

Bogdan Pojawa¹⁾

OCENA PRZYDATNOŚCI METODY ANALITYCZNEGO WYZNACZANIA SKŁADU SPALIN OKRĘTOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań mające na celu opracowanie metody oceny procesu spalania z wykorzystaniem równań stechiometrycznych. Dzięki tej metodzie istnieje możliwość wyznaczenia składu oraz ilości spalin powstających w procesie spalania paliwa o znanym składzie chemicznym dla dowolnego obciążenia silnika. W artykule przedstawiono również wyniki sprawdzenia adekwatności wyników otrzymanych na podstawie opracowanej metody z wynikami pomiarów zarejestrowanych podczas badań przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym okrętowego tłokowego silnika spalinowego Sulzer 6AL20/24.

Słowa kluczowe: badania symulacyjne, okrętowy silnik spalinowy, stechiometria spalania.

WSTĘP

W procesie eksploatacji okrętowych silników spalinowych ciągle aktualną jest potrzeba oceny procesu spalania w aspekcie emisji szkodliwych dla środowiska naturalnego produktów spalania oraz efektywności energetycznej [1, 2, 3, 4]. Potrzebę dokonywania bieżących w eksploatacji ocen w tym zakresie, wymuszają obowiązujące uregulowania prawne w zakresie efektywności energetycznej oraz ochrony środowiska [1, 2].

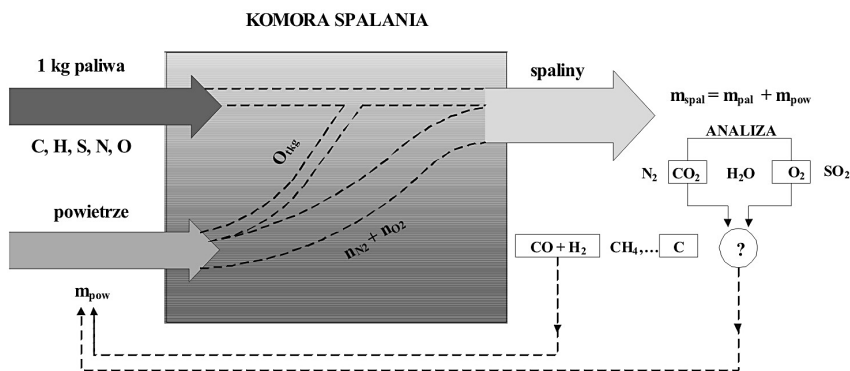
Pomiary emisji związków szkodliwych spalin w warunkach eksploatacji siłowni okrętowej są procesem złożonym oraz wymagającym kosztownej aparatury pomiarowej [4]. Z tego też powodu, w bieżącej eksploatacji siłowni okrętowej, powyższe badania są rzadko wykonywane. Z uwagi na powyższe podjęto się badań mających na celu opracowanie analitycznej metody, pozwalającej w sposób przybliżony oraz dostępny w warunkach siłowni okrętowej, wyznaczenia składu oraz ilości spalin. Podstaw teoretycznych do oceny procesu spalania dostarczają równania stechiometryczne [10, 11]. Pozwalają one na określenie niezbędnej ilości tlenu (powietrza) do spalania oraz ilości powstających produktów spalania występujących przy spalaniu jednostki ilości składników palnych paliwa.

¹⁾ Akademia Marynarki Wojennej, e-mail: b.pojawa@amw.gdynia.pl

OPRACOWANIE METODY ANALITYCZNEGO WYZNACZANIA SKŁADU ORAZ ILOŚCI SPALIN

Obiektem rozważań termodynamicznych w procesie spalania jest komora spalania, do której doprowadza się dwa strumienie substratów (paliwo i utleniacz), a odprowadza się strumień spalin [7, 9]. W celu maksymalnego wykorzystania paliwa pod względem energetycznym dąży się do spalania zupełnego (spalanie na produkty niepalne) i całkowitego (brak stałych składników palnych) [7, 9, 10]. Spalanie niezupełne może być spowodowane niedostateczną ilością powietrza doprowadzonego do spalania, niedoskonałym wymieszaniami paliwa z powietrzem lub brakiem czasu na ukończenie reakcji chemicznej [7, 10, 11].

Znajomość składu elementarnego paliwa i wykorzystanie bilansu ilości substancji głównych pierwiastków biorących udział w procesie spalania, pozwala na opracowanie analitycznej metody oceny stechiometrycznej procesu spalania, która pozwoli określać ilość oraz skład produktów spalania [6, 7, 8, 9, 12]. Stechiometryczna kontrola procesu spalania polega na pomiarowym sprawdzeniu, w jakich proporcjach chemicznych komorę spalania opuszczają dostarczone do niej w paliwie węgiel C i wodór H. Powinny to być związki CO_2 i H_2O , ale często występują również CO , H_2 , CH_4 , sadza C, lotny koksik jak i inne węglowodory, które świadczą o niezupełności procesu spalania [7]. Schemat stechiometrycznej kontroli procesu spalania przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat stechiometrycznej kontroli procesu spalania [7]

Bilans ilości substancji opiera się na składzie chemicznym paliwa. Na podstawie bilansu wyznacza się ilość tlenu i powietrza, które są potrzebne do spalania zupełnego i całkowitego danego rodzaju paliwa oraz ilość spalin, która powstaje w procesie spalania. Skład chemiczny paliw wyznaczany jest na podstawie laboratoryjnej analizy elementarnej [7, 9, 10, 11]. Aby zapewnić spalenie całej ilości doprowadzonego paliwa, przy niedoskonałym jego wymieszaniami z powietrzem, rzeczywista ilość powietrza L , powinna być większa od ilości teoretycznej L_p , określonej

na podstawie równań stechiometrycznych. Decyduje o tym współczynnik nadmiaru powietrza λ [7, 9, 10, 11]. Współczynnik nadmiaru powietrza zależy od warunków spalania oraz stopnia rozdrobnienia paliwa. Ma on duże znaczenie praktyczne, ponieważ przyjmując wartości różne od jedności prowadzi do obniżenia temperatury spalania i do związanych z tym strat zachodzących przy $\lambda < 1$ (spalanie niezupełne), a przy $\lambda > 1$ zwiększeniem ilości spalin. Spalanie z zachowaniem współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1$ nazywa się spalaniem mieszanki stechiometrycznej [6, 7, 8, 10, 12].

Założenia upraszczające

Do opracowania analitycznej metody wyznaczania składu oraz ilości spalin przyjęto następujące założenia upraszczające:

- z uwagi na to, że w silowniach okrętowych stosowane jest wyłącznie paliwo ciekłe, przy opracowywaniu przedmiotowej metody ograniczono się do rozpatrywania tylko paliw ciekłych;
- skład paliwa stosowanego do zasilania okrętowych silników spalinowych, przyjęto na podstawie danych otrzymanych od producenta paliwa grupy Lotos S.A. w Gdańsku. Do dalszych badań przyjęto następujący masowy skład paliwa: 86,3% C, 13,2% H, 0,3% S i 0,2 N;
- skład spalin nie zależy od temperatury i ciśnienia, metoda nie uwzględnia tym samym procesu dysocjacji oraz kontrakcji;
- metoda dotyczy dwóch przypadków:
 - spalania zupełnego paliw ciekłych ($\lambda \geq 1$);
 - spalania niezupełnego paliw ciekłych ($\lambda < 1$).
- w pierwszym przypadku, przy spalaniu zupełnym ($\lambda \geq 1$) zakłada się, że powstałe spaliny składają się z następujących składników [10, 11]:
 - przy $\lambda = 1$ z CO_2 , H_2O , N_2 , SO_2 ;
 - przy $\lambda > 1$ z CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 , SO_2 .
 Do wyznaczenia składu oraz ilości spalin wykorzystano równania stechiometryczne, przedstawiające zależności między ilościami reagentów i produktów spalania [7, 10, 11].
- w drugim przypadku, kiedy spalanie jest niezupełne ($\lambda < 1$) zakłada się, że powstałe spaliny składają się z następujących składników [10, 11]: CO_2 , CO , H_2O , H_2 , N_2 , SO_2 .
 W przypadku spalania niezupełnego ilość wodoru występująca w spalinach jest proporcjonalna do ilości tlenku węgla [10, 11]. W związku z powyższym w równaniach stechiometrycznych należy uwzględnić współczynnik proporcjonalności k , zgodnie z równaniem:

$$n_{H_2} = kn_{CO} \quad (1)$$

Współczynnik proporcjonalności k nie zależy od współczynnika nadmiaru powietrza, a jedynie zależy od stosunku zawartości wodoru do węgla w paliwie. Na podstawie danych doświadczalnych można przyjąć [10]:

$$\text{dla } \frac{H}{C} = 0,17 - 0,188, \quad k = 0,45 - 0,55; \quad (2)$$

$$\text{dla } \frac{H}{C} = 0,13, \quad k \approx 0,30. \quad (3)$$

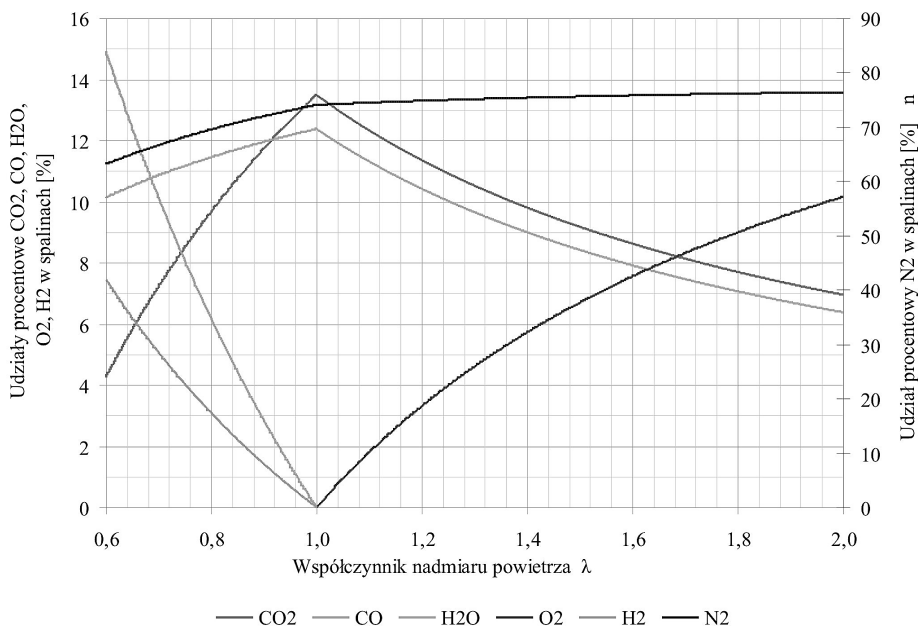
Znając skład chemiczny rozpatrywanego paliwa, przy stosunku $H/C = 0,15$, do dalszych obliczeń w równaniach stechiometrycznych przyjęto współczynnik proporcjonalności o wartości $k = 0,30$.

- z uwagi na wysokie wartości temperatur i ciśnień spalin występujących w przypadku pracy rzeczywistego obiektu badań, w obliczeniach uwzględniono jedynie spaliny wilgotne;
- wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ występującego w równaniach stechiometrycznych wyznacza się na podstawie wartości wyznaczonego teoretycznego zapotrzebowania powietrza L_t i zmierzonego rzeczywistego zapotrzebowania powietrza L ;
- metoda pozwala wyznaczać teoretyczne zapotrzebowanie tlenu (powietrza) do spalania, skład i ilość spalin w odniesieniu do 1 kg rozpatrywanego paliwa. W celu wyznaczenia wartości powyższych wielkości odpowiadających warunkom rzeczywistym należy dysponować możliwością pomiaru zużycia paliwa.

Wyniki badań symulacyjnych

Przyjmując powyższą metodę obliczeń, dla znanego składu rozpatrywanego paliwa, wyznaczono teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania, ilość i skład spalin wilgotnych w zakresie wartości współczynnika nadmiaru powietrza $0,6 < \lambda \leq 2$. Dysponując wynikami obliczeń ilości i składu spalin odniesionych do 1 kg paliwa o znanym składzie, możliwe jest wyznaczenie objętościowego lub masowego składu spalin wilgotnych. Procentowy skład objętościowy spalin wilgotnych dla współczynnika nadmiaru powietrza w zakresie $0,6 < \lambda \leq 2$ przedstawia rysunek 2.

Na podstawie przebiegów przedstawionych na rysunku 2 można stwierdzić, że dla współczynnika nadmiaru powietrza λ poniżej jedności w spalinach wilgotnych występuje N_2 , CO_2 , CO , H_2 i H_2O . Wraz ze zmniejszaniem się wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ wzrasta udział CO i H_2 , natomiast maleje udział H_2O , N_2 i CO_2 . W przypadku, gdy współczynnika nadmiaru powietrza λ wzrasta, zwiększa się udział O_2 i N_2 , a zmniejsza H_2O i CO_2 .



Rys. 2. Skład objętościowy spalin wilgotnych w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza w zakresie $0,6 < \lambda \leq 2$

Z badań doświadczalnych wynika, że podczas spalania w okrętowych silnikach spalinowych w warunkach rzeczywistych, pomimo współczynnika nadmiaru powietrza większego bądź równego jedności występuje w spalinach niewielka ilość CO (~0,5%, a w przypadku złego wymieszania paliwa z powietrzem nieco więcej). Nawet przy spalaniu niezupełnym znajduje się w produktach spalania niewielka ilość tlenu (~0,5%), co tłumaczone jest rozpadem powstającego przy wysokich temperaturach *NO*. Niezależnie od wartości współczynnika nadmiaru powietrza spaliny zawierają (0,2 – 0,3%) węglowodorów, głównie metanu (*CH₄*) oraz śladowe ilości *SO₂* [10, 11].

BADANIE ADEKWATNOŚCI OPRACOWANEJ METODY

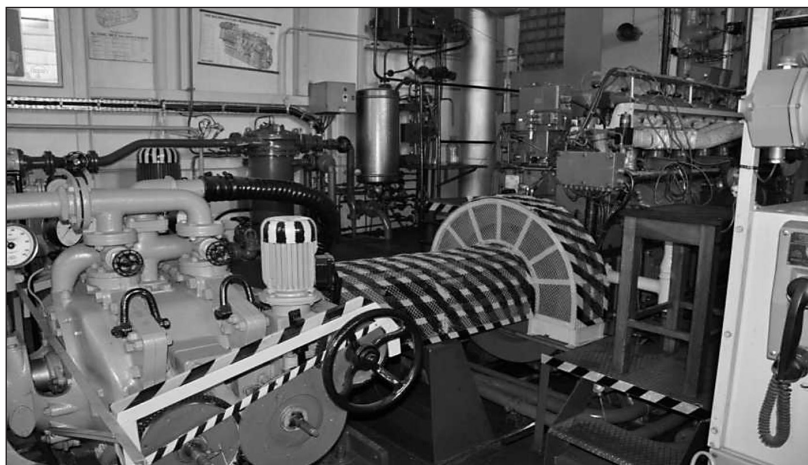
Badanie adekwatności miało na celu przeprowadzenie analizy merytorycznej wyników badań, polegającej na logicznej ocenie analitycznie otrzymanych wartości składu i ilości spalin wilgotnych z wartościami zmierzonymi, uwzględniającymi zjawiska zachodzące w badanym obiekcie.

Do przeprowadzenia badań wybrano stanowisko laboratoryjne okrętowego tłokowego silnika spalinowego Sulzer 6A120/24. Stanowisko to znajduje się w Laboratorium Eksploatacji Siłowni Okrętowych, Wydziału Mechaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej. Silnik Sulzer 6A1 20/24 jest nienawrotnym, 4-suwowym

silnikiem wysokoprężnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa, doładowaniem przy pomocy turbosprężarki i chłodzeniem powietrza doładowującego o mocy 420 kW. Posiada sześć cylindrów pracujących w układzie rzędownym. Odbiornikiem energii zastosowanym na stanowisku laboratoryjnym jest hamulec wodny Froude'a typu DPY6D [5]. Widok stanowiska laboratoryjnego silnika 6A120/24 przedstawia rysunek 3.

Podczas badań dokonano pomiaru wielkości fizycznych niezbędnych do przeprowadzenia weryfikacji opracowanej metody. Pomiarów dokonano podczas pracy na obciążeniach ustalonych rozpatrywanego obiektu badań, w zakresie od obciążenia minimalnego do maksymalnego, z zachowaniem stałej nastawy listwy paliwowej. Wyniki pomiarów przedstawia tabela 1. Pomiaru emisji głównych składników spalin wilgotnych dokonano przy pomocy następujących analizatorów:

- analizatorów elektrochemicznych (ECS): Testo 350 i Testo 360;
- analizatora płomieniowo-jonizacyjnego (H-FID): FIA – 326 DK THC firmy HORIBA.



Rys. 3. Widok stanowiska laboratoryjnego okrętowego tłokowego silnika spalinowego Sulzer 6A120/24

Na podstawie powyższych wyników pomiarów dokonano obliczeń ilości i składu spalin, zgodnie z algorytmem opracowanej metody, dla współczynników nadmiaru powietrza i zużycia paliwa zarejestrowanych podczas badań. W celu ujednoczenia jednostek dla poszczególnych składników spalin oraz sprowadzenia do normalnych warunków atmosferycznych, dokonano ich przeliczenia zgodnie z zależnością [13]:

$$conc = \frac{m}{m_v} \cdot \frac{T_0}{T_{ot}} \cdot \frac{p_{ot}}{p_0} \cdot \frac{conc(ppm)}{10^6} \left[\frac{g}{m^3} \right] \quad (4)$$

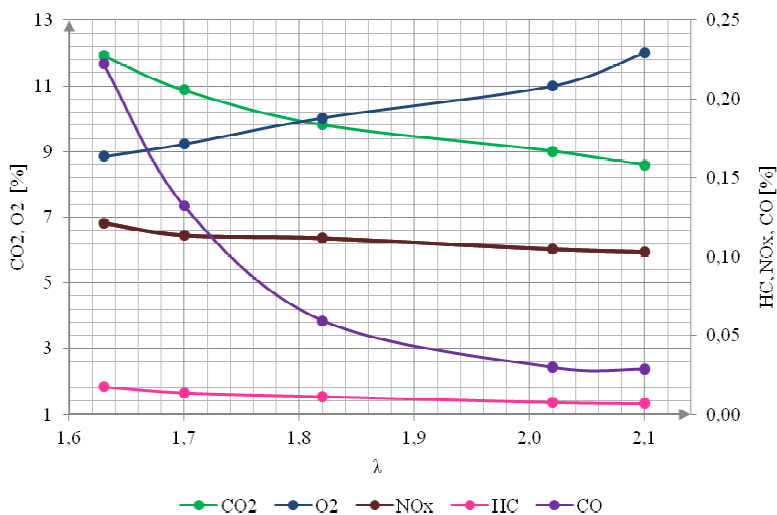
gdzie: m – masa cząsteczkowa; m_v – objętość molowa; T_0 – temperatura odniesienia; T_{ot} – temperatura otoczenia; p_0 – ciśnienie odniesienia; p_{ot} – ciśnienie otoczenia; $conc(ppm)$ – koncentracja.

Tabela 1. Wyniki pomiarów wielkości fizycznych zarejestrowanych dla ustalonych stanów pracy silnika Sulzer 6AL20/24 w zakresie od obciążenia minimalnego do maksymalnego

Arkusz pomiarowy													
Lp.	Wartości uśrednione												
	n [obr/min]	m_{pal} [kg]	t [s]	\dot{V}_{pow} [m ³ /kg]	T_{spal} [K]	p_{ot} [hPa]	T_{ot} [°C]	CO_2 [%]	CO [ppm]	O_2 [%]	HC [ppm]	NO_x [ppm]	I [-]
1.	350	0,38	30,00	553,20	810,66	1018,00	19,60	8,38	2454,46	8,56	123,60	1249,20	1,63
2.	500	0,50	30,00	892,90	808,35	1018,50	21,10	7,68	1466,60	8,96	97,10	1447,40	1,70
3.	600	0,57	30,00	1277,90	807,08	1018,70	22,30	6,96	661,90	9,77	80,85	1160,00	1,82
4.	700	0,59	30,00	1698,40	666,40	1001,80	21,40	6,48	335,10	10,87	55,55	1104,00	2,02
5.	750	0,62	30,00	1967,30	654,89	1001,00	23,20	6,22	323,76	11,94	50,27	1093,00	2,10

Tabela 2. Procentowy masowy udział poszczególnych składników w spalinach wilgotnych, dla ustalonych stanów pracy badanego silnika

Lp.	CO_2 [%]	O_2 [%]	CO [%]	HC [%]	NO_x [%]
1.	11,93	8,86	0,22	0,02	0,12
2.	10,88	9,23	0,13	0,01	0,11
3.	9,82	10,03	0,06	0,01	0,11
4.	9,02	11,00	0,03	0,01	0,10
5.	8,60	12,00	0,03	0,01	0,10

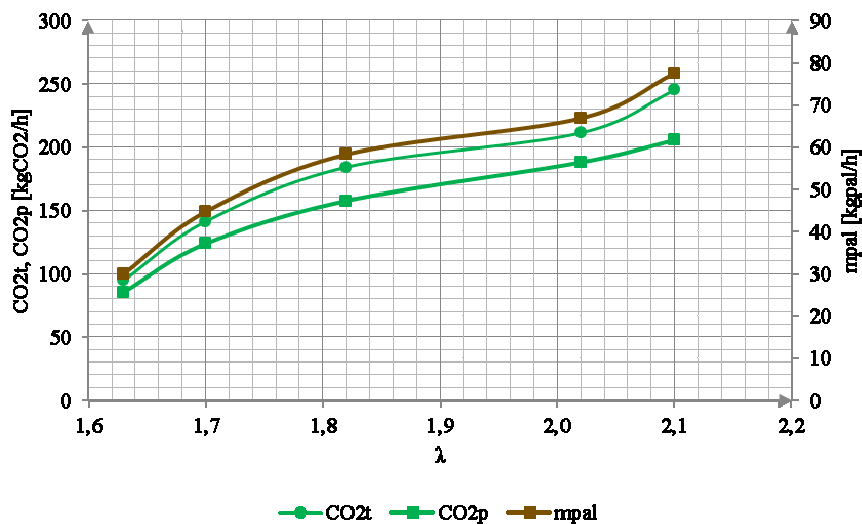


Rys. 4. Zależności procentowego masowego udziału poszczególnych składników w spalinach wilgotnych od współczynnika nadmiaru powietrza λ

Procentowe masowe udziały poszczególnych składników w spalinach wilgotnych, zarejestrowane podczas badań, przedstawiono w tabeli 2, natomiast na rysunku 4 przedstawiono zależność tych udziałów od współczynnika nadmiaru powietrza λ .

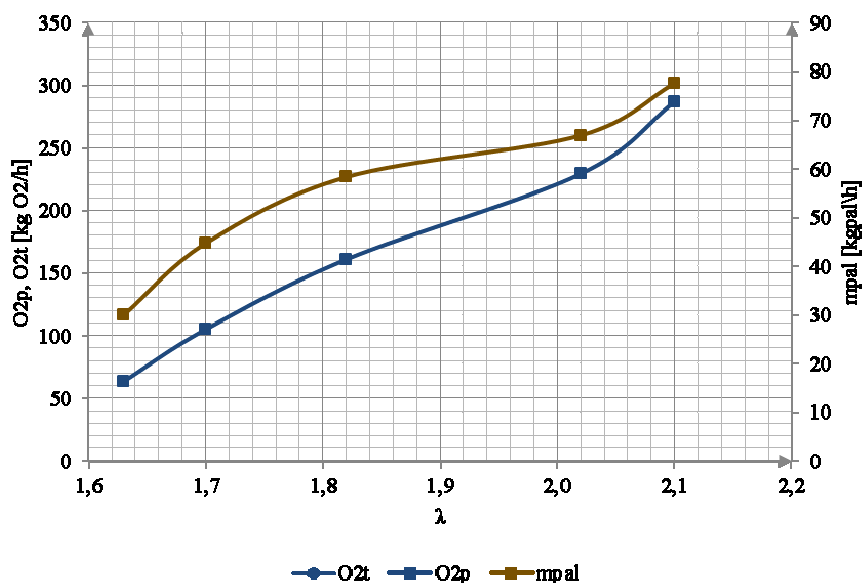
Na podstawie przebiegów przedstawionych na rys. 4 można stwierdzić, że skład spalin wilgotnych określony podczas badań zawiera śladowe ilości CO , HC i NO_x w porównaniu z ilością CO_2 i O_2 . Wraz ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza λ udział poszczególnych składników w spalinach wilgotnych maleje, za wyjątkiem O_2 , którego udział wzrasta. Charakter rozpatrywanych zależności zbliżony jest do liniowego, za wyjątkiem CO , którego zależność ma charakter nieliniowy. Charakter powyższych zależności zgodny jest z przebiegiem zależności otrzymanych na podstawie opracowanej metody.

Przystępując do weryfikacji opracowanej metody należy dokonać porównania ilości poszczególnych składników zawartych w spalinach, wyznaczonych na podstawie obliczeń teoretycznych, z wynikami pomiarów zarejestrowanych podczas badań. Aby tego dokonać należy wyniki obliczeń teoretycznych, przemnożyć przez strumień paliwa oraz podzielić przez strumień spalin zarejestrowany podczas badań wstępnych, na poszczególnych ustalonych obciążeniach silnika. Z uwagi na to, że obliczenia teoretyczne dla $\lambda > 1$ nie uwzględniają występowania w spalinach NO_x , HC oraz CO , porównania dokonano jedynie dla CO_2 i O_2 . Porównanie teoretycznego (wyznaczonego dla strumienia paliwa z pomiaru) i pomiarowego natężenia emisji CO_2 i O_2 , w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Zależność natężenia emisji CO_{2t} (obliczeniowe) i CO_{2p} (pomiarowe) oraz \dot{m}_{pal} od współczynnika nadmiaru powietrza λ

Na podstawie przebiegów przedstawionych na rysunkach 5 i 6 można stwierdzić, że dla O_2 uzyskano dużą zgodność wyników otrzymanych z obliczeń z wartościami zarejestrowanymi podczas pomiaru. Jedyne dla CO_2 występuje rozbieżność około 10%. Powodem tego może być niedokładności pomiaru CO_2 lub niedokładność pomiaru zużycia paliwa przyjmowanego następnie do obliczeń. W celu utwierdzenia się co do poprawności wykonania obliczeń, dodatkowo dokonano sprawdzenia sumy natężenia emisji składników spalin wilgotnych. Do wyników uzyskanych z pomiaru dodano brakujące udziały składników spalin otrzymane z obliczeń. Obliczenia przeprowadzono osobno dla każdego obciążenia silnika, otrzymując zgodność sumy natężenia emisji składników spalin wilgotnych z błędem nie przekraczającym 1,5%. Podsumowując można stwierdzić, że opracowana metoda analitycznego wyznaczania składu oraz ilości spalin została opracowana poprawnie. Na uwagę zasługuje jednak fakt, że dokładność obliczeń w tej metodzie zależy od dokładności pomiaru zużycia paliwa i rzeczywistego zapotrzebowania powietrza do spalania.



Rys. 6. Zależność natężenia emisji O_{2t} (obliczeniowe) i O_{2p} (pomiarowe) oraz \dot{m}_{pal} od współczynnika nadmiaru powietrza λ

Oczywistym jest, że powyższe rozważania mają charakter teoretyczny ze względu na przyjęte założenia upraszczające. Sprawia to, że przedstawione wyniki nie mogą być dokładnym odzwierciedleniem rozpatrywanych zagadnień, a jedynie przybliżającą występującą w tych rozważaniach słuszną regułę. Możliwość przeprowadzenia pełnych badań adekwatności otrzymanych wyników obliczeń wymaga przeprowadzenia badań z zastosowaniem przyrządów do pomiaru wszystkich składników spalin oraz przyrządów do elektronicznej rejestracji strumienia masy paliwa. Nie mniej

jednak, przybliżony charakter obliczeń nie fałszuje przedstawionych zależności i może być wstępem do dalszych, bardziej wnikliwych badań.

WNIOSKI

W wyniku realizacji badań dokonano opracowania metody analitycznego wyznaczania składu oraz ilości spalin okrętowego silnika spalinowego. W celu weryfikacji opracowanej metody przeprowadzono badanie adekwatności. Wyniki przeprowadzonej analizy merytorycznej pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. Opracowana metoda pozwala w sposób pośredni wyznaczać skład oraz ilość spalin okrętowego silnika spalinowego na podstawie znanego składu i zużycia paliwa oraz rzeczywistego zapotrzebowania powietrza do spalania. Pozwala na wyznaczenie wszystkich składników spalin wilgotnych, w tym H_2O , N_2 i SO_2 , których stężenia zazwyczaj nie są mierzone przez analizatory spalin.
2. Opracowana metoda pozwala na analityczną ocenę procesu spalania w sposób przybliżony, ale z wystarczającą w aplikacjach inżynierskich dokładnością.
3. Wyniki analizy merytorycznej wskazują, że dokładność obliczeń uzależniona jest od dokładności pomiaru zużycia paliwa i rzeczywistego zapotrzebowania powietrza do spalania.
4. Istnieje możliwość wykorzystania opracowanej metody na potrzeby diagnostyki oraz dydaktyki w zakresie okrętowych tłokowych silników spalinowych.
5. Opracowana metoda może stanowić materiał wyjściowy do dalszych bardziej szczegółowych badań pod względem stechiometrycznej oceny procesu spalania w okrętowych silnikach spalinowych.

LITERATURA

1. Chłopek Z.: Ochrona środowiska naturalnego. WKiŁ, Warszawa 2002.
2. Merkiś J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych, tom 1. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
3. Piaseczny L., Chłopek Z.: Zastosowanie teorii planowania doświadczeń w badaniach ekologicznych właściwości silników spalinowych. Archiwum Motoryzacji, 2-3, 2002.
4. Piaseczny L.: Zastosowanie teorii planowania doświadczeń w badaniach okrętowych silników spalinowych. Zeszyty Naukowe AMW, Rok XLIV, nr 1 (152), 2003.
5. Piaseczny L., Zadrąg R.: Stanowisko do realizacji kompleksowych pomiarów cieplnych i do badania emisji związków toksycznych w spalinach wylotowych. Konferencja „Silniki w zastosowaniach wojskowych” SILWOJ'99, WAT-AMW, Jurata 1999.
6. Postrzednik S., Żmudka Z.: Termodynamiczne oraz ekologiczne uwarunkowania eksploatacji tłokowych silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.

7. Pudlik W.: Termodynamika. Wydawnictwo PG, Gdańsk 1998.
8. Staniszewski B.: Termodynamika. PWN, Warszawa 1982.
9. Szargut J.: Termodynamika. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
10. Wiśniewski S.: Podstawy termodynamiki silników spalinowych. WNT, Warszawa 1963.
11. Wiśniewski S.: Termodynamika techniczna. WNT, Warszawa 1999.
12. Witkowski K., Włodarski J. K.: Okrętowe silniki spalinowe. Podstawy teoretyczne. Wydawnictwo AM, Gdynia 2006.
13. Norma EN ISO 8178-1:1996 Silniki spalinowe tłokowe – pomiar emisji spalin.

UTILITY ASSESSMENT OF THE METHOD OF ANALYTICAL DETERMINING THE COMPOSITION OF MARINE ENGINE EXHAUST GASES

Abstract

The paper presents results of research aimed at developing methods for assessing the combustion process using stoichiometric equations. With this method it is possible to determine the composition and quantity of gases produced by combustion of fuel of known composition for any load. The article presents the results of checking the adequacy of the results obtained on the basis of this method with the results of the measurements recorded during the tests carried out on a laboratory marine engine Sulzer 6AL20/24.

Keywords: simulation research, marine engine, combustion stoichiometry.