



PRZYGOTOWANIE DO BADAŃ EMISJI ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH W SPALINACH OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO W WARUNKACH EKSPLOATACJI

Paweł Wirkowski

Akademia Marynarki Wojennej
ul. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia, Polska, tel.: +48 261 26 27 56
e-mail: p.wirkowski@amw.gdynia.pl

Jarosław Markowski

Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel.: +48 61 665 27 05
e-mail: jaroslaw.markowski@put.poznan.pl

Tomasz Kniaziewicz

Akademia Marynarki Wojennej
ul. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia, Polska, tel.: +48 261 26 26 25
e-mail: t.kniaziewicz@amw.gdynia.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono mechanizmy powstawania szkodliwych związków spalin silnika turbinowego oraz ogólnie opisano jak parametry pracy silnika turbinowego wpływają na emisję takich związków szkodliwych spalin jak tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), dwutlenek węgla (CO_2), niespalone węglowodory (HC) oraz cząstki stałe (PM). Zaprezentowane zostały wyniki wstępnych badań emisji związków szkodliwych spalin laboratoryjnego silnika turbinowego. Dokonano również analizy możliwości przeprowadzenia pomiarów stężeń związków szkodliwych w spalinach okrętowego turbinowego silnika spalinowego układu napędowego w warunkach jego eksploatacji na jednostce pływającej.

Słowa kluczowe: *związki szkodliwe, emisja, spaliny, okrętowy silnik turbinowy.*

1. Wstęp

Dotychczas niewiele było prowadzonych prac dotyczących oceny emisji związków szkodliwych w spalinach okrętowych turbinowych silników spalinowych oraz nie zostały opracowane żadne metodyki dotyczące pomiarów i oceny emisji związków szkodliwych w spalinach dla tego rodzaju i zastosowania silników. Inaczej przedstawia się sytuacja lotniczych silników turbinowych, które podlegają normom emisji związków szkodliwych spalin zgodnie z aneksem 16 Konwencji Chicagowskiej ustalonymi przez ICAO. Natomiast ochronę środowiska morskiego przed związkami szkodliwymi w spalinach emitowanych z jednostek pływających

regulują przepisy (m.in. Aneks VI Konwencji MARPOL) odnoszące się głównie do okrętowych tłokowych silników spalinowych.

2. Przyczyny powodujące tworzenie się szkodliwych składników spalin

Produktami spalania uznanymi za szkodliwe dla środowiska naturalnego, a w szczególności dla człowieka, są:

- tlenki azotu NO_x (tlenek azotu NO oraz dwutlenek azotu NO_2),
- tlenek węgla CO ,
- węglowodory HC , zwłaszcza wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne PAH,
- lotne związki organiczne VOC,
- tlenki siarki SO_x (głównie dwutlenek siarki SO_2),
- cząstki stałe PM.

Węglowodory i tlenki azotu są rakotwórcze, a tlenek węgla i dwutlenek siarki są trujące. Dwutlenek siarki, tlenki azotu i węglowodory, gromadząc się w atmosferze wchodzi w reakcje pod wpływem promieniowania słonecznego (reakcje fotochemiczne), w wyniku których powstaje bardzo groźny dla ludzkiego zdrowia smog.

Oprócz związków wymienionych wyżej w wyniku spalania paliw powstaje dwutlenek węgla CO_2 , który nie jest związkiem toksycznym, jednak powoduje efekt cieplarniany wpływający na wzrost temperatury globu a finalnie zmiany klimatyczne [3].

2.1. Czynniki sprzyjające powstawaniu tlenków azotu (NO_x)

Większość tlenku azotu (NO) powstałego w procesie spalania utlenia się do dwutlenku azotu (NO_2) i z tej przyczyny podaje się sumaryczną emisję tych związków jako NO_x . Tworzą się one poprzez cztery różne mechanizmy:

- termiczny,
- utlenianie azotu,
- tzw. natychmiastowy (szybki),
- pochodzący z azotu zawartego w paliwie.

Badania potwierdzają fakt, że ciśnienie w komorze spalania szczególnie dla wstępnie mieszanych, ubogich mieszanek ma minimalny wpływ na tworzenie się związków NO_x . Dla bogatych mieszanek ilość emitowanego NO_x zwiększa się proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z wartości ciśnienia. Zwiększa się też wraz ze wzrostem wymiaru średniej kropli dla małych wartości współczynników nadmiaru powietrza, natomiast dla mieszanek bogatych wymiar kropli nie wpływa na emisję NO_x [1,7].

2.2. Czynniki sprzyjające powstawaniu tlenku węgla (CO)

W czasie pracy silnika gdy w strefie zapłonu wytworzona jest tzw. bogata mieszanina paliwowo-powietrzna tworzy się wiele cząsteczek tlenku węgla (CO) ze względu na brak wystarczającej ilości tlenu potrzebnej do reakcji chemicznej zapewniającej tworzenie się dwutlenku węgla (CO_2). Nawet jednak przy reakcji stechiometrycznej czy mieszaninie umiarkowanie ubogiej będzie również występowała duża ilość CO ze względu na dysocjację CO_2 .

W praktyce emisja CO jest znacznie wyższa niż ta wynikająca z równań równowagi. Podstawowymi czynnikami wpływającymi na wydajność spalania a tym samym emisję CO są: temperatura na wlocie do silnika i komory spalania, ciśnienie w komorze spalania, współczynnik nadmiaru powietrza w strefie pierwotnej i średni rozmiar kropli w mieszaninie paliwowo-powietrznej. Empirycznie dowiedziono, że emisja CO zanika przy wartości 0,8 współczynnika

nadmiaru powietrza, po czym następuje duży gradient wzrostu jego emisji wraz ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza.

Wzrost ciśnienia w komorze spalania znacznie redukuje emisję CO. Przy małych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza wzrost ciśnienia w komorze spalania o 50% powoduje dwukrotne zmniejszenie produkcji tlenku węgla. Jeżeli występują wysokie wartości tego współczynnika wzrost ciśnienia spalania zahamowuje dysocjację CO₂ a tym samym emisję CO [1,7].

2.3. Czynniki sprzyjające powstawaniu węglowodorów (HC)

Niespalone węglowodory (HC) to praktycznie paliwo opuszczające komorę spalania jako krople lub pary. Większość czynników powodujących nadmierną ilość tlenku węgla (CO) w spalinach powoduje również nadmierną emisję węglowodorów (HC). Te rodzaje związków chemicznych powstają w wyniku niepełnego spalania paliwa zawierającego węglowodory. Główną przyczyną niepełnego spalania paliwa jest jego złe rozpylenie oraz niedokładne wymieszanie z powietrzem. Emisja węglowodorów ma dwa źródła: wygaszanie płomienia w warstwie przyściennej oraz obszary niepełnego wymieszania paliwa z powietrzem [3,7].

2.4. Czynniki sprzyjające powstawaniu lotnym związkom organicznym (VOC)

Lotne związki organiczne to związki węgla, wodoru, tlenu i azotu, które powstają podczas spalania paliw węglowodorowych. Należą do nich: akroleina, aldehydy i inne [3].

2.5. Czynniki sprzyjające powstawaniu tlenkom siarki (SO_x)

Tlenki siarki występujące w spalinach to tlenek siarki SO, dwutlenek siarki SO₂ i trójtlenek siarki SO₃. Niewielka ilość siarki (ograniczona normami) znajduje się w takich paliwach jak olej napędowy oraz biopaliwo. Siarka występuje w paliwie (traktowana jako zanieczyszczenie) w postaci atomowej S lub dimeru S₂. Utlenianie czystej siarki ma charakter reakcji łańcuchowej, a jej inicjacja musi być stymulowana atomami tlenu O. Nadmiar powietrza (nawet 1%) powoduje istotny przyrost trójtlenku siarki SO₃ [3,7].

2.6. Czynniki sprzyjające powstawaniu cząstek stałych (PM)

Cząstki stałe zawierają sadzę i bardzo dużo różnych toksycznych związków węgla, wodoru i tlenu. Sadza (C₈H) jest polimerem zbudowanym głównie z węgla, z niewielką liczbą atomów wodoru. Sadza powstaje z bardzo dużą szybkością (cząsteczki sadzy są już obecne po 1 ms) w obszarach płomienia przebogaconych w paliwo. Najbardziej sprzyjającymi termicznie warunkami do powstawania sadzy jest temperatura w zakresie 1900÷2300K. W wysokiej temperaturze następuje rozpad cieplny cząsteczek paliwa węglowodorowego. W wyniku pirolizy powstają węglowodory nienasycone, pozbawione w dużym stopniu wodoru, które ulegają polimeryzacji i cyklizacji. W efekcie tego powstaje cząstka sadzy [3,7].

3. Emisja związków szkodliwych w spalinach silników turbinowych

Silnik turbiny charakteryzuje się wysokim współczynnikiem mocy do masy, a zatem jest powszechnie stosowany jako napęd dla statku powietrznego. Ta zaleta również prowadzi inżynierów do korzystania z tych silników do napędu jednostek pływających - głównie na okrętach wojennych. Liczba statków morskich napędzanych przez silniki turbinowe jest niewielka w stosunku do liczby samolotów. Powodem tego jest oszacowanie ważności kryterium masy silnika

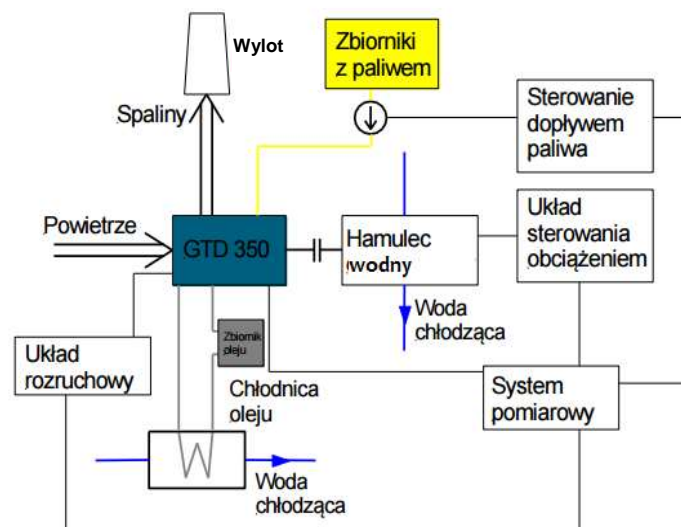
do osiągniętych parametrów pracy tj. moc silnika, zużycia paliwa, jakości paliwa, sprawności ogólnej, złożoność systemów operacyjnych, konieczność stosowania przekładni redukcyjnej ze względu na uzyskiwaną prędkość obrotową silnika w porównaniu do tłokowych silników okrętowych. Obecnie dodatkowym kryterium oceny możliwości zastosowania danych układów napędowych jest emisja zanieczyszczeń do atmosfery, która wykazuje pewne zalety w użyciu silnika turbinowego [4]. Korzyści te wynikają z innego procesu spalania paliwa w silniku, innego rodzaju paliwa używanego do napędu silnika oraz zapotrzebowania na energię jednostki pływającej.

3.1. Badania wstępne emisji związków szkodliwych w spalinach silnika turbinowego

Badania wstępne emisji związków szkodliwych spalin zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym turbinowego silnika spalinowego typu GTD-350 (Rys. 1.) w Instytucie Budowy i Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej. Schemat stanowiska przedstawiony jest na Rys. 2.



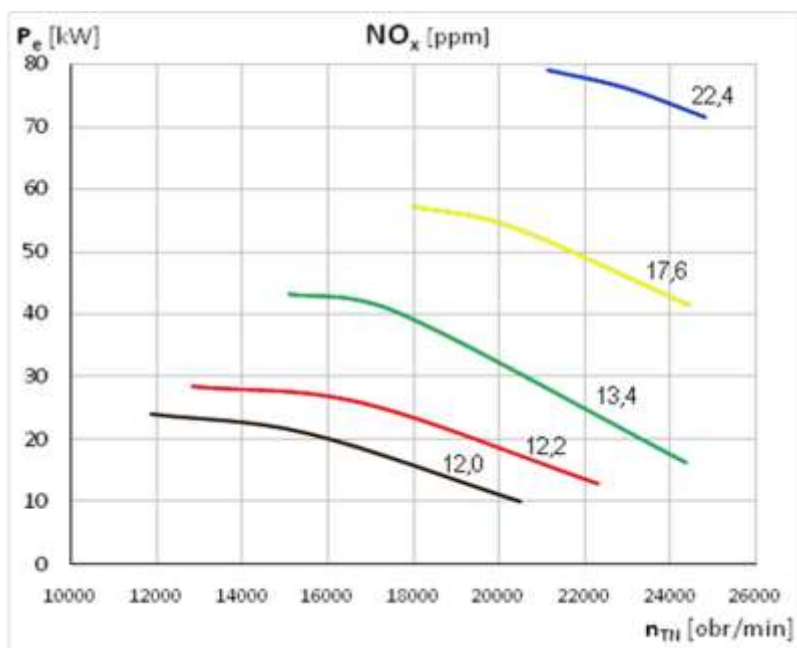
Rys. 1. Widok stanowiska laboratoryjnego silnika turbinowego typu GTD-350



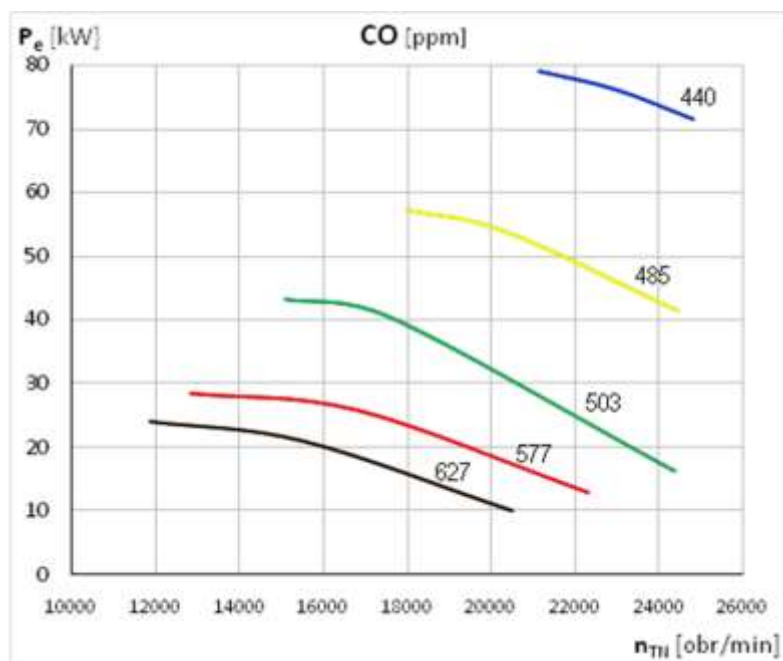
Rys. 2. Schemat stanowiska laboratoryjnego silnika turbinowego GTD-350

Podczas przeprowadzonych badań zostały dokonane pomiary parametrów pracy silnika oraz stężenia związków szkodliwych w spalinach, w stanach ustalonych i nieustalonych, w zakresie od biegu jałowego do obciążenia nominalnego. Regulowano strumieniem paliwa poprzez zmianę otwarcia zaworu regulacyjnego na przewodzie paliwowym do wtryskiwacza oraz przez zmianę położenia przesłon sterujących strumieniem wody w hamulcu wodnym. Pomiary zostały przeprowadzone w oparciu o wskazania przyrządów pomiarowych oraz z wykorzystaniem systemów pomiarowo-rejestracyjnych „SENGA” i „TESTO 350-MARITIME”.

Na podstawie dokonanych pomiarów oraz obliczeń sporządzono charakterystyki uniwersalne emisji związków szkodliwych dla silnika GTD-350 (Rys. 3., Rys. 4.).



Rys. 3. Przebieg zmian wartości stężenia tlenków azotu NO_x w spalinach podczas pracy silnika GTD-350; n_{TH} – prędkość obrotowa turbiny napędowej, P_e – moc silnika



Rys. 4. Przebieg zmian wartości stężenia tlenku węgla CO w spalinach podczas pracy silnika GTD-350; n_{TH} – prędkość obrotowa turbiny napędowej, P_e – moc silnika

3.2. Analiza wyników badań na silniku GTD-350

Jednym z najbardziej szkodliwych związków występującym w spalinach są tlenki azotu NO_x . Na Rys. 3 przedstawiono przebieg zmian wartości stężenia tlenków azotu NO_x w spalinach podczas pracy silnika GTD-350. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na moc silnika wzrasta temperatura spalania, przez co również zwiększa się stężenie tlenków azotu NO_x w spalinach. Przy zwiększaniu prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin stężenie tlenków azotu NO_x wzrasta. Natomiast przy zmniejszaniu obciążenia, przy niższych temperaturach spalania, stężenie tlenków azotu NO_x w spalinach maleje.

Kolejnym szkodliwym składnikiem spalin jest tlenek węgla CO. Na Rys. 4 przedstawiono przebieg zmian wartości stężenia tlenku węgla CO w spalinach podczas pracy silnika GTD-350. Wraz ze wzrostem mocy silnika stężenie tlenku węgla CO maleje. Tlenek węgla CO jest produktem spalania niezupełnego, a przez to przy niedostatku powietrza do spalania paliwa ma miejsce jego powstawanie. Dlatego przy wzroście mocy silnika tlenku węgla CO będzie coraz mniej. Również przy zwiększaniu prędkości wirnika wytwornicy spalin stężenie tlenku węgla CO będzie malało. Przy wyższych temperaturach tlenek węgla CO będzie się już utleniał do dwutlenku węgla CO_2 .

4. Emisja związków szkodliwych spalin okrętowych turbinowych silników spalinowych

4.1. Przepisy prawne dotyczące ochrony środowiska morskiego

Istnieje szereg aktów prawnych, które regulują ochronę środowiska morskiego. Podstawowym krajowym przepisem jest ustawa z dnia 16 marca 1995 r. o zapobieganiu zanieczyszczeniu morza przez statki. Ustawa ta stanowi m.in., że do zapobiegania zanieczyszczeniu morza przez statki stosuje się:

- 1) postanowienia następujących umów międzynarodowych, wraz ze zmianami obowiązującymi od daty ich wejścia w życie w stosunku do Rzeczypospolitej Polskiej, podanymi do publicznej wiadomości we właściwy sposób:
 - a) Międzynarodowej konwencji o zapobieganiu zanieczyszczeniu morza przez statki, 1973 r., sporządzonej w Londynie dnia 2 listopada 1973 r., zmienionej Protokołem uzupełniającym sporządzonym w Londynie dnia 17 lutego 1978 r. (Dz. U. z 1987 r. Nr 17, poz. 101) oraz Protokołem uzupełniającym sporządzonym w Londynie dnia 26 września 1997 r. (Dz. U. z 2005 r. Nr 202, poz. 1679), zwana „Konwencją MARPOL”,
 - b) Konwencji o ochronie środowiska morskiego obszaru Morza Bałtyckiego, sporządzonej w Helsinkach dnia 9 kwietnia 1992 r. (Dz. U. z 2000 r. Nr 28, poz. 346), zwana „Konwencją Helsińską 1992”,
 - c) Konwencji o zapobieganiu zanieczyszczeniu mórz przez zatapianie odpadów i innych substancji, sporządzonej w Moskwie, Waszyngtonie, Londynie i Meksyku dnia 29 grudnia 1972 r. (Dz. U. z 1984 r. Nr 11, poz. 46), zwana „Konwencją o zatapianiu”,
 - d) Międzynarodowej konwencji w sprawie kontroli szkodliwych systemów przeciwporostowych na statkach, podpisanej w Londynie dnia 5 października 2001 r. (Dz. U. z 2008 r. Nr 134, poz. 851), zwana „Konwencją AFS”;
- 1a) odpowiednio przepisy art. 5, art. 6 ust. 2 i 3, art. 7 i 8 ustawy z dnia 20 kwietnia 2004 r. o substancjach zubożających warstwę ozonową (Dz. U. z 2014 r. poz. 436), w zakresie eksploatacji na statkach urządzeń i instalacji zawierających substancje kontrolowane, w przypadku gdy niniejsza ustawa nie stanowi inaczej;
- 2) wspomniana wyżej ustawa z dnia 16 marca 1995 r.

4.2. Turbinowy silnik spalinowy a ochrona środowiska morskiego

Turbinowe silniki spalinowe o zastosowaniu morskim, ze względu na swoje właściwości, stanowią zaledwie kilkuprocentowy udział w całej populacji okrętowych silników spalinowych. Ze względów ekonomicznych (sprawność, zużycie paliwa) w zdecydowanej większości w układach napędowych i elektrowniach okrętowych jednostek pływających stosowane są tłokowe silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym. W związku z tym obowiązujące regulacje prawne dotyczące emisji związków szkodliwych w spalinach silników okrętowych dotyczą tylko silników tłokowych. Jednym z takich aktów prawnych jest wspomniana wcześniej Konwencja MARPOL.

W Tab. 1 przedstawiono normy emisji tlenków azotu dla okrętowych tłokowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym o mocy powyżej 130 kW w zależności od prędkości nominalnej silnika.

Tab. 1. Dopuszczalne wartości emisji jednostkowej NO_x dla okrętowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym wg Załącznika VI do Konwencji MARPOL 73/78 [8]

| Poziom emisji | Rok obowiązywania | Dopuszczalne normy emisji NO_x [g/(kWh)] w zależności od prędkości nominalnej silnika n [obr/min] | | |
|---------------|-------------------|--|--|---|
| | | silniki wolnoobrotowe $n < 130$ | silniki średnioobrotowe $n \leq 130 < 2000$ | silniki szybkoobrotowe $n \geq 2000$ |
| I | 2000 | 17,0 * | $45,0 \cdot n^{-0,2}$ * | 9,8 * |
| II | 2011 | 14,4 ** | $44,0 \cdot n^{-0,23}$ ** | 7,7 ** |
| III | 2016 | 3,4 *** | $9,0 \cdot n^{-0,2}$ *** | 2,0 *** |

* podane wartości dotyczą statków zbudowanych, albo tych, które przeszły modernizację po 1 stycznia 2000 r. a przed 1 stycznia 2011 r.,
** podane wartości dotyczą statków zbudowanych po 1 stycznia 2011 r.,
*** podane wartości dotyczą statków zbudowanych po 1 stycznia 2016 r. i uprawiają żeglugę w Północnoamerykańskim Obszarze Kontroli Emisji lub w Obszarze Morza Karaibskiego Stanów Zjednoczonych.

Wyłączeniem z przestrzegania norm emisji związków szkodliwych w spalinach są wszystkie silniki zastosowane na okrętach wojennych. Należy nadmienić, iż procentowa populacja turbinowych silników spalinowych zamontowanych na okrętach wojennych jest kilkakrotnie większa w porównaniu do floty cywilnej. Jednakże rządy państw posiadających floty wojenne dążą w miarę swoich możliwości do wdrażania przepisów dotyczących ochrony środowiska morskiego (np. Konwencji MARPOL) na okrętach wojennych.

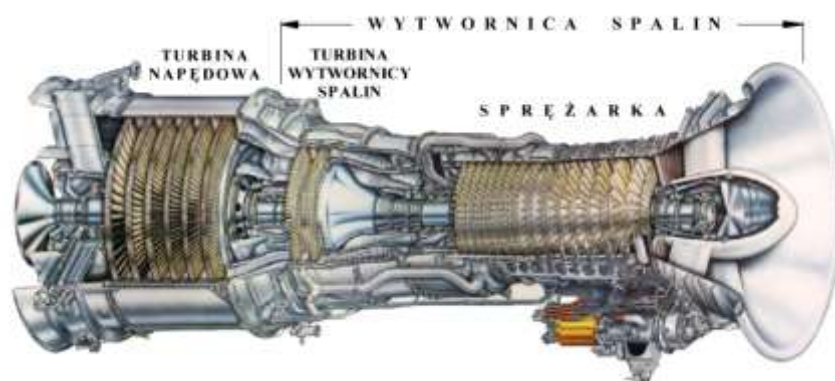
4.3. Przygotowanie do badań emisji związków szkodliwych spalin okrętowych turbinowych silników spalinowych

Niniejszym podjęto się próby określenia poziomu emisji związków szkodliwych w spalinach okrętowego turbinowego silnika spalinowego, zastosowanego w układzie napędowym okrętu wojennego klasy fregata raketowa (Rys. 5). Układ napędowy jednostki fregaty składa się z dwóch zespołów napędowych wyposażonych w turbinowe silniki spalinowe firmy General Electric typu LM 2500 (Rys. 6.), jednej zbiorczej przekładni redukcyjnej o przełożeniu 1/20, jednego wału śrubowego oraz śruby nastawnej. Moc układu napędowego wynosi około 30000 kW przy maksymalnej prędkości obrotowej turbin napędowych wynoszącej $n_{TN} = 3600$ obr/min. Turbinowe

silniki spalinowe zastosowane w układzie napędowym fregaty są zespołami dwuwirnikowymi. Podstawę konstrukcji takiego silnika stanowi wytwornica spalin, w której szesnastostopniowa sprężarka osiowa napędzana jest przez dwustopniową turbinę wysokiego ciśnienia. Proces ciągłego spalania odbywa się w pierścieniowej komorze spalania zasilanej paliwem przez trzydzieści dwa wtryskiwacze. Z wytwornicą spalin współpracuje sześciostopniowa oddzielna turbina napędowa stanowiąca źródło energii mechanicznej dla okrętowego układu napędowego.



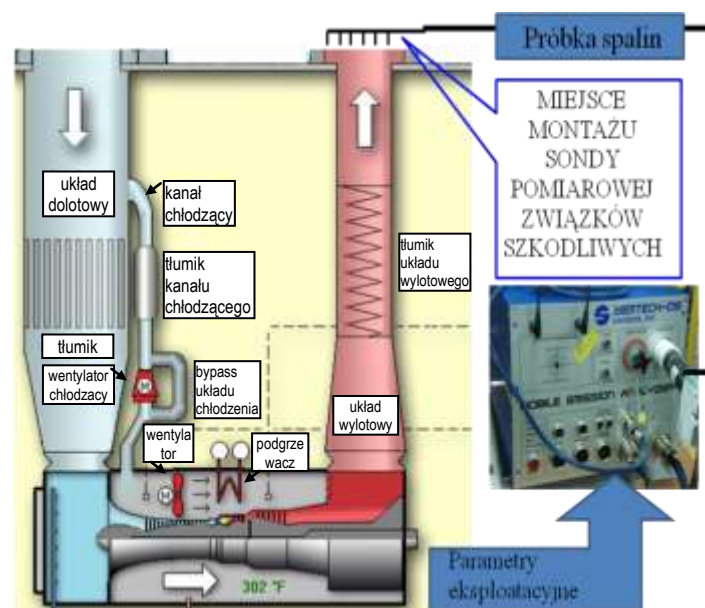
Rys. 5. Fregata raketowa klasy Oliver Hazard Perry [11]



Rys. 6. Okrętowy turbinowy silnik spalinowy typu LM 2500 [General Electric]

Przeprowadzona analiza konstrukcji układu wylotu spalin silnika LM 2500, zamontowanego na rozpatrywanym okręcie, umożliwiła podjęcie decyzji, iż najkorzystniejszym możliwym miejscem montażu sondy pomiarowej związków szkodliwych spalin będzie przekrój wyjściowy kanału wylotu spalin (Rys. 7).

Układ wylotu spalin posiada kilkunastometrowej długości pionowy kanał o średnicy ponad dwóch metrów, kończący się zwężeniem do średnicy około metra. Umożliwi to zastosowanie sondy pomiarowej pobierającej próbkę spalin z prawie całej długości średnicy zwężonego kanału. Pobrana próbka przesłana zostaje do analizatora spalin Semtech-DS. Jednocześnie dokonywane będą pomiary parametrów eksploatacyjnych pracy silnika. Sensory przenośnego analizatora gazów spalinowych Semtech-DS umożliwią pomiar emisji toksycznych związków tj. tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu oraz stężenia dwutlenku węgla w spalinach [5].



Rys. 7. Układ dolotowy powietrza i wylotowy spalin silnika LM 2500 zamontowanego na fregacie raketowej z zaznaczonym miejscem poboru próbki spalin oraz widokiem analizatora spalin Semtech-DS.

Jednoczesny pomiar i rejestracja wyselekcjonowanych parametrów eksploatacyjnych najbardziej charakteryzujących pracę silnika turbinowego LM 2500 zapewni przenośny system pomiarowo-rejestracyjny SENGAI0 661. Obecnie system jest w stanie mierzyć parametry pracy silnika przedstawione w Tab. 2.

Tab. 2. Parametry mierzone systemem SENGAI0 661

| Nr | Oznaczenie | Zakres pomiarowy | Opis parametru |
|----|------------|--|---|
| 1. | n_{GG} | $0 \div 12000 \text{ min}^{-1}$ | prędkość obrotowa wytwornicy spalin |
| 2. | n_{PT} | $0 \div 5000 \text{ min}^{-1}$ | prędkość obrotowa turbiny napędowej |
| 3. | p_1 | $0 \div 0,11 \text{ MPa}$ | ciśnienie powietrza na wlocie do sprężarki |
| 4. | p_2 | $0 \div 2,07 \text{ MPa}$ | ciśnienie powietrza na wylocie ze sprężarki |
| 5. | p_{42} | $0 \div 0,517 \text{ MPa}$ | ciśnienie spalin na wlocie do turbiny napędowej |
| 6. | T_1 | $-40 \div 65,6 \text{ }^\circ\text{C}$ | temperatura powietrza na wlocie do sprężarki |
| 7. | T_{42} | $0 \div 1090 \text{ }^\circ\text{C}$ | temperatura spalin na wlocie do turbiny napędowej |
| 8. | p_{pal} | $0 \div 104 \text{ MPa}$ | ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczami |

Istniejący obecnie poziom techniki pomiarowej związanej z badaniem emisji związków szkodliwych spalin co prawda umożliwi doraźne przeprowadzenie pomiarów emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach podczas rzeczywistych warunków realizowanego rejsu, ale ze względu na wysokie koszty aparatury pomiarowej nie jest możliwe prowadzenie rejestracji ciągłej poziomu emisji w/w związków. Badania tego typu pozwalają jednak określić poziom wartości emisji poszczególnych związków szkodliwych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji na podstawie analiz parametrów eksploatacyjnych zarejestrowanych przez okrętowe rejestratory

parametrów ruchu okrętu oraz pracy silników układu napędowego. Z wielu rejestrowanych przez rejestrator parametrów eksploatacyjnych kilka z nich może być wykorzystanych do analizy warunków eksploatacji okrętu, a w szczególności jego układu napędowego. Do oceny warunków eksploatacyjnych silnika turbinowego układu napędowego można wykorzystać zarejestrowane parametry przedstawione w Tab. 3.

Tab. 3. Wybrane parametry pracy układu napędowego okrętu klasy fregata FFG7

| Oznaczenie parametru | Jednostka | Nazwa parametru |
|----------------------|-----------|---|
| PLA | [%] | ustawienie dźwigni obciążenia silnika |
| $M_{\text{wał}}$ | [kN] | moment obrotowy na wale napędowym |
| M_{silnik} | [kN] | moment na wale wyjściowym silnika |
| $P_{\text{wał}}$ | [kW] | moc na wale napędowym |
| P_{silnik} | [kW] | moc na wale wyjściowym silnika |
| n_{GG} | [obr/min] | prędkość obrotowa wirnika wytwornicy spalin |
| n_{PT} | [obr/min] | prędkość obrotowa wirnika turbiny napędowej |
| n_{PR} | [obr/min] | prędkość obrotowa na wale wyjściowym przekładni redukcyjnej |
| n_{LW} | [obr/min] | prędkość obrotowa linii wału |
| h | [deg] | skok śruby |
| T_1 | [°C] | temperatura powietrza na wlocie układu dolotowego |
| T_2 | [°C] | temperatura powietrza na wlocie sprężarki |
| $T_{4.2}$ | [°C] | temperatura spalin na wlocie turbiny napędowej |
| T_5 | [°C] | temperatura spalin w kanale wylotowym |
| T_{fuel} | [°C] | temperatura paliwa zasilającego |
| p_2 | [bar] | ciśnienie powietrza na wlocie sprężarki |
| p_{CDP} | [bar] | ciśnienie powietrza na wylocie sprężarki |
| $p_{4.2}$ | [bar] | ciśnienie spalin przed turbiną napędową |
| p_{fuel} | [bar] | ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczami |

Przygotowując się do wykonania badań szczególną uwagę należy poświęcić możliwości instalacji sondy pomiarowej w strumieniu spalin wypływających z układu wylotowego spalin silników, umiejscowionego w górnej części nadbudówki okrętu. Analiza konstrukcyjna układu wylotu spalin silników LM 2500, zamontowanych na okręcie FFG-7, wykazuje konieczność wykonania i montażu w górnej części układu wylotowego spalin specjalnej konstrukcji nośnej, podtrzymującej sondę pomiarową związków szkodliwych. Przewody doprowadzające spaliny do analizatora powinny być zamocowane do zbudowanej konstrukcji wspornika, a analizator należy umieścić w bezpiecznej odległości od układu wylotowego spalin silnika.

Podsumowanie

O ile prawnym ograniczeniom emisji związków szkodliwych spalin poddane są lotnicze silniki turbinowe (zwłaszcza odrzutowe) [2], okrętowe turbinowe silniki spalinowe, wg stanu prawnego na dzień dzisiejszy, mają możliwość nieograniczonej emisji tych związków do środowiska. Niewielka populacja tego rodzaju silników stosowanych na jednostkach pływających ma co prawda stosunkowo niewielki udział w zanieczyszczaniu środowiska morskiego związkami

szkodliwymi w odniesieniu do wszystkich okrętowych maszyn spalinowych, jednakże należy podejmować kroki do ograniczania emisji tych związków dla każdej maszyny.

Zmienne warunki eksploatacji okrętów marynarek wojennych, a w związku z tym zmienne warunki eksploatacji silnika spalinowego układu napędowego okrętu, stanowią pewien problem na drodze do określenia ciągłej oceny emisji zanieczyszczeń spalin w takich warunkach eksploatacyjnych okrętu. W związku z tym podjęto próbę opracowania sposobu oceny emisji zanieczyszczeń spalin z turbinowych silników spalinowych okrętów wojennych w ich rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Działania te mogą przyczynić się do wprowadzenia narzędzia w postaci procedur realizacji testów emisyjnych i dopuszczalnych limitów szkodliwych składników spalin, co może się przyczynić do stymulacji rozwoju konstrukcji tego typu i zastosowania silników.

Proponowane badania emisji związków szkodliwych z okrętowego turbinowego silnika spalinowego w efekcie końcowym pozwolą określić emisję jednostkową (g/kWh) poszczególnych związków, a tym samym możliwe będzie wnioskowanie o dalszych krokach zmierzających do redukcji ilości emitowanych związków szkodliwych spalin do środowiska z tego rodzaju i zastosowaniu silnika spalinowego.

Bibliografia

- [1] Głowacki P., Szczeciński S., *Turbinowy silnik odrzutowy jako źródło zagrożeń ekologicznych*, Prace Instytutu Lotnictwa nr 213, Warszawa 2011.
- [2] Kotlarz W. red., praca zbiorowa, *Turbinowe zespoły napędowe źródłem skażeń powietrza na lotniskach wojskowych*, Wydawnictwo WSOSP, Dęblin 2003.
- [3] Kowalewicz A., *Podstawy procesów spalania*, WN-T, Warszawa 2000.
- [4] Markowski J., Pielecha J., Jasiński R., Ślusarz G., Wirkowski P., *Evaluation of relations operating and ecological parameters of turbine engines*, Journal of Polish CIMEEAC vol. 10 nr 1, Wydawnictwo PG, Gdańsk 2015.
- [5] Markowski J., Pielecha J., Jasiński R., Ślusarz G., Wirkowski P., Benedict P., *Ocena wpływu położenia punktu poboru spalin na wartość stężenia związków szkodliwych w strudze gazów wylotowych silnika odrzutowego*, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe nr 12/2016, Wydawnictwo „SPATIUM”, Radom 2016.
- [6] Merkisz J., Markowski J., Ślusarz G., Galant M., Karpiński D., Wirkowski P., *Analiza porównawcza testów emisji związków szkodliwych spalin silnika turbinowego*, Combustion Engines nr 162, Wydawnictwo PTNSS, Bielsko Biała 2015.
- [7] Merkisz J., Piaseczny L., Kniaziewicz T., *Zagadnienia emisji spalin silników okrętowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2016.
- [8] *Międzynarodowa konwencja o zapobieganiu zanieczyszczeniu morza przez statki, 1973/1978 MARPOL*, Wydawnictwo PRS, Gdańsk 2015.
- [9] Wirkowski P., Markowski J., Kniaziewicz T., *Ocena parametrów eksploatacyjnych okrętowego turbinowego silnika spalinowego w aspekcie emisji związków szkodliwych spalin*, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe nr 12/2016, Wydawnictwo „SPATIUM”, Radom 2016.
- [10] Wirkowski P., Markowski J., Kniaziewicz T., *Możliwość badania emisji związków szkodliwych w spalinach okrętowego turbinowego silnika spalinowego w warunkach eksploatacji*, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe nr 12/2017, Wydawnictwo „SPATIUM”, Radom 2017.
- [11] <https://www.google.pl/search?q=fregata+273>