

OKRĘTOWE SILNIKI TŁOKOWE - EKOLOGICZNE I EKONOMICZNE ROZWIĄZANIA TECHNICZNE

W artykule omówione zostały metody i konstrukcje ochrony środowiska morskiego oraz na podstawie doświadczenia eksploatacyjnego przedstawiono ich zalety i wady.

WSTĘP

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój konstrukcji silników okrętowych tłokowych o zapłonie samoczynnym. Był on spowodowany głównie poprawieniem ich sprawności i efektywności. Gwałtowny rozwój floty zwrócił uwagę na zagrożenia zanieczyszczenia środowiska morskiego przez statki. Ostatnim ratyfikowanym załącznikiem Konwencji o zapobieganiu zanieczyszczenia morza przez statki Marpol 73/78 był załącznik VI Dotyczący zanieczyszczenia atmosfery [17]. Wprowadzenie tego prawa w życie spowodowało daleko idące zmiany w budowie i oprzyrządowaniu silników, zmianę składu paliwa i olejów smarowych, stosowanie wielu dodatkowych urządzeń i obsługujących je systemów [14,15]. Ekologiczna eksploatacja silnika powoduje wzrost zużycia paliwa oraz podnosi koszty eksploatacyjne

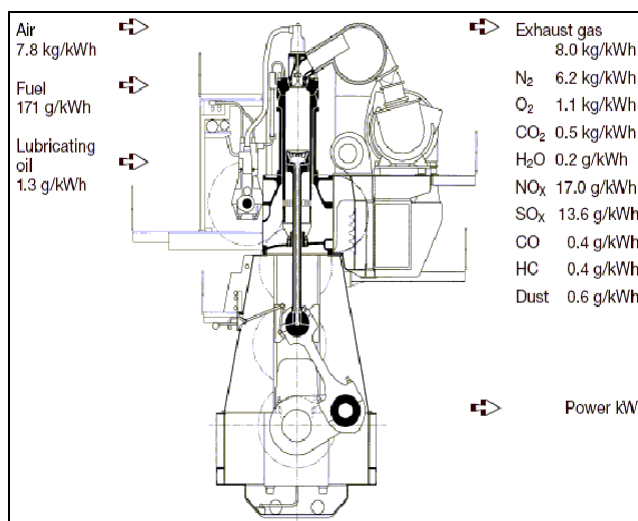
1. KONCEPCJA EKOLOGICZNEGO SILNIKA

Od kilku lat producenci silników tworzą silniki bardziej przyjazne środowisku naturalnemu [4]. W zależności od cech konstrukcyjnych grupują rozwiązania techniczne silników według tzw. „Enviro Engine Concept”. Standardem są silniki spełniające kolejne wymogi IMO Tier II i III ujęte w konwencji MARPOL 73/78 [14, 15].

Wprowadzane są systemy zarządzania siłownią [9, 11, 12] oraz prowadzone są badania nad doskonaleniem systemów diagnostycznych silnika. Ma to ograniczyć ilość spalane go paliwa jak i prowadzić bardziej racjonalną eksploatację silnika [5, 6, 10].

Coraz większą uwagę przykładą się do badania drgań i hałasu mających wpływ na stan techniczny silników, urządzeń siłowni i statku jak i stan psychofizyczny załogi [7, 8]. Przyczynia się do tego rozwój technologii, ale równocześnie od załóg wymaga się coraz wyższych kompetencji załogi, w tym oficerów mechaników okrętowych [4].

Na podstawie doświadczeń i obliczeń opracowano typowy skład gazów wylotowych w zależności od rodzaju paliwa i ilości powietrza i paliwa w mieszance paliwowo-powietrznej (rys. 1.).

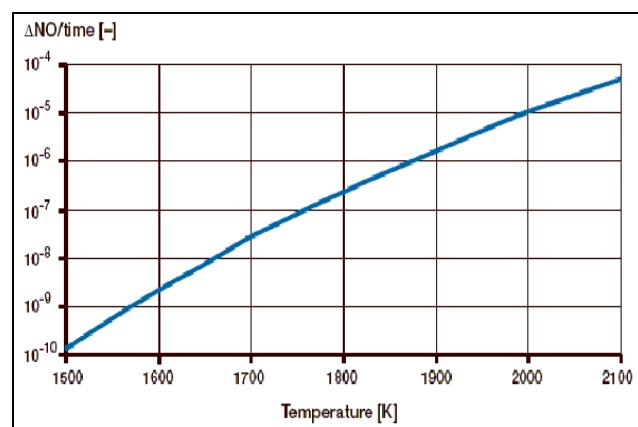


Rys. 1. Skład gazów wylotowych w zależności od ilości powietrza i paliwa w mieszance paliwowo-powietrznej [2]

Zmieniono konstrukcję silnika, dokonano zmian w wtrysku paliwa oraz zoptymalizowano proces spalania osiągając tzw. technologię niskiego poziomu emisji tlenków azotu („Low-NO_x Combustion Technology” (rys.2.) [2, 19].

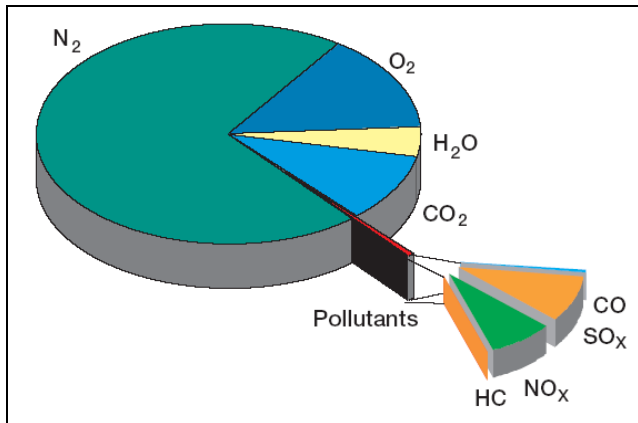
Spowodowało to obniżenie zużycia paliwa w przedziale niskich obciążeń - 10-30% mocy nominalnej N_n .

Na rys. 2. Przedstawiono wykres tworzenia się NO_x w zależności od temperatury [2]



Rys. 2. Tworzenia NO_x w zależności od temperatury [2]

Ilość szkodliwych związków znajdujących się w gazach wylotowych jest relatywnie mała (rys. 3), jednak w przeliczeniu na moc silników stwarza poważne zagrożenie



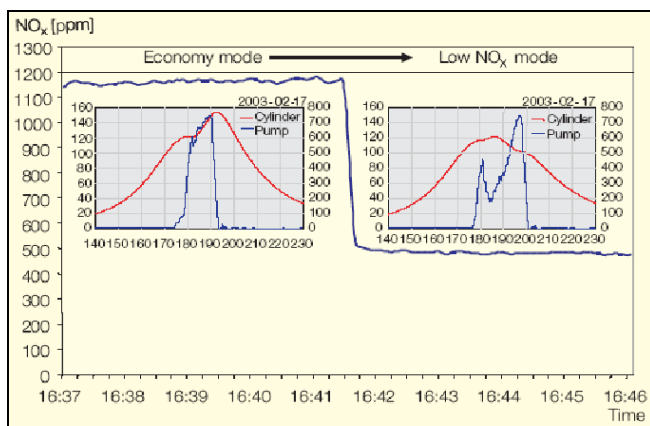
Rys. 3. Skład typowych gazów wylotowych [2]

Prace badawcze pozwoliły wypracować rozwiązania ograniczające emisję szkodliwych związków chemicznych. Dzieli się te metody na pierwotne i wtórne.

2. PIERWOTNE METODY OGRANICZENIA EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ

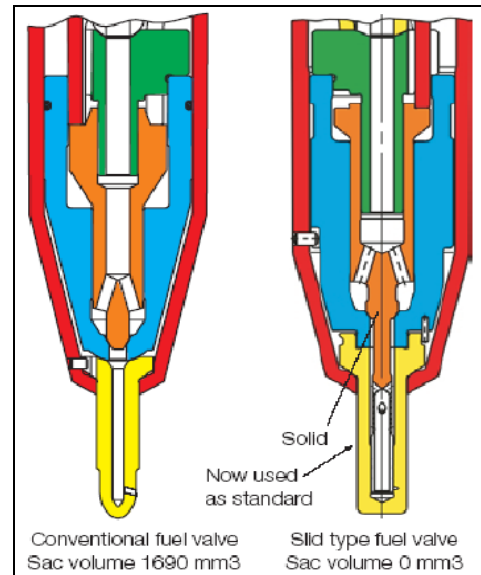
Do metod „pierwotnych” zaliczono rozwiązania mające wpływ na proces spalania i ograniczające ilość powstających zanieczyszczeń. Równocześnie rozwiązania te mają zapewniać spełnienie wymagań stawianych przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO) i przepisy USA (EPA) dotyczących poziomu emisji zanieczyszczeń.

1. Zmiany dotyczące technik opóźnienia czasu wtrysku takich jak klasyczny dzisiaj VIT w silnikach o rozrządzie mechanicznym typu MC, czy przy typie ME „zmiana trybu pracy silnika”. Metoda „VIT” umożliwia zmianę czasu wtrysku w ograniczonym zakresie. Metoda „zmiana trybu pracy silnika” stosowana w silnikach o rozrządzie elektronicznym typu ME pozwalają w szerszym zakresie na sterowanie czasem wtrysku oraz dawką paliwa. Umożliwia również sterowanie procesem spalania w całym zakresie obciążenia silnika (rys. 4).



Rys. 4. Opóźnienie czasu wtrysku w silniku typu ME przy wyborze odpowiedniego trybu pracy silnika [1, 18]

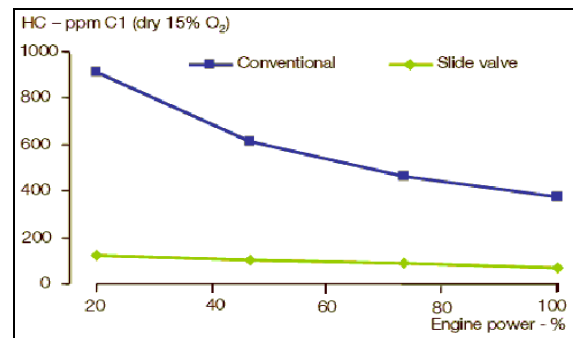
2. Zmiany konstrukcyjne: zawór wtryskowy nowej generacji - zawór suwakowy (rys. 5).



Rys. 5. Porównanie budowy zaworów wtryskowych: konwencjonalnych i suwakowych nowej generacji [1]

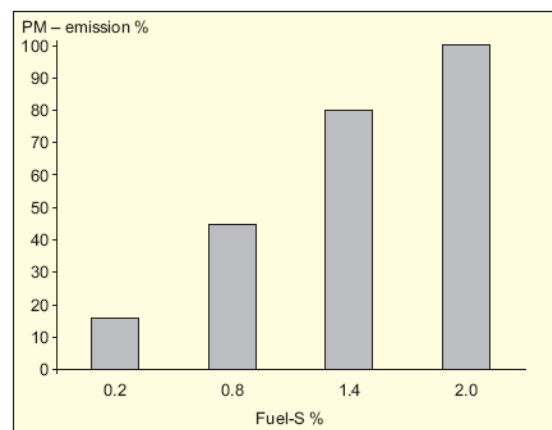
Zawory nowej generacji po zamknięciu nie „magazynują” zbędnego paliwa, które wyciekając z zaworu powodowało powstawanie cząstek stałych oraz koksowanie końcówki wtryskiwacza.

Zależność ilości cząstek stałych powstających przy użyciu konwencjonalnego zaworu wtryskowego paliwa i zaworu suwakowego, nowej generacji przedstawia rysunek 6.



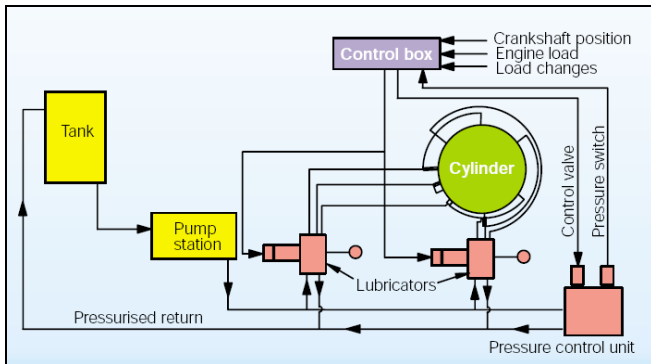
Rys. 6. Porównanie ilości cząstek stałych powstających przy użyciu konwencjonalnego zaworu wtryskowego paliwa i zaworu suwakowego, nowej generacji [1]

Rodzaj wtryskiwacza ma również wpływ na ilość cząstek stałych powstających w procesie spalania paliwa ciężkiego o dużej zawartości siarki ($S > 2\%$) (rys. 7).



Rys. 7. Wpływ zawartości siarki w paliwie na ilość cząstek stałych w spalinach [1, 18]

- ACC system smarowania tulei cylindrowych - metoda ograniczenia emisji cząstek stałych przez dostosowanie ilości cylindrowego oleju smarowego zarówno do obciążenia silnika, jak i do zawartości siarki w paliwie. Schemat ACC przedstawiono na rysunku 8.



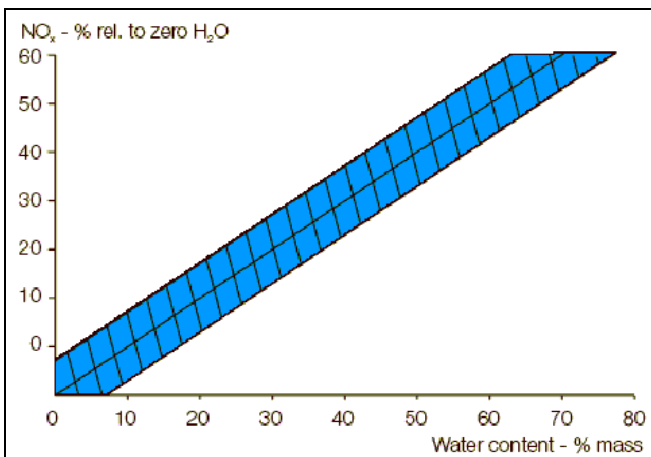
Rys. 8. Schemat systemu ACC [14, 15]

Cząstki stałe mają szkodliwy wpływ na zdrowie, równocześnie powoduje zużycie pierścieni cylindrowych, tulei, rowków pierścieniowych tłoka oraz zapiekanie się pierścieni.

3. WTÓRNE METODY OGRANICZENIA EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ

Do metod wtórnych zaliczono metody umożliwiające obniżenie emisji szkodliwych związków poniżej poziomu wymaganego przez prawo międzynarodowe.

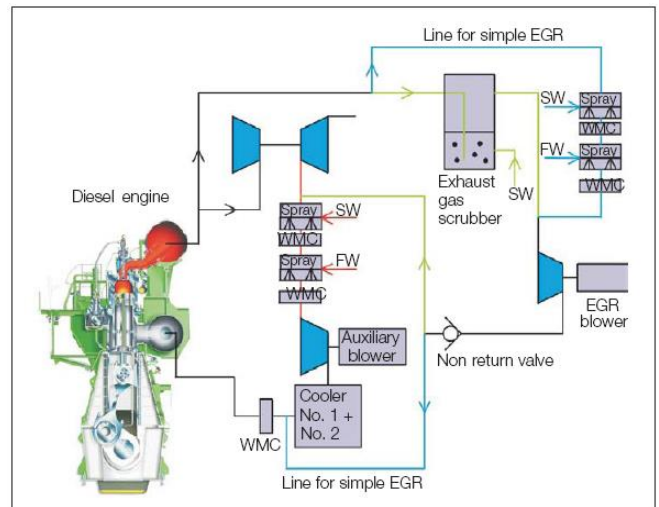
- FWE - emulsja paliwowo wodna umożliwia redukcję NO_x o 20-50% w zależności od udziału wody. Instalacja FWE jest stosowana standardowo na statkach pływających w strefach wymagających tylko „niewidzialnego dymu” [2], np. wody Alaski. Na rysunku 9. przedstawiono zależność redukcji NO_x do udziału wody w emulsji paliwowo-wodnej. Wraz ze wzrostem ilości wody, rośnie równocześnie lepkość emulsji. Wymaga to podniesienia temperatury emulsji do 170°C przy 50% wody oraz podniesienia ciśnienia w instalacji emulsyjnej. Woda użyta w procesie powinna być wodą destylowaną i uzdatniona chemicznie, żeby uniknąć korozji wanadowej.



Rys. 9. Zależność redukcji NO_x do udziału wody w emulsji paliwowo-wodnej [1]

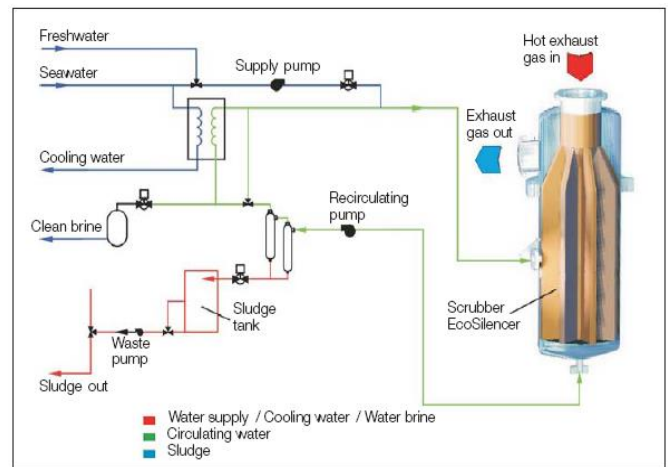
- EGR i HAM - redukcja NO_x następuje przez obniżenie maksymalnej temperatury spalania w wyniku doprowadzenia do komory spalania gazów (para wodna i spaliny), mające wyższe ciepło

właściwe niż powietrze. Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 10.



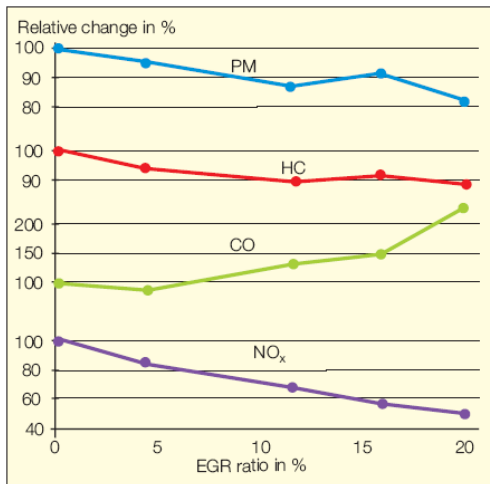
Rys. 10. Schemat instalacji EGR-HAM [1]

W celu ochrony instalacji, można zastosować oczyszczanie gazów spalinowych. Proces oczyszczania spalin można realizować w zaawansowanej technicznie płuczce (rys. 11.), która powoduje wzrost kosztów eksploatacyjnych lub może też być stosowana prosta instalacja EGR, użycie której wiąże się ze zwiększonymi kosztami eksploatacyjnymi związanymi z większym zużyciem części silnika i obniżeniem niezawodności.

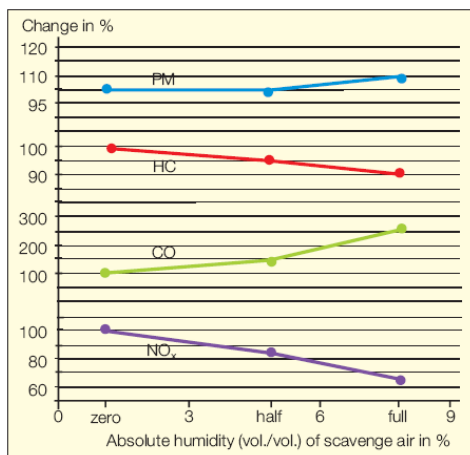


Rys. 11. Efektywna, skomplikowana technicznie płuczka firmy DME [1]

Trwają prace badawcze mające na celu zwiększenie efektywności systemów EGR i HAM oraz zastosowania ich razem w instalacji, ponieważ żadna z nich nie redukuje wszystkich zanieczyszczeń. Wpływ działania EGR i HAM na emisję szkodliwych związków pokazano na rysunkach 12. i 13.

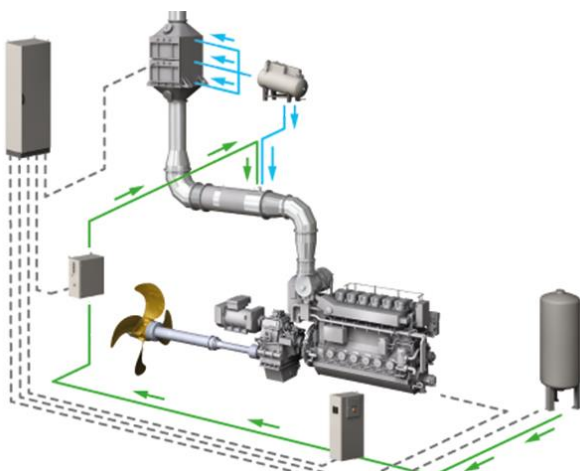


Rys. 12.. Wpływ EGR na zmianę ilości emitowanych zanieczyszczeń [1]



Rys. 13. Wpływ wilgotnego powietrza na zmianę ilości emitowanych zanieczyszczeń [1]

3. SCR - jest najbardziej skuteczną, zewnętrzną metodą ograniczającą emisję NO_x (85-95%) (rys. 14.), jednak wymaga największych kosztów inwestycyjnych. Duża zawartość siarki w paliwie powoduje szybkie zużycie SCR. Nie powoduje zwiększenia zużycia paliwa. Wymienione rozwiązania wymagają precyzyjnego sterowania. Pracą silnika we wszystkich opisanych wariantach sterują zintegrowane systemy zarządzania „inteligentnym silnikiem”.



Rys. 14. Schemat instalacji SCR [1, 18]

4. KOMBINACJE KILKU METOD OGRANICZAJĄCYCH EMISJĘ SZKODLIWYCH ZWIĄZKÓW

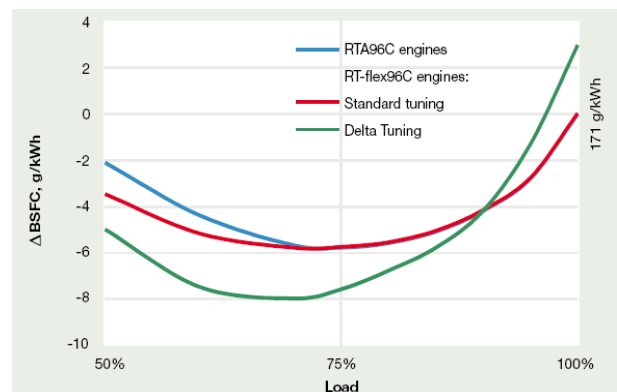
Nie ma uniwersalnej metody ograniczającej emisję wszystkich szkodliwych składników spalin, więc zastosowano kombinacje kilku metod. Dobierając metody dostosowujące silniki okrętowe do wymogów stawianych przez IMO oraz inne Organizacje światowe.

Podział emisji zależy od przyjętego kryterium. Jednym z nich jest podział pod względem źródła powstawania zanieczyszczeń:

- głównie z powietrza: NO_x,
 - głównie z paliwa: CO₂, SO_x, HC, CO, dym, cząstki stałe.
- Wyznaczono stopnie możliwości eliminowania zanieczyszczeń:
- całkowity wpływ na eliminację - NO_x,
 - częściowy wpływ na eliminację - SO_x, dym,
 - brak wpływu na eliminację - CO₂, HC, CO.

Wyznaczając zależności tworzenia NO_x od temperatury (rys. 2) oraz obliczając temperatury stechiometrycznego spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrze, jak i sprężonego powietrza w zależności od kąta obrotu wału korbowego, dokonano podziału metod ograniczania NO_x w zależności od temperatury oraz koncentracji tlenu.

Zastosowanie programu „Delta Tuning”, który jest alternatywnym do „Standard Tuning” programem zarządzania pracą silnika RT-flex w zakresie obciążeń do 75% znacznie obniżającym zużycie paliwa. Możliwy do zastosowania tylko przy użyciu systemu CR. Należy zaznaczyć, że zarówno „Delta Tuning” jak dwa inne programy przedstawione na rysunku 15. spełniają normy ekologiczne IMO [16].



Rys. 15. Nowy program obciążenia silnika „Delta Tuning” pozwalający na ograniczenie zużycia paliwa i spełnienia wymogów ekologicznych IMO [16]

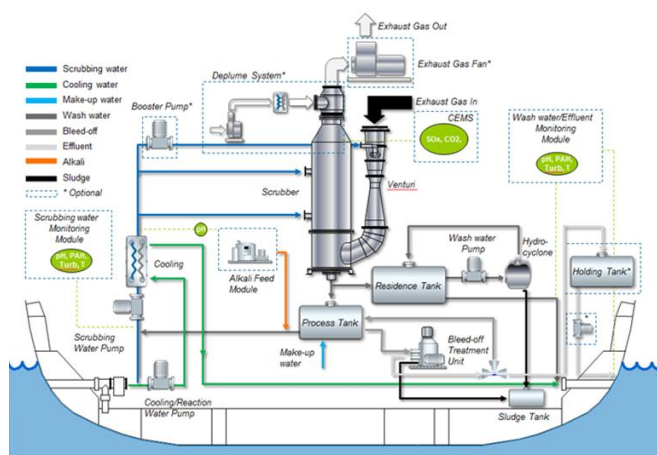
Najnowszymi przepisami ograniczającymi szkodliwe związki chemiczne w spalinach jest porozumienie krajów UE mówiące, że na wodach Bałtyku, Morza Północnego i Kanalu La Manche (obszar SECA) limit siarki w paliwie od 1 stycznia 2015 r. został obniżony do 0,1 proc. Planuje się obniżenie siarki w paliwie do 0,5 % do 2020 r.[17].

Siarka, która wchodzi w skład paliwa okrętowego podczas procesu spalania tworzy tlenki siarki (SO_x). Są one usuwane ze spalin różnymi metodami.

Tak zwany mokry system oczyszczania tzw. skrubler (ang. scrubber), w którym spaliny przepływają przez mgłę wodną, która pochłania cząsteczki siarki. Skrubery mogą być zaprojektowane jako system otwarty, system zamknięty, lub połączenie hybrydowe obu tych systemów.

System otwarty oznacza, że woda morska, która posiada naturalne właściwości pochłaniania i neutralizowania SO_x jest rozpylana w skruberze, a następnie odprowadzana z powrotem za burtę. W

systemie zamkniętym woda krąży w zamkniętym obiegu, jednak musi być uzdatniana za pomocą środków chemicznych.



Rys. 16. System odsiarczania firmy Wartsila [19]

W tak zwanym suchym systemie oczyszczania spalin stosowane są suche absorbery np. granulki wodorotlenku wapnia, do pochłaniania SO_x . Końcowym produktem jest gips, który jest zdawany go na ląd.

Wadą obu typów technologii oczyszczania spalin jest duża przestrzeń, którą zajmują na statku i duży dodatkowy ciężar, który może w sumie wynosić do kilkuset ton. Skrubery suche są cięższe i zajmują więcej miejsca niż skrubery typu mokrego. Instalowanie skrubierów na statkach będących już w eksploatacji stwarza dużo problemów technicznych.

PODSUMOWANIE

Na podstawie badań stworzono i zastosowano kombinacje metod ograniczenia emisji NO_x :

- metoda „Low- NO_x tuning” - jest to standard dla silników okrętowych sterowanych elektronicznie i polega na:
 - zwiększeniu ciśnienia sprężania,
 - opóźnieniu czasu wtrysku,
 - modyfikacji czasu otwarcia zaworów wylotowych.

Zastosowanie metody „Low- NO_x tuning” obniżającej emisję NO_x o 5% poniżej limitu IMO, powoduje wzrost zużycia paliwa o 2-3 g/kWh.

- metoda „Low- NO_x injection” - możliwa do zastosowania tylko dla silników o rozrządzie elektronicznym polega na:
 - wtrysku sekwencyjnym (rys.47),
 - dostosowanego ciśnienia wtrysku,
 - dostosowanego czasu wtrysku.

Zastosowanie metody „Low- NO_x injection” umożliwiającej ograniczenie emisji o 20% poniżej limitu IMO powoduje wzrost zużycia paliwa do 4 g/kWh.

- metoda „Kombinacja systemu RT-flex i WFE” - w zależności od obciążenia system sterowania Rt-flex dostosowuje ilość i skład emulsji paliwowo-wodnej.

Kombinacja umożliwia obniżenie emisji NO_x o 30% poniżej limitu IMO przy wzroście zużycia paliwa o 6 g/kWh.

- kombinacja WaCoReG z recykulacją spalin - zastosowanie w nowych silnikach typu RT-flex i wymaga współdziałania:
 - EGR - wewnętrznej recykulacji gazów wylotowych sterowana zaworem upustowym i współpracująca z turbosprężarką o małej wydajności,
 - DWI - bezpośredniego wtrysku wody obniżającej temperaturę komory spalania,

- RT-flex - technologia CR i zmienny czas otwarcia zaworów wylotowych umożliwiający sterowanie EGR.

WaCoReG umożliwia redukcję emisji NO_x do 70% poniżej limitu IMO przy wzroście zużycia paliwa o 5 g/kWh.

Najsukuteczniejszą metodą ograniczenia NO_x jest SCR. Nie wymaga także znacznego zwiększenia zużycia paliwa. Metoda ta może być stosowana tylko przy paliwach o małej zawartości siarki, która niszczy katalizator. Wysoki jest także koszt inwestycyjny (40.000-60.000 \$/MW oraz koszt eksploatacyjny (2,25 \$/MWh) i koszt konserwacji (0,5 \$/MWh).

Podobnie jest z ograniczeniem emisji związków siarki. Trwają badania nad projektami już istniejących (skrubery) i nowych urządzeń służących do oczyszczania spalin z SO_x , a najsukuteczniejszą metodą jest stosowanie paliwa beziarkowego lub o ograniczonej do 0,1 % S w paliwie.

Firmy Wartsila i MAN, producenci silników typu Sulzer RT-flex i ME, prowadzą prace badawcze nad koncepcją „ekologicznego statku”, którego istotnym elementem jest silnik napędu głównego łączący efektywność z ochroną środowiska. Prowadzą badania nad nowymi paliwami ciekłymi i gazowymi oraz nad możliwością użycia energii ze źródeł alternatywnych do paliwa węglowodorowego [3,13].

BIBLIOGRAFIA

1. Emission Control, MAN B&W Two-Stroke Low-Speed Diesel Engines. MAN B&W Diesel A/S, Kopenhaga 2004.
2. Geist M., Holtbecker A.: Technology Review, Exhaust emission reduction technology for Sulzer marine diesel engines: general aspects. Wartsila NSD Switzerland Ltd., Winterthur 1998.
3. Łosiewicz Z., Analiza przydatności innowacyjnych źródeł energii do napędów urządzeń w zastosowaniu morskim, jako rozwiązań alternatywnych do napędów zasilanych paliwami węglowodorowymi, Logistyka Nr 3/2015.
4. Łosiewicz Z.: Wpływ czynnika ludzkiego na bezpieczną eksploatację statku w aspekcie różnych faz życia statków, Technika Transportu Szynowego Nr 12/2015.
5. Łosiewicz Z.: Przykładowe uszkodzenia na statkach morskich spowodowane drganiami – w aspekcie stochastycznych warunków eksploatacyjnych i ich wpływ na bezpieczeństwo statku, Technika Transportu Szynowego Nr 12/2015.
6. Łosiewicz Z.: Zbiory parametrów diagnostycznych do identyfikacji stanów technicznych okrętowego tłokowego silnika spalinowego, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe Nr 6/2016.
7. Łosiewicz Z. Banaszek A.: Węzły funkcjonalne okrętowego silnika spalinowego wolnoobrotowego wodzikowego jako źródła drgań, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe Nr 6/2016, s. 986-988.
8. Łosiewicz Z., Cioch W., Drgania na statku morskim – W aspekcie bezpieczeństwa eksploatacyjnego, Technika Transportu Szynowego Nr 12/2015.
9. Łosiewicz Z., Kamiński W., Practical Application of Ship Energy Efficiency Management Plan, Logistyka Nr 3/2014.
10. Łosiewicz Z., Nikończuk P., Królikowski T.: Ogólna koncepcja neuronowego systemu eksperckiego identyfikacji stanu technicznego okrętowego silnika głównego, Logistyka Nr 3/2014, s.3987-3991.
11. Łosiewicz Z. Kamiński W.: Analiza ryzyka jako element proaktywnego systemu zarządzania bezpieczeństwem eksploatacji statków morskich, Logistyka Nr 6/2014, s.765-768.

12. Łosiewicz Z., Kamiński W.: "Zarządzanie ryzykiem" w kompaniach żeglugowych w świetle obowiązujących wymagań prawnych, Logistyka Nr 6/2014, s.875-878.
13. Łosiewicz Z., Kaup M., Analiza innowacyjnych rozwiązań napędów stosowanych na jednostkach śródlądowych w aspekcie zrównoważonego rozwoju transportu, Logistyka Nr 6/2014.
14. ME Engine. The only Engine with Fully Integrated Electronic Control. Kopenhaga, MAN B&W Diesel AS, 2003.
15. ME Engine - the New Generation of Diesel Engines. MAN B&W Diesel AS, Kopenhaga 2003.
16. Weisser G.: Wider choice in fuel consumption for Sulzer engines. Marine News No 3-2004, Wartsila Corporation, Helsinki 2004.
17. www.imo.org.uk
18. www.marine.man.eu
19. www.wartsila.com

Maritime diesel engines

- ecological and economic technical solutions

Paper discussed the the methods and structures of protection of the marine environment and on the basis of operational experience, their advantages and disadvantages are presented.

Autorzy:

mgr inż. Tadeusz Mikuła
TM ENGINES TADEUSZ MIKUŁA
Gdańsk
e-mail: mikulat@poczta.fm