

KOWALSKI Jerzy<sup>1</sup>

## Analiza możliwości ograniczenia emisji gazów cieplarnianych ze statków dalekomorskich

### WSTĘP

Rozwój przemysłu na świecie, zmierzający do zaspokajania konsumpcyjnych potrzeb ludzi prowadzi do emisji do atmosfery groźnych dla zdrowia związków chemicznych. Są to przede wszystkim gazowe produkty spalania paliw kopalnych. Część z tych związków jak tlenki węgla, przyczynia się do wzmaganie się efektu cieplarnianego, natomiast część jak związki z grupy tlenków azotu i siarki zakwaszają glebę i wpływają negatywnie na zdrowie ludzi i zwierząt. W zasadzie wszystkie dostępne analizy prowadzą do wniosków, że obecnie stosowane sposoby pozyskiwania energii do celów konsumpcyjnych, przemysłowych i transportowych prowadzić będą do eskalacji efektu cieplarnianego [1]. Z drugiej strony, zgodnie z analizami, dotyczącymi emisji gazów cieplarnianych ze środków transportu [2] szacuje się, że w obszarze Unii Europejskiej transport jest źródłem niemal 54% całkowitej emisji tlenków azotu, 45% tlenku węgla, około 25% pyłów i 23% emisji CO<sub>2</sub>. Ponadto w skali Unii Europejskiej w roku 2007 transport morski odpowiadał za 4,2% całkowitej emisji CO<sub>2</sub>, co stanowi 15,3% całkowitej emisji z transportu. Z tego powodu już w 1997 roku IMO (Międzynarodowa Organizacja Morska) wprowadziła do konwencji MARPOL 73/78 Załącznik VI: „Prawidła zapobiegania zanieczyszczeniu powietrza przez statki” [3]. Załącznik ten określa głównie dopuszczalne zawartości tlenków azotu w emitowanych gazach wylotowych silników okrętowych oraz zawartości siarki w paliwach okrętowych. Przepisy te zostały ratyfikowane w 2005 roku. W 2011 roku przepisy te zostały rozszerzone o rozdział 4, który dotyczy konieczność ograniczania emisji CO<sub>2</sub> przez statki w oparciu o wskaźnik efektywności wykorzystania energii EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator) [7]. Przepisy te weszły w życie w 2013 roku i dotyczą statków dotychczas eksploatowanych oraz nowo wybudowanych. Wspomniany wskaźnik EEOI określa ilość emitowanego do atmosfery CO<sub>2</sub> w stosunku do masy przewożonego przez statek ładunku i odległości pływania. Oznacza to, że armator musi tak zarządzać eksploatacją statku, aby w możliwie efektywny sposób wykorzystywać energię, wytworzona w wyniku spalania paliwa w silnikach i kotłach okrętowych. Ograniczenie zużycia paliwa możliwe jest na drodze różnych rozwiązań, które zgodnie z [5] powinny być zawarte w planie efektywnego zarządzania energią na statkach SEEMP (ang. Ship Energy Efficiency Management Plan). W ogólnym podejściu działania te sprowadzają się do optymalizacji budowy i eksploatacji statku w następujących obszarach:

- zwiększenie efektywności działania źródeł energii w tym silników okrętowych,
- zwiększenie efektywności napędu i kadłuba statku,
- minimalizowanie zużycia energii na statku,
- wzmoczone działania nad wykorzystaniem energii wiatru i słońca,
- wprowadzenie rozwiązań pozwalających na optymalizację przebiegu rejsu statku.

Przedstawione działania pociągają za sobą zmiany w konstrukcji i zarządzaniu statków. Oczywistym jest, że działania te mogą doprowadzić do wzrostu kosztów transportu a co za tym idzie znacznych strat finansowych. Dlatego też istotnym jest analiza przedstawionych działań pod względem możliwości technicznych i efektów wprowadzenia tych działań. Celem pracy jest więc analiza możliwości ograniczenia emisji gazów cieplarnianych ze statków dalekomorskich. W pracy skupino się przede wszystkim na analizie dostępności i potencjału rozwiązań technicznych, prowadzących do wzrostu efektywności pływania statków.

<sup>1</sup> Jerzy Kowalski; Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa; Gdańsk 80-233; Narutowicza 11/12, e-mail: [jerzy.kowalski@pg.edu.pl](mailto:jerzy.kowalski@pg.edu.pl)

## 1. WSKAŹNIK EEOI

Punktem wyjścia do oceny efektywności energetycznej transportu statkiem dalekomorskim może być wspomniany wcześniej wskaźnik EEOI [6]. Wskaźnik ten wyrażony jest zależnością:

$$EEOI = \frac{\sum_i \sum_j F_{ij} C_j^F}{\sum_i m_i^L D_i^L} \quad (1)$$

gdzie:

$i$  – numer podróży,

$j$  – rodzaj paliwa,

$F_{ij}$  – ilość  $j$ -tego paliwa spalonego podczas  $i$ -tej podróży,

$C_j^F$  – wskaźnik określający zawartość węgla w paliwie,

$m_i^L$  – masa przewożonego towaru w  $i$ -tej podróży,

$D_i^L$  – odległość przeplnięta podczas  $i$ -tej podróży.

Zgodnie z przedstawionym równaniem efektywność żeglugi rośnie wraz z ilością przewożonego ładunku oraz przebytej odległości. A więc ilość zużytego paliwa oraz zawartego w nim węgla wpływa bezpośrednio na ilość emitowanych do atmosfery tlenków węgla. W związku z powyższym zastosowanie paliwa o niższej zawartości węgla jest jedną z możliwości ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Na podstawie [7] można zauważyć, że zawartość węgla można zmniejszyć z 86% dla oleju napędowego do 75% w przypadku zastosowania gazu LPG (Liquid Petroleum Gas). Niestety zastosowanie takiego paliwa pociąga za sobą konieczność znacznych modyfikacji technicznych w silnikach spalinowych oraz jego instalacjach. Nawet zastosowanie paliwa niskosiarkowego wymaga modyfikacji smarowania gładzi tulei cylindrowych silnika i wiąże się z szybszym zużyciem par precyzyjnych pomp wtryskowych i wtryskiwaczy paliwa. Zastosowanie LPG wymaga już ingerencji w układ paliwowy i stosowanie dawki pilotującej oleju napędowego [8, 9], świec żarowych lub komory wstępnej, umożliwiającej samozapłon. Należy również zaznaczyć, że zastosowanie LPG i innych gazów, jako paliwa okrętowego wiąże się z modernizacją instalacji przechowywania paliwa a koszt samego paliwa jest znacznie wyższy. W tabeli 1 zaprezentowano zestawienie metod i działań zmierzających do ograniczenia zużycia energii na statkach dalekomorskich. Podano również szacunkowe koszty zastosowania oraz możliwy zysk energetyczny. Ze względu na różnorodność konstrukcji statków podane dane są jedynie orientacyjne.

## 2. ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI PRACY SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Powszechnie stosowanym rozwiązaniem jest ograniczenie prędkości pływania przez statki. Należy zaznaczyć, że opory ruchu statku są proporcjonalne do jego prędkości podniesionej do mniej więcej 3 potęgi. W związku z tym ograniczenie prędkości pływania z 26 do 10 węzłów kontenerowca o nośności 8000TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) powoduje zmniejszenie zużycia paliwa o prawie 60% [10]. Należy jednak pamiętać, że silniki okrętowe są zazwyczaj regulowane w ten sposób, aby miały najwyższą sprawność podczas pracy z parametrami zbliżonymi do nominalnych. Z tego właśnie powodu stosuje się również zwiększenie obciążenia agregatów prądotwórczych. Polega to na załączaniu mniejszej liczby agregatów, pracujących z wyższym obciążeniem. Rozwiązanie to wymaga jednak zastosowania układów automatyki o dużej szybkości działania. Jest to spowodowane względami bezpieczeństwa, gdyż nagły wzrost poboru prądu może spowodować przeciążenie agregatu, co może spowodować jego awaryjne rozłączenie. Rozwiązaniem, które niweluje wady powyższych zabiegów jest montaż prądnicy wałowej. Prądnica taka pobiera energię mechaniczną z wału napędowego statku obciążając silnik główny. W ten sposób możliwe jest „dociążenie” silnika głównego, który pracuje z obciążeniem zbliżonym do najwyższej sprawności. Oczywistym jest, że rozwiązanie to wymaga modernizacji siłowni okrętowej i poniesienia jej kosztów. Inne rozwiązania techniczne, wymagające modyfikacji konstrukcji siłowni okrętowej to modyfikacje w sterowaniu silników spalinowych (zmiany faz rozrządu zaworów, zmiana charakterystyki wtrysku paliwa do cylindra), montaż kotłów utylizacyjnych na kanałach wylotowych spalin silników pomocniczych, czy udoskonalenie pracy układów wytwarzania pary poprzez docieplenie rurociągów, instalacje dodatkowych układów automatyki i szkolenie załogi.



### 3. ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI NAPĘDU I KADŁUBA STATKU

Tab. 1 Działania zmierzające do ograniczenia zużycia energii na statku na podstawie [13].

| Działanie  | Koszt wdrożenia w<br>tyś. USD | Zysk<br>energetyczny w<br>%* |
|--|-------------------------------|------------------------------|
| Optymalizacja działania silników pomocniczych                      | 10 – 150                      | 1 – 5                        |
| Optymalizacja pracy silników napędu głównego                       | 60 – 3000                     | 2 – 10                       |
| Automatyczna optymalizacja wydajności silników                     | 3 – 7                         | 1 – 4                        |
| Manualna optymalizacja wydajności silników                         | 5 – 10                        | 1 – 4                        |
| Kotły utylizacyjne na kolektorach wylotowych silników pomocniczych | 50 – 75                       | 0 – 5                        |
| Hybrydyzacja napędu statku   | 600 – 2000                    | 15 – 30                      |
| Zmiana obciążenia silników pomocniczych                            | 0                             | 2,5 – 7                      |
| Prądnica wałowa  | 0,4/kW                        | 2 – 5                        |
| Zasilanie z lądu podczas postoju                                   | 5 – 750                       | 50 – 100                     |
| Zwiększenie efektywności siłowni parowej                           | 20                            | 10 – 30                      |
| Odzysk ciepła odpadowego   | 5 – 9,5                       | 3 – 8                        |
| Optymalizacja kadłuba warstwą powietrza                            | 2-3% ceny statku              | 10                           |
| Czyszczenie i malowanie kadłuba                                    | 5 – 500                       | 2 – 9                        |
| Optymalizacja kształtu kadłuba i montaż gruszki dziobowej          | 350 – 1200                    | 4 – 10                       |
| Czyszczenie śruby napędowej  | 4 – 8                         | 3 – 4                        |
| Optymalizacja kształtu śruby napędowej                             | 400 – 500                     | 2 – 5                        |
| Montaż elementów usprawniających pracę śruby napędowej             | 100 – 700                     | < 2                          |
| Regulacja obciążenia urządzeń pomocniczych                         | 0,1 – 0,2/kW                  | 2 – 10                       |
| Zastosowanie oświetlenia energooszczędnego                         | 100 – 1000                    | 0,25 – 5                     |
| Modyfikacje sterowania układów wyładunku zbiornikowców             | 15 – 25                       | 5 – 15                       |
| Żagle  | 170 – 300                     | 1 – 10                       |
| Panele słoneczne   | 2,8 – 3,4/kW                  | 0,5 – 2 prądu                |
| Latawiec   | 0,7 – 1,75/m <sup>2</sup>     | 1 – 5                        |
| Wirniki Flettnera  | 400 – 950                     | 3 – 15                       |
| Regulacja autopilota   | 0                             | 0,25 – 1,5                   |
| Optymalny dobór prędkości i skoku śruby do warunków pływania       | 0                             | 0,25 - 1                     |
| Optymalizacja pracy systemów pozycjonowania statków                | 0                             | < 1                          |
| Redukcja prędkości pływania  | 0                             | 10 - 50                      |
| Optymalizacja zanurzenia statku                                    | 15 - 75                       | 0,5 - 3                      |
| Wykorzystanie prądów morskich podczas rejsów                       | 15                            | 0 - 5                        |

Działania w tej grupie sprowadzają się do zwiększenia efektywności działania śruby napędowej oraz zmniejszenia oporów ruchu statku. Zwiększenie efektywności śruby napędowej, której kształt i parametry zostały dobrane na etapie projektowania i budowy statku można osiągnąć dzięki czyszczeniu i polerowaniu powierzchni płatów śruby, modernizację kształtu śruby starszych konstrukcji lub montaż elementów usprawniających pracę śruby jak np. dyfuzor. Zmniejszenie oporów kadłuba może polegać na częstszym oczyszczaniu kadłuba z porostów oraz malowaniu kadłuba farbami antyporostowymi. W obu przypadkach zabiegi te wymagają wprowadzenia statku na suchy dok, co prowadzi do znacznych kosztów. Możliwe są też bardziej zaawansowane (i droższe)



zabiegi takie jak, przeprojektowanie i optymalizacja kształtu kadłuba w tym montaż gruszki dziobowej starszych jednostek pływających, czy nowatorskie metody, jak montaż układu pozwalającego na opływanie kadłuba warstwą powietrza [11].

#### 4. MINIMALIZOWANIE ZUŻYCIA ENERGII NA STATKU

Zgodnie z zaleceniami IMO minimalizacja zużycia energii na statku dalekomorskim nie musi sprowadzać się tylko do ogólnie rozumianego oszczędzania energii elektrycznej przez wyłączanie zbędnych urządzeń. Oczywiście możliwa jest wymiana punktów oświetleniowych na świetlówki energooszczędne, jednak trzeba nadmienić, że są to działania o niewielkiej efektywności. Przykładowo ster strumieniowy stosunkowo niewielkiej jednostki pływającej, jaką jest „Dar Młodzieży” ma moc 250kW, a więc minuta działania tego steru odpowiada pracy żarówki o mocy 100W przez ponad 41 godzin. W związku z tym minimalizacja zużycia energii może i powinna być rozszerzona poprzez regulację obciążenia urządzeń pomocniczych. Chodzi tu przede wszystkim o pompy, wentylatory i sprężarki. Instalacja odpowiednich urządzeń sterujących może pozwolić na redukcję prędkości obrotowej tych urządzeń w czasie mniejszego zapotrzebowania na ich pracę. Proponuje się również modyfikacje sterowania układów wyładunku zbiornikowców. Pompy wyładunkowe są urządzeniami o znacznym zapotrzebowaniu energii i dużej wydajności (liczonej w m<sup>3</sup>/min), co skraca pobyt statków w porcie. Pompy te często są zasilane poprzez turbiny parowe wraz z kotłami. Analiza rozładunku pozwalała na redukcję zużycia energii nawet o 15% poprzez regulację wydajności kotłów, turbin i pomp.

#### 5. WYKORZYSTANIE ENERGII WIATRU I SŁOŃCA

W ostatnich latach coraz więcej uwagi kieruje się na próby wykorzystania energii wiatru i słońca. Trwają intensywne prace nad wykorzystaniem energii wiatru poprzez zmodyfikowane układy ożaglowania, które minimalizują ograniczenia w dostępie do pokładu i przestrzeni ładunkowej. Jedną z propozycji są wirniki Flettnera [12], które pozwalają na uzyskanie redukcji zużycia paliwa od 3 do 15%. Inną propozycją jest zastosowanie specjalnego latawca, który może być wypuszczany z pokładu statku w przypadku żeglugi statku z wiatrem. Szacuje się, że latawiec o powierzchni 640m<sup>2</sup> może przyczynić się do uzyskania 2500kW energii, jednak koszt jego instalacji to prawie 1mln USD.

#### 6. OPTIMALIZACJA PRZEBIEGU REJSU STATKU

Ta grupa działań wykorzystywana jest od wielu lat, jako element zasad dobrej praktyki morskiej. Polega ona na takim planowaniu rejsów, aby możliwe było przepłynięcie statku z możliwie niskim zużyciem paliwa. W grupie tej można wyróżnić dbałość o prawidłowy załadunek i balastowanie w celu ograniczenia oporów ruchu statku oraz dostosowanie prędkości statku do warunków pogodowych z uwzględnieniem prądów morskich i wiatru. Działania te wymagają wyłącznie przeszkolenia załogi i nie pociągają za tym żadnych kosztów inwestycyjnych. Rozwiązania bardziej zaawansowane, wymagające inwestycji w układy automatyki to optymalny dobór prędkości i skoku śruby do warunków pływania [14] oraz optymalne działanie układów pozycjonowania statków typu off-shore.

#### WIOSKI

Analiza przedstawionych rozwiązań może przyczynić się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i oszczędności finansowych. Należy zaznaczyć, że rozwiązania, które nie pociągają znacznych kosztów inwestycyjnych są powszechnie stosowane w ramach tak zwanej dobrej praktyki morskiej. Są to przede wszystkim działania optymalizujące przebieg rejsu statku. Na uwagę zasługują również działania zmierzające do oszczędności zużywania energii przez statek. Pomimo stosunkowo niewielkich kosztów pozwalają na uzyskanie efektów bez konieczności doszkalania załogi. Pozostałe rozwiązania są raczej kosztownymi przedsięwzięciami, które mogą być stosowane, ale na nowo budowanych jednostkach.

#### BIBLIOGRAFIA

1. World Energy Outlook 2011 Report. International Energy Agency. Paris Cadex 2011.



2. Badyda A.J. Zagrożenia środowiskowe ze strony transportu. *Nauka* 4.2010, 115-125.
3. Załącznik VI do konwencji MARPOL 73/78, Polski Rejestr Statków. Gdańsk 2000.
4. Jurdziński M., Planowanie efektywności energetycznej statków morskich. *Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni* 2013; 28: 5–10.
5. Rezolucja MEPC.213(63), Guidelines for the development of a Ship energy efficiency management plan (SEEMP). IMO, 2012.
6. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator. MEPC.1/Circ.684. IMO 2009.
7. Tien Anh Tran, A research on the energy efficiency operational indicator EEOI calculation tool on M/V NSU JUSTICE of VINIC transportation company, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2, 1, 2017, 55-60,
8. Wang Z., Z. Zhao, D. Wang, M. Tan, Y. Han, Z. Liu, H., Impact of pilot diesel ignition mode on combustion and emissions characteristics of a diesel/natural gas dual fuel heavy-duty engine, *Fuel* 167, 2016, 248–256.
9. Wei L., P. Geng, A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance”. *Fuel Processing Technology* 142, 2016, 264–278.
10. Meyer J., Stahlbock R., Wob S., Slow Steaming in Container Shipping, *International Conference on System Sciences*. 2012, 1306-1314.
11. Foeth E.J., Decreasing frictional resistance by air lubrication, 20th International Hiswa Symposium on Yacht Design and Yacht Construction, 2009,
12. Traut M., Gilbert P., Walsh C., Bows A., Filippone A., Stansby P., Wood R., Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes, *Applied Energy*, 113, 2014, 362-372,
13. Global maritime energy efficiency partnerships, International Maritime Organization, [glomeep.imo.org](http://glomeep.imo.org),
14. Rudzki K., Tarelko W., A decision-making system supporting selection of commanded outputs for a ship's propulsion system with a controllable pitch propeller, *Ocean Engineering* 126, 2016,

### Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości ograniczania emisji gazów cieplarnianych ze statków dalekomorskich. Przedstawiono również analizę tych rozwiązań. W ogólnym zarysie metody ograniczania emisji gazów cieplarnianych sprowadzają się do zwiększenia efektywności energetycznej statków poprzez zwiększenie efektywności działania źródeł energii w tym silników okrętowych, zwiększenie efektywności napędu statku, minimalizowanie zużycia energii na statku, wzmożone działania nad odzyskiwaniem energii odpadowej oraz wprowadzenie rozwiązań pozwalających na optymalizację przebiegu rejsu statku. Wszystkie przedstawione grupy metod polegają na zmniejszeniu wartości współczynnika EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator), określającego stosunek zużytego paliwa do iloczynu przepłyniętej odległości i masy przewożonego ładunku. Zgodnie z przedstawioną analizą na uwagę zasługują metody zmierzające do ograniczania zużycia energii na statku i optymalizacja przebiegu trasy rejsu. Co prawda metody te nie powodują znaczących redukcji emisji, ale nie generują znacznych kosztów inwestycyjnych jak to ma miejsce w przypadku pozostałych przedstawionych metod.

**Słowa kluczowe:** statek oceaniczny, wskaźnik EEOI, efektywność, emisja

### The analysisi of possibility of greenhouse gases emission reduction from ocean ships

#### Abstract

This paper presents the possibilities of reduction of greenhouse gas emission from ocean ships. An analysis of mentioned solutions is also presented. The greenhouse gas emission reduction methods are to increase the energy efficiency of ships by increasing the efficiency of energy sources, including marine engines, increasing the efficiency of the ship's propulsion, minimizing energy consumption on the ship, intensifying waste recovery and introducing solutions to optimize the ship cruise. All presented groups of methods are based on the reduction of the EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator), which determines the ratio of the fuel used to the ratio of the traveled distance and the mass of the carried cargo. According to the presented analysis, the methods of reducing the energy consumption of the ship and optimizing the cruise are worth mentioning.



Although these methods do not significantly reduce emissions, they do not generate significant investment costs as in the case for the other methods.

**Keywords:** ocean ship, EEOI indicator, efficiency, emission

