

**Tomasz TUŃSKI**

Akademia Morska w Szczecinie

## **NATEŻENIE PRZEPIYU POWIETRZA DOŁADOWUJĄCEGO SILNIK WOLNOBROTOWY DUŻEJ MOCY**

### **Słowa kluczowe**

Wolnobrotowy silnik okrętowy, ilość powietrza doładowujące, ilość gazów wylotowych, rzeczywiste warunki otoczenia i eksploatacji.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono możliwość uproszczenia sposobu wyznaczania ilości powietrza zapotrzebowanego przez wolnobrotowy silnik okrętowy. Przeanalizowano wysokość błędu wynikającego z powyższego uproszczenia w oparciu o zarejestrowane wartości zużycia paliwa i oleju cylindrowego oraz wytworzonych odpadów olejowych przez silnik w rzeczywistych warunkach otoczenia i eksploatacji.

### **1. Wstęp**

Prowadząc dokładne obliczenia dotyczące wyznaczania zasobów energii traconej w procesie chłodzenia powietrza doładowującego występuje konieczność określenia ilości powietrza konsumowanego przez silniki dla efektywnego spalania porcji paliwa dostarczanego do komór spalania. Dane publikowane przez producentów silników okrętowych dotyczą jedynie nominalnego obciążenia silnika pracującego w warunkach otoczenia zgodnych z parametrami określonymi przez ISO [2].

Wyznaczenie ilości powietrza doładowującego silniki okrętowe w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych jest kłopotliwe. Standardowo instalowana aparatura kontrolno-pomiarowa nie zapewnia możliwości pomiaru tego parametru. Nawet zaawansowane komputerowe systemy monitoringu siłowni okrętowych nie oferują takiej funkcji. Z tego względu odczyt oraz rejestracja natężenia przepływu powietrza doładowującego wymaga zastosowania dodatkowej aparatury pomiarowej. Wiąże się to z koniecznością poniesienia dodatkowych kosztów oraz ewentualnymi modyfikacjami systemów siłownianych. Dla silników dużych mocy nakłady finansowe oraz techniczne znacznie wzrosną ze względu na wyposażenie tych maszyn w więcej niż jeden układ turbosprężarka–chłodnica powietrza doładowującego.

## 2. Uproszczenie

W warunkach rzeczywistych ilość emitowanych spalin jest niemalże równa sumie masy zapotrzebowanego powietrza i masy zużytego paliwa. Niewielki udział masowy paliwa w porównaniu z ilością spalin powoduje, że często ilości spalin oraz ilość powietrza zapotrzebowanego do spalania stosowane są w obliczeniach zamiennie [3].

Równanie bilansu mas produkcji spalin dla wolnoobrotowych silników okrętowych przyjmuje następującą postać:

$$m_{POW} + m_{HFO} + m_{CYL} + m_{OL} = \Sigma_{PROD} = m_{SP} \text{ [kg/h]} \quad (1)$$

gdzie:

- $m_{POW}$  [kg/h] – ilość powietrza zapotrzebowana do spalania;
- $m_{HFO}$  [kg/h] – ilość paliwa spalane przez silnik;
- $m_{CYL}$  [kg/h] – ilość oleju cylindrowego zużywanego przez silnik;
- $m_{OL}$  [kg/h] – ilość odpadów olejowych produkowanych przez silnik;
- $m_{SP}$  [kg/h] – ilość spalin produkowanych przez silnik.

Na dzień dzisiejszy opracowanych jest wiele metod pozwalających dokładnie określić ilość emitowanych przez silniki okrętowe spalin [1, 6, 7].

Wyznaczenie ilości powietrza doładowującego, przepływającego przez chłodnicę, można znacznie uprościć zakładając, że zapotrzebowanie powietrza przez silnik jest równe ilości spalin, czyli:

$$m_{HFO} + m_{CYL} + m_{OL} = 0 \Rightarrow m_{POW} = m_{SP} \text{ [kg/h]} \quad (2)$$

Powyższe uproszczenie będzie jednak wprowadzało do obliczeń błęd, na którego wysokość mają wpływ poniższe czynniki:

- **paliwo**: jest podstawowym czynnikiem mającym na proponowane uproszczenie. Stosowane do zasilania tłokowych silników okrętowych dużych mocy

służy przede wszystkim do wytworzenia energii mechanicznej wykorzystywanej do napędu statku. Na jego zużycie ma wpływ szereg czynników konstrukcyjnych (*typ silnika, rodzaj układu wtryskowego*), eksploatacyjnych (*stan morza, kierunek wiatru, czystość podwodnej części kadłuba*) i tribologicznych (*stan aparatury wtryskowej, stan elementów tworzących komorę spalania, stan układu doładowania*). Większość obecnie produkowanych silników wolnoobrotowych ma możliwość współpracy z urządzeniem służącym do produkcji energii elektrycznej, czyli tak zwaną „prądnicą wałową”. W przypadku zastosowania prądnicy tego typu na zużycie paliwa znaczący wpływ będzie miało zapotrzebowanie statku na energię elektryczną;

- **olej cylindrowy:** zużycie oleju cylindrowego przez wolnoobrotowe silniki okrętowe jest zależne od wielu czynników konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych (*typ systemu smarowania tulei cylindrowych, rodzaju zastosowanego oleju cylindrowego, aktualnego stopnia obciążenia silnika*) Wartość ta może znacznie wzrosnąć podczas docierania pierścieni tłokowych i tulei cylindrowej. Proces ten należy przeprowadzić po każdej wymianie tych elementów. Czas trwania docierania oraz poziomy zmian dawek oleju cylindrowego są ściśle określone przez producentów silników;
- **odpady olejowe:** wolnoobrotowe silniki okrętowe są urządzeniami, których eksploatacja wiąże się z powstawaniem odpadów olejowych. Składają się na nie przede wszystkim niedopalone porcje paliwa, porcje oleju cylindrowego, nagary powstające podczas spalania paliwa, nagary powstające podczas spalania oleju cylindrowego zgarniane przez pierścienie tłokowe do przestrzeni podtłokowej. Wszystkie wyżej wymienione elementy są gromadzone w zbiornikach odpadów olejowych. Jako nieprzydatne w dalszej eksploatacji silników okrętowych są one spalane w okrętowych spalarkach odpadów olejowych lub zdawane na ląd w celu utylizacji przez wyspecjalizowane przedsiębiorstwa. Dodatkowymi odpadami olejowymi, które należy uwzględnić w składowej ‘ $m_{OL}$ ’ bilansu mas (1) są pewne ilości paliwa, które w wyniku przecieków systemu paliwowego silnika są gromadzone w specjalnych zbiornikach ‘przecieków paliwa’. Zazwyczaj jest ono ponownie kierowane do systemu paliwowego siłowni okrętowej, gdyż jest to paliwo nadal nadające się do spalania przez silnik. Ponieważ każdy z wyżej wymienionych odpadów olejowych odprowadzany jest z układu ‘spaliny – powietrze – paliwo – olej’, w bilansie mas (1) składowa ‘ $m_{OL}$ ’ będzie występowała ze znakiem „-”.

### 3. Pomiary

Na 2 statkach tej samej serii wyposażonych w długoskokowy, wolnoobrotowy silnik napędu głównego typu 7RTA84, przeprowadzono pomiary zużycia mediów, które zdaniem autora mają wpływ na wysokość błędu wynikającego z zastosowania powyższego uproszczenia.

Przed rozpoczęciem pomiarów na badanych silnikach sprawdzono stan techniczny układu doładowania, aparatury wtryskowej oraz elementów komory spalania. Rozrząd pomp wtryskowych ustawiony został zgodnie z zaleceniami producenta silnika, natomiast układ regulacji rozrządu (*VIT*<sup>1</sup>) został wyłączony. Paliwo wykorzystane podczas prowadzenia pomiarów spełniało normy paliwa RM 380. Wszystkie cylindry były „dotarte” oraz miały taką samą nastawę dawki oleju cylindrowego MOBILGARD540.

Dla zwiększenia wiarygodności prowadzonych pomiarów rejestrację danych prowadzono równoległe za pomocą lokalnych urządzeń pomiarowych (termometry, manometry, przepływomierze, liczniki obrotów) oraz zdalnie przy pomocy systemu komputerowego systemu monitoringu siłowni.

Pomiary prowadzono opierając się na założeniach podanych przez producenta silnika [4, 5]. Wyniki pomiarów rejestrowano w opracowanym i zatwierdzonym przez producenta silnika komputerowym arkuszu „Main Engine Evaluation Report”. Zebrane dane gromadzono na odpowiednio przygotowanych formularzach „Local measuring points at ME and engine room” i „Remote measuring points in engine room/engineers log print”. Rejestrację danych prowadzono w dwóch różnych systemach:

- dobowym: pozwalającym na określenie dobowego zużycia paliwa i oleju cylindrowego;
- chwilowym: pozwalającym na określenie zużycia powyższych mediów w powtarzanych krótkich seriach pomiarowych (po 15÷30 min).

Tabela 1. Zużycie paliwa oraz oleju cylindrowego

STATEK 1									
Data	n	N		G <sub>HFO24</sub>		δ <sub>HFO-SP</sub>	G <sub>CYL24</sub>		δ <sub>CYL-SP</sub>
	[obr/min]	[kW]	[%]	[kg]	[kg/h]	[%]	[kg]	[kg/h]	[%]
05.11.08	96,4	21146	85	99400,8	4141,7	2,42	810	33,8	0,0195
06.11.08	96,8	21450	85,5	99100,8	4129,2	2,48	800	33,3	0,0189
11.11.08	89,5	16663	68,7	79600,8	3316,7	2,53	690	28,8	0,0211
STATEK 2									
Data	n	N		G <sub>HFO24</sub>		δ <sub>HFO-SP</sub>	G <sub>CYL24</sub>		δ <sub>CYL-SP</sub>
	[obr/min]	[kW]	[%]	[%]	[kg/h]	[%]	[kg]	[kg/h]	[%]
24.06.07	92,8	18625	75,7	85600,8	3566,7	2,46	670	27,9	0,0215
26.06.07	90,7	17338	71,2	79500	3312,5	2,51	640	26,7	0,0261

<sup>1</sup> VIT – Variable Injection Timing.

System taki przyjęto w celu kontroli stabilności zużycia paliw oraz oleju. Zmiany tych parametrów wynikają z konieczności manewrowania statkiem bądź ze zmiany warunków otoczenia. Dla parametrów otoczenia panujących podczas prowadzenia pomiarów wyznaczono ilość produkowanych spalin przez badane silniki [6, 8]. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie ilości poszczególnych mediów w stosunku do masy spalin. Wartości te również zamieszczono w tabeli 1.

Natomiast parametry zarejestrowane w systemie chwilowym zamieszczono na wykresach zamieszczonych na rysunku 1.

Ilość produkowanych przez silnik odpadów olejowych została określona w oparciu o sondowanie zbiorników służących do ich gromadzenia. Prowadzone pomiary wykazały, że wartość ilości odpadów olejowych produkowanych przez silnik w rzeczywistych warunkach eksploatacji statku w cyklu chwilowym przy krótkich sesjach pomiarowych obciążona jest wysokim błędem. Z tego względu pomiar tego parametru przeprowadzono tylko w cyklu dobowym. Analogicznie jak dla paliwa oraz oleju cylindrowego, wyznaczono ilość odpadów olejowych w stosunku do ogólnej masy spalin. Zarejestrowane oraz obliczone wartości przedstawiono w tabeli 2 wspólnie dla obydwóch badanych silników.

Tabela 2. Produkcja odpadów olejowych

N	[%]	65÷70	71÷75	76÷80	81÷85
$G_{OL24}$	[kg]	68	69	82	89
$\delta_{OL-SP}$	[%]	0,0026	0,0024	0,0025	0,0021

gdzie:

$n$  [obr/min] – prędkość obrotowa silnika;

$N$  [kW] – obciążenie silnika;

$G_{HFO24}$  [kg] / [kg/h] – dobowe / godzinowe zużycie paliwa;

$G_{CYL24}$  [kg] / [kg/h] – dobowe / godzinowe zużycie oleju cylindrowego;

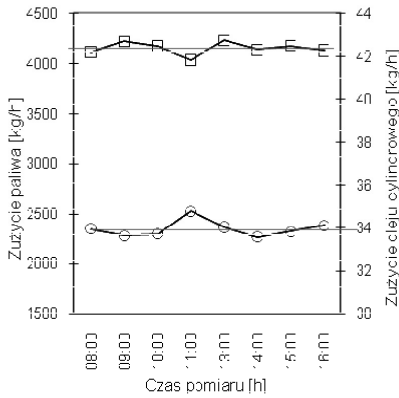
$G_{OL24}$  [kg] – dobową ilość odpadów olejowych produkowanych przez silnik;

$\delta_{HFO-SP}$  [%] – stosunek masy paliwa do masy produkowanych spalin;

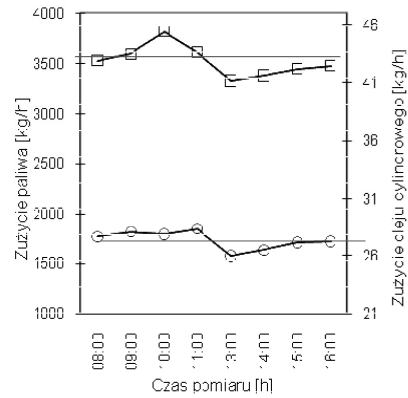
$\delta_{CYL-SP}$  [%] – stosunek masy oleju cylindrowego do masy produkowanych spalin;

$\delta_{OL-SP}$  [%] – stosunek masy produkowanych odpadów olejowych do masy produkowanych spalin.

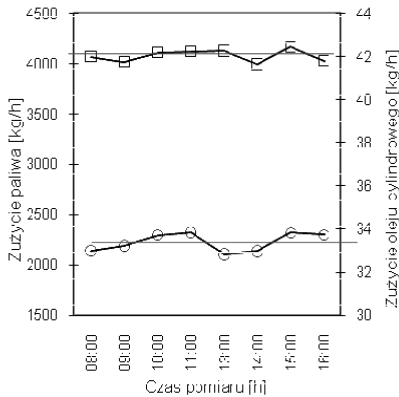
a) Statek 1 - 05.11.08



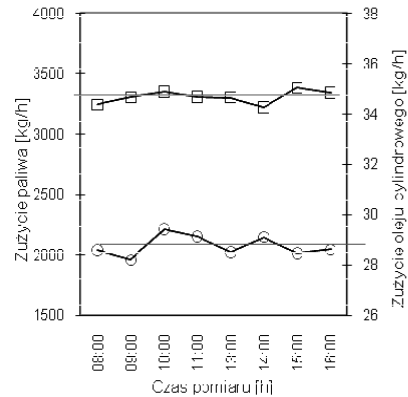
d) Statek 2 - 24.06.07



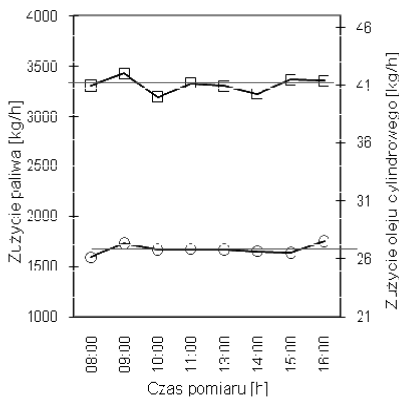
b) Statek 1 - 06.11.08





e) Statek 2 - 26.06.07



c) Statek 1 - 11.11.08



 - chwilowe zużycie paliwa;  
 - chwilowe zużycie oleju cylindrowego;  
 — - wartość średnia pomiaru

Rys. 1. Zużycie paliwa oraz oleju cylindrowego

#### 4. Wnioski

Analiza udziałów ilości spalanego paliwa i oleju cylindrowego oraz produkowanych odpadów olejowych w stosunku do masy wydalanych przez silnik spalin wykazała, iż media te w bardzo różnym stopniu będą wywierały wpływ na wysokość błędów obliczeń opartych na zależności (2). Dla poszczególnych składników bilansu mas (1) przedstawia się on następująco:

- **paliwo:** ma największy wpływ na wysokość błędów uproszczonych obliczeń. Masa spalanego podczas pomiarów paliwa stanowiła  $2,42 \div 2,53\%$  masy produkowanych spalin. Ewentualne pominięcie tego składnika podczas obliczeń będzie generowało najwyższe błędy. Należy zwrócić uwagę, wartość ta została wyznaczona dla paliwa typu RMG 380;
- **olej cylindrowy:** ma znikomy wpływ na wysokość błędów uproszczonego bilansu mas (2). Jednak dla prowadzenia dokładnych obliczeń należy uwzględnić ten składnik, jako że jego ilość stanowi  $0,8\%$  masy spalanego paliwa oraz  $0,02\%$  masy produkowanych spalin;
- **odpady olejowe:** mają w porównaniu z paliwem oraz olejem cylindrowym najniższy wpływ na przedstawione uproszczenie. Nieuwzględnienie odpadów olejowych stanowiących  $0,1\%$  masy spalanego paliwa i  $0,002\%$  masy produkowanych spalin będzie generowało pomijalne błędy podczas uproszczonych obliczeń powietrza zapotrzebowanego do spalania.

Wprowadzając do obliczeń średni współczynnik korekcji równy  $2,4\%$  masy spalin można wyznaczać ilość powietrza zapotrzebowanego do spalania przez długoskokowy silnik wolnoobrotowy z minimalnym błędem przy jednoczesnym uproszczeniu procedur obliczeniowych. W oparciu o przeprowadzone pomiary możliwe jest założenie, że równanie bilansu mas (1) przyjmuje następującą postać:

$$m_{POW} = 0,976 m_{SP} \text{ [kg/h]} \quad (3)$$

Należy zwrócić uwagę, że udział masy spalanego paliwa w stosunku do masy spalin wzrósł zaledwie o  $0,1\%$  przy wzroście obciążenia silnika od  $68$  do  $85\%$ . Można więc przyjąć, że proponowany współczynnik korekcji w równaniu (3), wynoszący  $0,976$ , jest stały dla silnika pracującego w badanym zakresie obciążeń.

Recenzent:  
**Adam CHARCHALIS**

#### Literatura

1. Borkowski T.: Emisja spalin przez silniki okrętowe – zagadnienia podstawowe, Szczecin 1999.

2. ISO, Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods, 3046/1-2002.
3. Kowalewicz A.: Podstawy procesów spalania, WNT, Warszawa 2000.
4. WARTSILA, Engine selection and project manual RTA84C and RTA96C, Winterthur, 1998.
5. WARTSILA, Engine selection and project manual RTA84T-B and RTA84T-D, Winterthur 2000.
6. Tuński T.: Automatyzacja procesu obliczania parametrów spalin, Вопросы Повышения Эффективности Судовых И Стационарных Энергетических Установок, Kaliningrad 2001.
7. Tuński T.: Zmiany w formułach określania parametrów spalin silników typu RTA wynikające z rozwoju silników okrętowych oraz urządzeń pomocniczych, Gdańsk 2000.
8. Tuński T.: Zwiększenie efektywności wykorzystania energii odpadowej w układzie silnik–kocioł utylizacyjny w rzeczywistych warunkach otoczenia i eksploatacji statku, Rozprawa doktorska, Akademia Morska, Szczecin, 2005, p. 152.

### **The intensity of air flow charging into high-power marine engines operatnig at low-speed**

#### **Key-words**

Marine low speed engine, amount of charging air, amount of exhaust gases, real ambient and operating conditions.

#### **Summary**

The following article describes the possible simplification of the calculating procedure concerning the amount of the air required for the combustion process of the marine low speed engine. An analysis of the miscalculation factor has been based on the amount of the fuel oil and cylinder oil consumption and amount of the waste oil generated by marine engine under the real ambient and engine operation conditions.