerem projektowania wstępnego statków śródlądowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007.
- [5] Michalski J. P., *Metody wyznaczania oporu i mas uogólnionych kadłuba przydatne w projektowaniu wstępnym statków dwukadłubowych o małej wodnicy pływania*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2002.
- [6] *Modele emisji związków szkodliwych pochodzących ze spalin okrętowych silników spalinowych w powietrzu atmosferycznym aglomeracji Trójmiasta*, red. L. Piaseczny, sprawozdanie z realizacji projektu badawczego nr N502 009 31/1187, finansowanego przez MNiSW, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2009.
- [7] Pawłowski M., *Nieliniowy model kołysań statku na fali nieregularnej*, „Raport Techniczny”, 1999, nr 33, PRS, Gdańsk 1999.
- [8] Wojnowski W., *Okrętowe silownie spalinowe*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1991.
- [9] Wroblewska L. N., Sirotina G. N., *Opriedielenije moszcznosti energiczeskoj 12stanowi w naczalnoj stadii projektowanija gruzowych sudow wnutrienniego i smieszanogo pławanija*, Trudy GIIWT, 1975, nr 144.

IDENTIFICATION OF USE CONDITIONS OF MARINE DIESEL ENGINE IN ASPECT OF INFLUENCE ON CHARACTERISTICS OF EXHAUST GAS EMISSION

ABSTRACT

General foundations of identification of influence conditions use on their profile of release of exhaust gas the marine Diesel engines in article were introduced. It the range of indispensable

analytic works was described to defining on basis on ships' resistory profiles, the profiles of load, helical, speed of navigation and parameters of movement ship. There were passed the examples of real profiles of draught hulk vessels definite in course of the own researches on basis of identification the movements of about 3500 vessels. There were presented the ways of taking into account the real conditions of work of shipping propulsion system during navigation on the water depth limited sea area , in storm as well as after change draught.

Keywords:

emission, vessels, marine engines, real conditions of work.