

Wpływ obciążenia silnika turbinowego GTD-350 na emisję jednostkową związków szkodliwych spalin.

1. Teoretyczne podstawy pracy turbinowych silników spalinowych.

1.1.Prawo Bernoulliego.

Prawo Bernoulliego jest podstawowym prawem mechaniki płynów. Prawo Bernoulliego wyjaśnia zachowanie zjawisk zachodzących cieczy poprzez bilansowanie energii kinetycznej i potencjalnej cieczy oraz pracy objętościowej (która jest równa energii ciśnienia) wykonanej przez ciecz [5].

Warto w tym przypadku wyjaśnić jeszcze trzy ważne terminy: energii kinetycznej, energii potencjalnej oraz energii ciśnienia. Energia kinetyczna to taka energia, która równa się pracy, którą należy wykonać, aby przesunąć ciało o niezerowej masie, a więc nadać mu prędkość liniową lub kątową względem danego układu odniesienia. Wzór na energię kinetyczną przyjmuje następującą postać [5]:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Gdzie:

E_k – energia kinetyczna,

M – masa ciała,

V – prędkość liniowa lub kątowa.

Energia potencjalna z kolei to energia, równa pracy, która jest potrzebna do podniesienia ciała o masie niezerowej na wysokość powyżej poziomu zerowego. W przypadku silników okrętowych energia ta nie odgrywa znaczenia w przypadku jednostek nawodnych, ale jest bardzo ważna dla łodzi podwodnych. Energia potencjalna wyraża się wzorem [5]:

$$E_p = m \cdot g \cdot z$$

Gdzie:

m - masa ciała,

g – przyspieszenie grawitacyjne (nominalnie $9,81 \text{ m/s}^2$),

z – wysokość.

Energia ciśnienia jest to energia, która jest zgromadzona w cieczy wskutek wykonywania na niej pracy objętościowej. Energia ciśnienia jest tym wyższa, im wyższe jest ciśnienie i objętość cieczy. Energię ciśnienia wyraża wzór [5]:

$$E_v = p \cdot V$$

Gdzie:

P – ciśnienie cieczy,

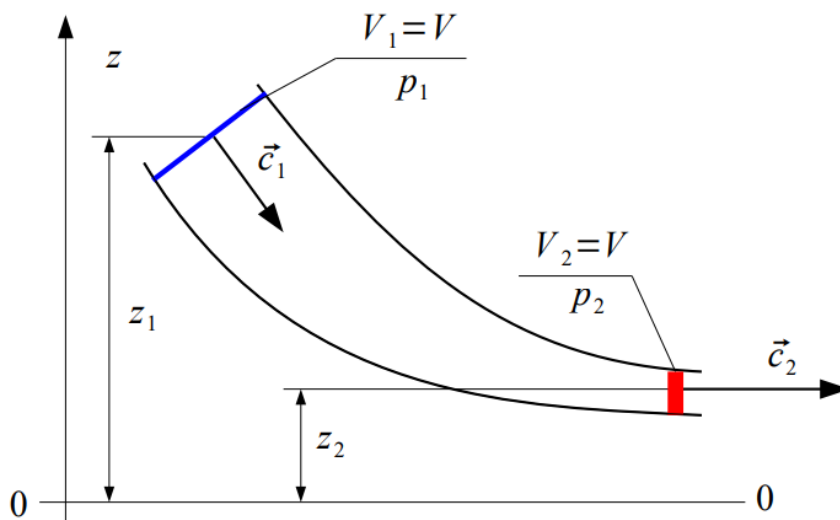
V – objętość cieczy.

Według prawa Bernoulliego bilansowanie energii kinetycznej, potencjalnej i ciśnienia cieczy opiera się na założeniu, że wszystkie one razem zawsze stałe ($\sum E = const$, co oznacza, że postać wzoru oparta na tym założeniu również wygląda następująco [5]:

$$\sum E = E_k + E_p + E_c = const.$$

Przykład działania prawa Bernoulliego pokazuje poniższa rycina:

Rycina. Ruch cieczy z założeniem zmiany wysokości i położenia (wznoszenie i przyjęcie prędkości liniowej cieczy.



Źródło: [5]

Na powyższej rycinie oznaczono prędkość innym skrótem (c zamiast v) natomiast wykres opisuje ruch cieczy, w którym konsekwencją jest zmiana położenia wskutek działania energii kinetycznej, zmiana wysokości z z_1 do z_2 . Tor, po którym porusza się ciecz zwęża się, a zmiana wysokości na tym torze oznacza, że ciecz zmniejsza wysokość położenia. Wyjaśniając to prawem Bernoulliego ciecz ma przez cały czas tę samą energię, ma także tę samą objętość, natomiast zmienia się:

- Prędkość, spada ona z wartości c_1 do c_2 ,
- Ciśnienie wzrasta z wartości p_1 do p_2 .

Oznacza to, że ciecz w równaniu Bernoulliego ma wciąż tyle samo energii, ale wykonuje ruch, ponadto jej prędkość zwiększa się. Ma to szczególne znaczenie do wprawiania cieczy (wody morskiej, wody słodkiej) w ruch przez pracę śruby napędowej.

Prawo Bernoulliego opisuje także wodę otaczającą statek. Woda ta również spełnia warunki zawarte w równaniu Bernoulliego. Dlatego też, gdy masy wody morskiej, które pozostają w ciągłym ruchu i mają określoną zachowaną energię będącą skumulowaną postacią energii potencjalnej, kinetycznej i energii ciśnienia (pracy objętościowe), statek jako ciało stałe unoszące się na wodzie zatrzymuje ruch wody. Wtedy woda reaguje z powierzchnią ciała wywierając ciśnienie dynamiczne, a więc dochodzi do działania siły dynamicznej wody na statek [7].

Równanie Bernoulliego jest wykorzystywane do kalkulacji oporów R wywieranych na kadłub statku, poprzez bezwymiarowe wskaźniki oporu C . Siła działająca na statek, której źródłem jest woda wyrażana jest wzorem [7]:

$$K = \frac{1}{2} \rho V^2 A_s$$

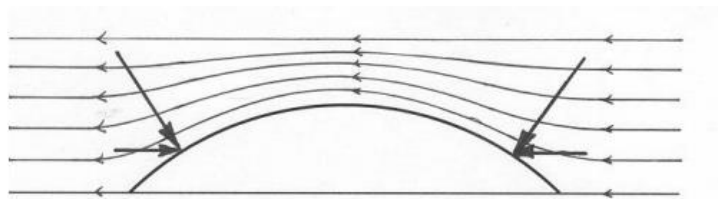
Gdzie:

A_s – powierzchnia kadłuba zakryta przez wodę.

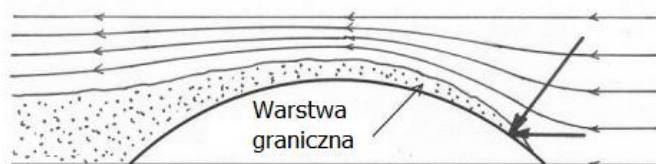
W związku z tym prawo Bernoulliego służy do opisanego oporu tarcia, jaki wywiera na statek woda. Poza tym na statek wywierają wpływ: opór rezydualny i opór powietrza. Opór rezydualny odpowiada za opór z generowania fal na powierzchni wody oraz opór ciśnienia wynikającego z poziomu lepkości cieczy. Opór tarcia wywierany przez wodę na sylwetkę statku jest także związany z cechami budowy kadłuba statku [7].

Ciśnienie wynikające z lepkości wody jest generowane wówczas, gdy cząsteczki cieczy (wody) przylegają do ciała zanurzonego tworząc warstwę graniczną. Brak ciśnienia wynikającego z lepkości cieczy jest osiągalny tylko w cieczach idealnych (nielepkich). Poniżej znajduje się rycina opisująca przepływ wody względem ciała zanurzonego w sytuacji nielepkości (ciecz idealna) i w sytuacji działania ciśnienia wynikającego z lepkości cieczy (ciecz rzeczywista).

Rycina. Ruch cieczy względem ciała zanurzonego w cieczy idealnej i rzeczywistej.



RUCH W CIECZY IDEALNEJ (NIELEPKIEJ)



RUCH W CIECZY RZECZYWISTEJ

Źródło: [7].

Warto też zwrócić uwagę na charakter samego przepływu ciecży względem ciała zanurzonego (okrętu), ponieważ może on także przybierać różne formy zależnie od panujących warunków. W tym przypadku głównymi zjawiskami odpowiedzialnymi za te przepływy są: wiatr (prędkość, siła wiatru, prędkość zwykła, prędkość podmuchu wiatru), wartość ciśnienia atmosferycznego i zmiany tego ciśnienia, energia cieplna wód i jej dystrybucja, zetknięcia się mas wód o różnej temperaturze, zetknięcia się mas powietrza o różnej temperaturze lub ciśnieniu. Wraz ze wzrostem siły wiatru, a także sytuacjami, w których dochodzi do gwałtownych przemian termodynamicznych dochodzi do zmiany przepływu ciecży. Przepływ ciecży w warunkach normalnych jest przepływem laminarnym, z kolei w przypadku gdy zostaje on wzburzony jest to przepływ turbulentny. Podane cechy przepływu ciecży względem ciała zanurzonego wpływają na opory, w tym wartość oporów tarcia [8].

1.2.Prawo strumienia masy.

Prawo strumienia masy należy wyjaśnić najpierw zaczynając od prezentacji i omówienia równania zachowania masy. Uzupełnia on rozważania na temat wpływu mas wodnych na opory i pracę układu napędowego okrętu, które powyżej wyjaśniona o zagadnienie

zachowania energii. Równanie zachowania masy mówi, że jeżeli pewna objętość płynna $\tau(S)$ jest złożona z tych samych elementów to masa zawarta w danej objętości również nie ulega zmianie [9].

Zachowanie masy przyjmuje postać całkową we wzorze [9]:

$$\int_{\tau(S)} \frac{\rho}{t} \rho \tau + \int_{S(\tau)} \rho \vec{u} \cdot \vec{n} DS = 0$$

Miarę przepływu jest strumień płynu, a więc strumień masy lub objętości. Strumień masy opisuje wzór [9]:

$$\dot{M} = \bar{v} \bar{U}_n \bar{S}$$

Strumień masy inaczej masowe natężenie przepływu opisuje określoną masę płynu przepływającego przez określoną powierzchnię w danej jednostce czasu. Wyrażany jest w kg/s [9].

W postaci objętościowej, mówi się o strumieniu objętości, który opisuje objętość płynu, który przepływa określoną powierzchnię w określonym czasie i wyraża się go jednostką m³/s [9].

W prawie strumienia masy można zaobserwować także pewne zjawiska, które trudno zobaczyć na wodach o bardzo dużej objętości i przepływające na bardzo dużych powierzchniach. Przede wszystkim chodzi tutaj o zagadnienie ściśliwości i nieściśliwości płynów oraz ich związku z ciśnieniem płynów. Ściśliwość płynów jest bardzo ograniczona, dlatego też przyjmuje się, że przepływ płynów jest przede wszystkim nieściśliwy. W warunkach przepływu w przewodach, płyn, który jest nieściśliwy płynie szybciej, gdy przewód jest ułożony umożliwiając zmianę wysokości (obniżenie wysokości, spadek), albo gdy element napędowy (śruba) wykonuje pracę i przez to wywiera ciśnienie na płyn (albo w pompach ciśnienie powietrza). Ponieważ ciśnienie to nie jest w stanie ścisnąć płynu (zmniejszyć jego objętości), płyn zaczyna się poruszać w przewodzie. Dzięki ciśnieniu wywieranemu przez element napędowy lub pompę płyn porusza się przez przewód przy różnych warunkach zmiany wysokości (stała wysokość,

spadek wysokości, wzrost wysokości), przy wzroście wysokości prędkość jednak spada ze względu na ciążenie grawitacyjne. Może mieć to znaczenie w warunkach eksperymentalnych obciążania silników, gdy pracują z wałem napędowym napędzającym śrubę zanurzoną w wodzie.

Z racji powyżej przedstawionych zagadnień trzeba również omówić to, że silniki są układami termodynamicznymi, ponieważ służą one do zamiany energii zawartej w paliwie w energię mechaniczną i ciepło. Nawet w idealnym silniku według drugiej zasady termodynamiki nie można zamienić całej energii paliwa w energię mechaniczną, zawsze występuje odpad ciepły. Dodatkowo odpad ciepły jest emitowany przez elementy całego układu napędowego, jak również wraz ze spalinami. Odpad ciepły zalicza się do strat niecałkowitego spalania paliwa [20]. Bilans zamiany w silnikach okrętowych wyraża się wzorem [20]:

$$Q_d = L_c + Q_s$$

Gdzie:

Q_d – energia ciepła doprowadzana do silnika w paliwie,

L_c – efektywnie uzyskana energia mechaniczna,

Q_s – straty energetyczne procesu.

Straty energetyczne procesu, które zostały zawarte w powyższym wzorze wynikają z przemian i procesów, które odbywają się wewnątrz układu termodynamicznego. Wpływa na nie szereg czynników: jakość mieszanki, temperatura spalania, wartość ciśnienia, zanieczyszczenia wewnątrz komory spalania, dławienie gazów i wiele innych czynników opisano przy okazji znaczenia prawa Bernoulliego i prawa strumienia masy. Na zagadnienie strat energetycznych warto jednak spojrzeć także z punktu widzenia całego okrętu jako układu poruszającego się na zbiorniku wodnym. W tym przypadku straty energetyczne wynikają z działania sumy oporów działających na statek.

Podsumowując, powyższy rozdział przedstawił zagadnienie prawa Bernoulliego i jego znaczenie dla pracy silników okrętowych, a także problem strumienia masy. W kolejnym rozdziale wyjaśnione będą teoretyczne podstawy działania silników okrętowych, paliw stosowanych w tych silnikach, a w związku z tym problem emisji zanieczyszczeń oraz ich szkodliwości.

2. Okrętowe turbinowe silniki spalinowe – podstawy działania i emisja spalin.

Należy także rozważyć zagadnienie wirnikowych maszyn przepływowych. Do tej klasy maszyn należą okrętowe silniki turbinowe (wirnikowe) wykorzystywane jako napęd statków użytkowanych na wodach morskich i śródlądowych. Należy je jednak uprzednio wyodrębnić na tle różnych kategorii wirnikowych maszyn przepływowych, jak również na tle różnych rodzajów silników okrętowych.

W literaturze przedmiotu wyróżnia się dwie klasy maszyn: maszyny wirnikowe oraz maszyny przepływowe [1], maszyny wirnikowe są rodzajem maszyn przepływowych. Praca wirnika i zjawisko przepływu są wykonywane z udziałem czynnika roboczego: powietrza (lub innej mieszanki gazowej, w wentylatorach, silnikach lotniczych) lub w płynie (wodzie, w pompach, turbinach wodnych, śrubach okrętowych) [2].

Wirnikowe maszyny przepływowe są klasą maszyn łączących w sobie kluczowe atrybuty techniczne: posiadają wirnik, który w skutek spalania paliwa jest poruszany i wytwarza pożądany rodzaj siły: siłę ciągu, albo nadaje prędkość postępową (występują także w pojazdach powietrznych) [3].

Maszyny wirnikowe dzieli się na [4]:

- Silniki wirnikowe,
- Wirnikowe maszyny robocze.

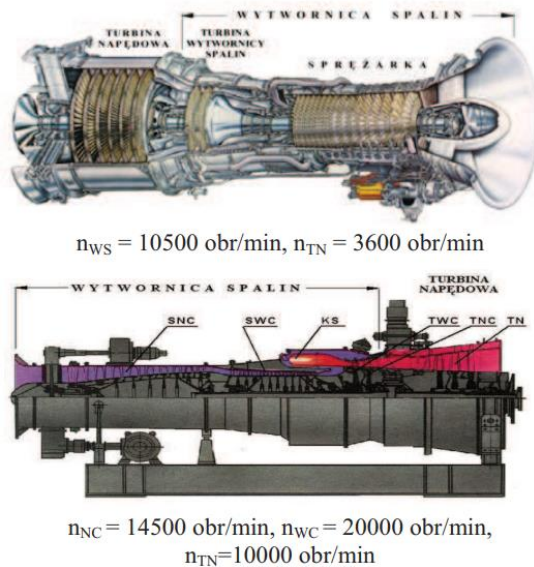
W silnikach wirnikowych, do których zaliczamy m.in. turbiny cieplne i wodne czynnik oddaje energię łopatom. Jeżeli chodzi o wirnikowe maszyny robocze energia jest przekazywana czynnikowi przez łopatki. Z tego względu wirnikowe maszyny robocze ze względu na przeznaczenie są głównie maszynami energetycznymi a także maszynami transportowymi (np. do transportu płynów). Wirnikowe maszyny robocze to głównie [4]:

- Sprężarki, zaś wśród nich: wentylatory, pompy próżniowe, wentylatory,
- Pompy wirowe.

Nie ulega wątpliwości, że okrętowe turbinowe silniki spalinowe są maszynami energetycznymi i maszynami przepływowymi, z kolei ze względu na przełożenie pracy silnika spalinowego wałem napędowym na śrubę są one także maszynami wirnikowymi [19].

W przypadku okrętowych spalinowych silników turbinowych wyróżnia się silniki dwuwirnikowe (np. silnik LM 2500). W literaturze ponadto wymieniane są silniki turbinowe dla okrętów produkcji ukraińskiej, które pracują w układzie trójwirnikowym [24]. Obydwa przykłady silników przedstawia poniższa rycina:

Rycina. Okrętowy silnik turbinowy dwuwirnikowy LM 2500 i okrętowy silnik turbinowy trójwirnikowy produkcji ukraińskiej.



Źródło: [24].

Powyższa rycina ponadto pokazuje prędkość pracy elementów wirnikowych: w silniku LM 2500 jest to turbina napędowa (TN) i wytwornica spalin (WS), z kolei w silniku ukraińskim jest inne podejście do rozmieszczenia i zastosowania maszyn wirnikowych, obok standardowego podejścia czyli turbiny napędowej, są nimi sprężarka wysokiego i niskiego ciśnienia (odpowiednio NC i WC pod schematem).

Do silników okrętowych spalinowych wewnętrznego spalania zalicza się podstawowe trzy ich grupy [20]:

- Silniki tłokowe,
- Silniki turbinowe.

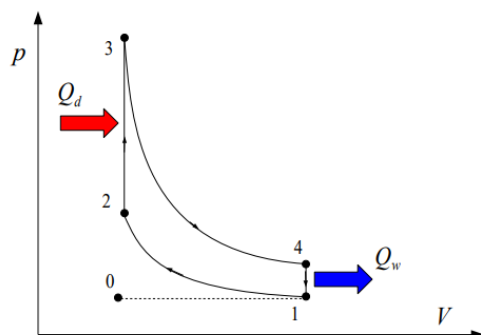
Silniki tłokowe w przypadku okrętów to silniki spalinowe i wchodzące w rozruch wskutek zapłonu samoczynnego. Działają one w oparciu o dwa obiegi ciepłne: obieg Diesla (stąd silniki Diesla) i obieg Otto (czyli silniki Otto) [20, 23, 24].

Obieg cieplny Otto jest to taki obieg termodynamiczny, w którym cykl pracy składa się z czterech składowych przemian adiabatycznych i izochorycznych [25]:

- Adiabatycznego sprężania,
- Izochorycznego ogrzewania,
- Adiabatycznego rozprężania,
- Izochorycznego rozprężania.

W przemianach adiabatycznych jest wykonywana praca, zaś w izochorycznych nie jest wykonywana praca. Cały cykl pracy z oznaczonymi przemianami termodynamicznymi przedstawiony jest na poniższej rycinie:

Rycina. Wykres przemian termodynamicznych obrazujących cykl pracy w obiegu Otto.

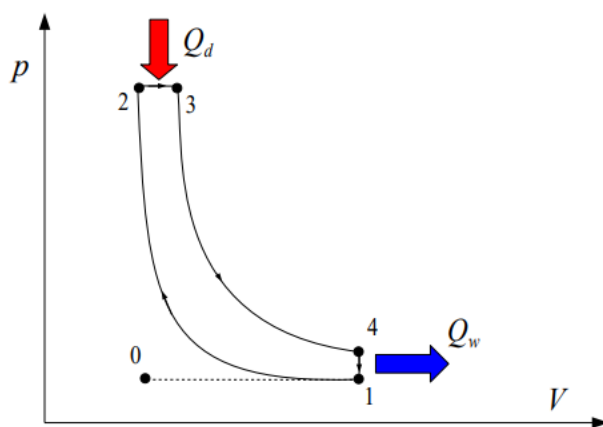


Źródło: [25].

Silniki w obiegu Otto są silnikami o zapłonie iskrowym. Z kolei silniki Diesla pracują w obiegu Diesla i oparte są o zapłon samoczynny. Jego cykl pracy rozłożony na cztery etapy

(przemiany) jest prawie taki sam, jak w obiegu Otto, z jedną różnicą: izochoryczne sprężanie jest zastąpione sprężaniem izobarycznym. Skutkiem tego najpierw powietrze jest sprężone i ogrzane do temperatury 700-900 [°C] a wskutek tego dochodzi do gwałtownego wzrostu temperatury własnej paliwa i do jego zapłonu. Obieg Diesla prezentuje poniższa rycina.

Rycina. Wykres przemian termodynamicznych obrazujących cykl pracy w obiegu Diesla.



Źródło: [25].

Z racji pracy w obiegu Otto i Diesla okrętowe silniki tłokowe spalinowe dzieli się na pracujące przy stałej objętości (Otto) i zmiennej objętości (Diesel). Podział silników ze względu na cechy konstrukcyjne pozwala wyróżnić [26]:

- Silniki jedno-, dwu- i wielocylindrowe (kryterium liczby cylindrów),
- Silniki w układzie rzędowym, gwiazdowym, widlastym i z tłokami przeciwbieżnymi (kryterium łączne liczby i ułożenia cylindrów),
- Silniki ze względu na prędkość nominalną (wolno-, średnio- i szybkoobrotowe).

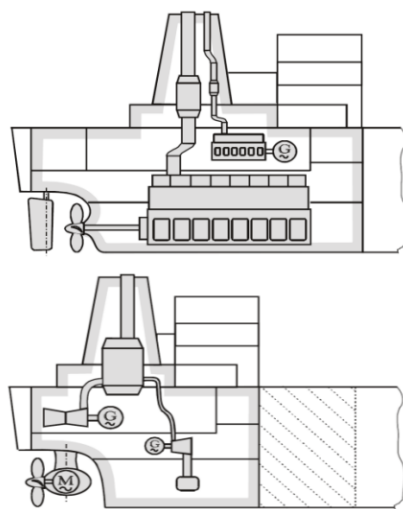
Cechą silników tłokowych na statkach morskich jest duża liczba ich wariantów konstrukcyjnych, które wyróżnia podejście do liczby i rozmieszczenia cylindrów, jak również do liczby silników w całym układzie kombinowanym [26].

W silnikach turbinowych należy także zwrócić uwagę, że mają one cechy maszyn przepływowych, ponieważ są wynikiem współpracy maszyn przepływowych będących głównymi elementami silnika turbinowego. Należą do nich: sprężarka, komora spalania oraz turbina [22].

Silniki turbinowe są mniej popularne od silników tłokowych w statkach morskich. Stanowią one kilka procent ogólnej liczby zainstalowanych silników. Wynika to z faktu, że cechuje je niższa sprawność energetyczna. Ich główną zaletą jest jednak duża koncentracja mocy, czyli generują znaczną moc przy dość niewielkiej masie silnika. Jednak w całym układzie napędowym stosunek do masy nie jest aż tak korzystny, ponieważ wysoka prędkość obrotowa pracy turbiny wymaga zastosowania dodatkowej ciężkiej przekładni redukcyjnej przenoszącej napęd na wał, który ma już dużo niższą prędkość obrotową [23]. Pochodzenie tego rozwiązania w okrętach związane jest ze stosowaniem silników odrzutowych samolotów [24].

Różnica w napędzie z silnikiem tłokowym i silnikiem turbinowym polega głównie na tym, że w silnikach tłokowych wał napędowy jest obracany bezpośrednio przez pracę tłoków i porusza on śrubę napędową. Z kolei w silnikach turbinowych potrzebny jest mechanizm redukcyjny. Porównanie pokazujące te dwa elementy przedstawia poniższa rycina:

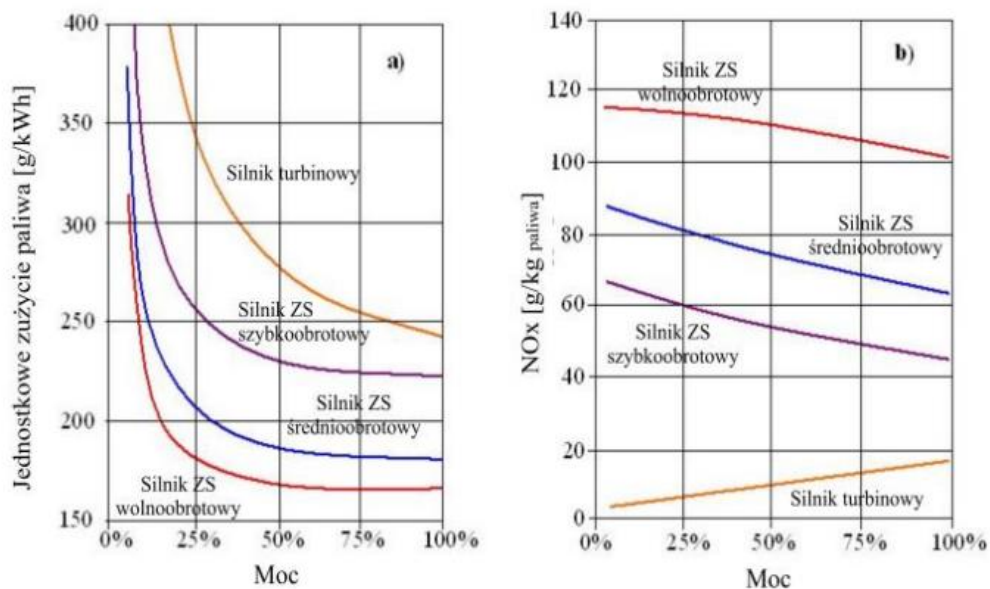
Rycina. Porównanie spalinowego silnika okrętowego turbinowego (górny schemat) i tłokowego (dolny schemat).



Źródło: [23].

Szczególną cechą silników turbinowych na statkach jest dużo wyższe zużycie paliwa, ale niska emisja tlenków azotu. Prezentuje to poniższa rycina:

Rycina. Zużycie paliwa i emisja NO_x w różnych rodzajach silników tłokowych o zapłonie samoczynnym (wolno-, średnio- i szybkoobrotowych) oraz silników turbinowych.



Źródło: [23].

Jak pokazują powyższe dane zużycie paliwa silników tłokowych i turbinowych spada wraz ze wzrostem mocy, ale silniki turbinowe mają ogólnie dużo wyższe poziomy spalania, niż silniki tłokowe. Z kolei ich emisja NO_x jest dokładnie odwrotna. Silniki tłokowe z zapłonem samoczynnym wolnoobrotowe emitują ich najwięcej, z kolei silniki turbinowe najmniej. Ponadto dynamika emisji uzależniona od mocy jest inna w silnikach turbinowych, a inna w silnikach tłokowych. W przypadku silników turbinowych emisja NO_x z rośnie wraz ze wzrostem mocy, a w silnikach tłokowych spada [23].

Samo paliwo lub mieszanka paliwowa są mieszaninami zawierającymi toksyczne substancje chemiczne w postaci ciekłej, albo występujące w postaci stałej, jednak, które uległy rozpuszczeniu w paliwie. Ich toksyczność i ryzyka negatywnego oddziaływania na środowisko są jednak kontrolowane dzięki możliwości magazynowania w warunkach hermetycznych, czasami z kontrolowaną temperaturą i ciśnieniem w zbiornikach służących do składowania. Paliwa lotnicze obecnie nadal w przeważającej mierze wytwarzane są z ropy naftowej. Ropa naftowa zależnie od jej rodzaju gatunkowego dostarcza lżejszych i cięższych frakcji do produkcji paliw dla silników okrętowych [16]. W poniższej tabeli opisane są składy różnych gatunków ropy naftowej z uwzględnieniem szacunkowych udziałów objętościowych danych frakcji:

Tabela. Skład produktów otrzymywanych z różnych złóż ropy naftowej [v/v%].

Pochodzenie/Fracja	Ciężka ropa wenezuelska	Ciężka ropa arabska	Lekka ropa nigeryjska
Benzyna	3	21	33
Nafta	6	14	20
Lekkie oleje	26	10	16
Ciężkie oleje	-	28	30
Pozostałe ciężkie składniki	58	27	1

Źródło: [16].

Podstawowe rodzaje paliw płynnych dla silników okrętowych to [18]:

- Paliwa ciężkie HFO,
- Paliwo diesel dla statków morskich z domieszką HFO,
- Gaz naturalny,
- Biodiesel.

Paliwa ciężkie HFO są klasyfikowane według wytycznych systemu klasyfikacyjnego IFO, norm ISO, a także zgodnie z definicją Konwencji w sprawie zapobiegania

zanieczyszczeniom morza przez statki (tzw. konwencja MARPOL, definicja znajduje się w regulacji 43 aneksu 1). Zgodnie z systemem IFO, paliwa HFO dzieli się według klasy lepkości (mierzoną wskaźnikiem [cSt], czyli 'centy-Stoke'ami'). Paliwa HFO cechujące się przewagą ciężkiej frakcji i bardzo dużą lepkością stanowią ok. 70% zużycia paliw przez statki korzystające z paliw płynnych, z kolei paliwa HFO 380, stanowią ok. 25% zużycia. Cięższe klasy aż do IFO 700 oraz lżejsze klasy <IFO180 stanowią 5% pozostałego zużycia [21].

W systemie ISO paliwa HFO dzielone zgodnie z normą ISO 8217, w której klasy paliw podzielone są od RM 10 do RM55 [21]. Klasyfikacja z ISO 8217 ma wartość referencyjną do systemu IFO, co prezentuje poniższa tabela:

Tabela. Klasy paliw okrętowych HFO według ISO 8217 i według systemu klasyfikacji IFO.

Wg IFO	Wg ISO	Gęstość [kg/l]	Zawartość destylatu [%obj]	Ciężka frakcja [%obj]
IFO30	RM10	0,93	35-40	60-65
IFO80	RM15	0,93-0,96	18-30	70-80
IFO180	RM25	0,94-0,97	5-20	80-92
IFO240	-	0,96-0,98	3-12	90-95
IFO380	RM35	0,97-0,99	0-10	90-100
IFO460-650	RM55	1,00-1,05	0-10	90-100

Źródło: [21].

Składniki szkodliwe zawarte w spalinach paliw to [16]:

- Tlenki azotu,
- Dwutlenek siarki,
- Tlenek węgla,
- Węglowodory.

Emisja tlenków azotu przez okręty podlega reżimowi konwencji MARPOL, w której został wypracowany harmonogram obniżenia tych poziomów (są tzw. *tiers I-III*) od 2000 roku [23]. Inne wymogi zostały też wypracowane dla silników tłokowych zależnie od prędkości nominalnej:

Tabela. Dopuszczalne wartości emisji jednostkowej NO_x w silnikach tłokowych okrętów według Konwencji MARPOL.

Poziom emisji	Rok obowiązywania	Dopuszczalne normy emisji w zależności od prędkości nominalnej silnika [obr./min]		
		Silniki wolnoobrotowe n < 130	Silniki średnioobrotowe n ≤ 130 < 2000	Silniki szybkoobrotowe n > 2000
I	2000	17,0	$45,0 \cdot n^{-0,2}$	9,8
II	2011	14,4	$44,0 \cdot n^{-0,2}$	7,7
III	2016	3,4	$9,0 \cdot n^{-0,2}$	2,0

Źródło: [23]

W przypadku paliw HFO, które stanowią główne źródło energii w spalinowych silnikach okrętowych, dochodzi do emisji dwutlenku siarki. Paliwa HFO mogą na trasach oceanicznych mogły mieć nawet do 1% siarki w składzie objętościowym, obecnie trwają prace nad przepisami obniżającymi dopuszczalny limit do 0,5%. Na Bałtyku i na Morzu Północnym natomiast limit ten wynosi 0,1%. Szacuje się, że od 2008 roku, gdy globalny limit SO_x wynosił 4,5% do 2026 roku limit spadnie do 0,5% [21].

Głównym mechanizmem powstania spalin jest piroliza, w której przebiegu z udziałem tlenu gazowe paliwo, lub paliwo płynne doprowadzone w procesie formowania mieszanki paliwowo-powietrznej jest do postaci parowej, ale związek między zawartością związków szkodliwych w spalinach paliw w okrętowych spalinowych silnikach turbinowych jest kształtowany przez następujące czynniki [18]:

- Skład paliwa, zanieczyszczenie paliwa w układzie wtrysku,

- Wilgotność powietrza dostarczanego przez układ sprężarki,
- Zawartość tlenu w sprężonym powietrzu z układu sprężarki,
- Temperatura zapłonu,
- Dystrybucja przestrzenna temperatury w komorze spalania.

Podstawowe mechanizmy kształtujące skład spalin [18]:

- Mechanizm formowania się jonów w trakcie procesu pirolizy z udziałem mieszanki paliwowej, wówczas jony dodatkowo przyczyniają się głównie do kształtowania udziału niespalonych węglowodorów w składzie spalin, jak również tlenków azotu, z kolei łańcuchy reakcji z udziałem anionów odpowiedzialne są za kształtowanie udziału dwutlenku siarki, czy też anionów węglanowych i siarczanowych, również w łańcuchach reakcji z udziałem kationów wytwarzają się cząsteczki stałe w spalinach,
- Nadawanie ładunku elektrycznego dodatniego lub ujemnego powoduje, że drobiny frakcji ciężkich zaczynają się łączyć, zwłaszcza gdy jest duży udział negatywnie lub pozytywnie naładowanych drobin, z punktu widzenia niższej toksyczności spalania paliwa bardziej korzystny jest zerowy ładunek spalin oraz znajdujących się w nich cząstek stałych,

W przypadku silników okrętowych emisja związku toksycznego silnika wynika z zależności między mocą silnika i emisją jednostkową i -tego związku toksycznego warunkowanych prędkością obrotową silnika i warunkami zewnętrznymi, co wyraża wzór [27]:

$$E_{ZT_i} = e_{ZT_i} \cdot P_{e_i} \left[\frac{g}{h} \right]$$

Gdzie:

$e_{ZT_i} = f(n, WZ_i)$ – emisja jednostkowa związku toksycznego,

$P_{e_i} = f(n, WZ_i)$ - moc silnika,

n – prędkość silnika,

WZ – warunki zewnętrzne.

Aby ograniczać emisję związków szkodliwych silniki okrętowe muszą spełniać szereg warunków. W przypadku emisji NO_x silniki podlegają kontroli oraz procesom certyfikacji zgodnie z załącznikiem VI konwencji MARPOL i z Kodeksu technicznego kontroli emisji tlenków azotu z okrętowych silników wysokoprężnych (Kodeks techniczny NO_x – zgodnie z rezolucją MEPC.177(58) Międzynarodowej Organizacji Morskiej [30].

Z kolei pod względem emisji tlenku i dwutlenku węgla silniki muszą spełniać wymogi w dwóch aspektach: aspekcie szkodliwości, oraz w aspekcie wpływu na klimat. W drugim aspekcie silniki muszą spełnić wymogi wskaźnika EEOI, który jest wskaźnikiem intensywności węglowej (CII) [31].

Witkowski [28] zbadał wpływ na emisję szkodliwych składników w zależności jeszcze od innego czynnika, a mianowicie uszkodzeń silnika, które trudno uznać za warunki zewnętrzne. Badanie objęło następujące usterki: zanieczyszczona chłodnica powietrza, rozkalibrowane otwory wtryskowe, niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, nieszczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej. Badane rodzaje emisji i wpływ tych usterek na emisję objął [28]:

- Tlenek węgla,
- Dwutlenek węgla,
- Tlenki azotu.

Wynik badań wskazał, że rozkalibrowane otwory wtryskowa miały wpływ na znaczny wzrost emisji tlenku węgla (pięciokrotnie wyższy, niż w silniku sprawnym technicznie), dopiero wzrost mocy powyżej 300 [kW] powodował spadek tej emisji. Z kolei każda z usterek wywarła nieznaczny wpływ na wzrost emisji dwutlenku węgla (wzrost o 10-15% w stosunku do silnika sprawnego technicznie), a zmiana mocy silnika nie wpływała znacząca na te zależności. W przypadku emisji tlenków azotu uzyskano niejednoznaczne wyniki: wzrost emisji nastąpił tylko w przypadku testowania pracy silnika z zanieczyszczoną chłodnicą powietrza, w pozostałych przypadkach emisje NO_x były dużo niższe, niż w silniku sprawnym technicznie [28].

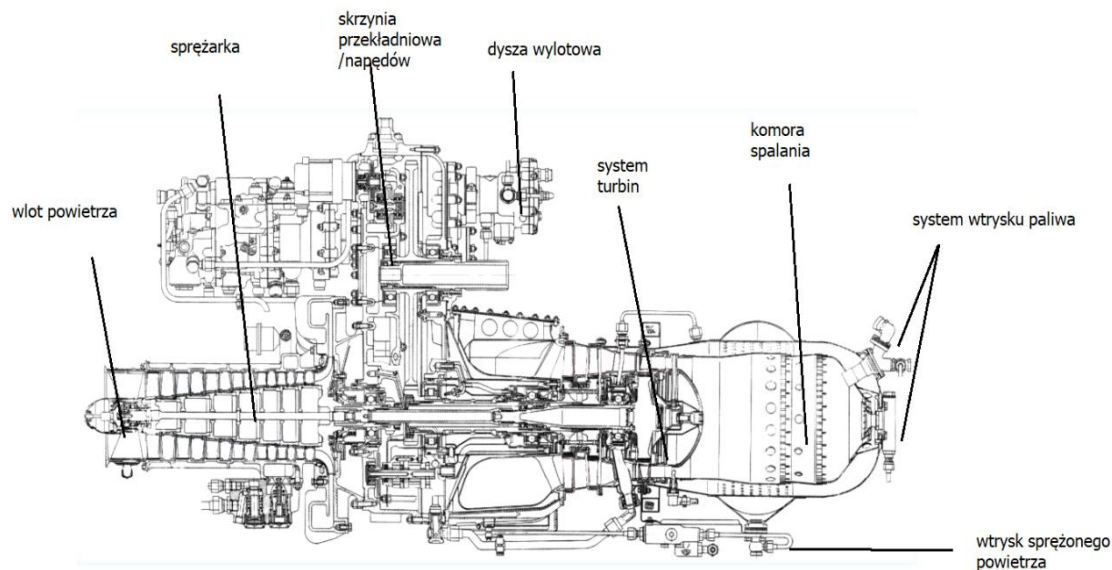
Podjęcie badań oparte na niesprawnościach zastosował także Kowalski [29] w obrębie cylindra silnika, aparatury wtryskowej i w układzie wymiany ładunku. Jego

badanie nie miało jedynie ustalać składu gazów wylotowych, ale również nadać im wartość diagnostyczną [29].

Do r. 3. +

Z uwagi na wybrany temat pracy i charakter pracy eksperymentalnej kluczowe jest omówienie silnika GTD-350, jego cech konstrukcyjnych oraz parametrów pracy. Silnik GDT-350 został opracowany w 1961 roku (pierwszy prototyp, prace trwałe w latach 1959-1963) przez S. I. Izotowa. Do tej pory był on produkowany w następujących podstawowych wariantach konstrukcyjnych: GDT-350 czyli w wariacie oryginalnym, także w modyfikacjach zmierzających do nieznacznej redukcji mocy jego pracy, ale zwiększających jego żywotność międzyremontową: GTD-350P, GTD-350W oraz GTD-350W2. Silniki te stosowane są nadal jako napęd w śmigłowcach Mikojan Mi-2. Śmigłowiec ten ma napęd w układzie dwusilnikowym (2 x GTD-350). W Polsce natomiast dokonano innej modyfikacji polegającej na wymianie silnika radzieckiego na wersję GDT-350W2 produkowaną w Polsce, której moc była zwiększona do 420 KM (modernizacja Mi-2 do Mi-2plus) [10]. Na poniższej rycinie widoczny jest schemat budowy silnika GTD-350W w rzucie z boku wraz z oznaczeniem głównych elementów konstrukcyjnych przez autora pracy:

Ryc. 2. Silnik GTD-350



Źródło: [11].

Dolna część silnika z wlotem powietrza sprężarką, systemem turbin i komorą spalania jest częścią przepływową tego silnika. Z kolei za pracę wirnika odpowiada skrzynia przekładniowa/napędów [11].

W poniższej tabeli opisane są dane techniczne i parametry pracy tego silnika:

Tabela 1. Dane techniczne silnika GTD-350W.

Nazwa parametru	Wartość:
Masa silnika	139,3 [kg]
Moc na zakresie startowym	313 [kW] (lub: [425 KM])
Moc na zakresie nominalnym	235 [kW] (lub: [329 KM])
Prędkość obrotowa turbiny napędowej	24000 [obr./min.]
Prędkość obrotowa turbiny sprężarki	45000 [obr./min.]
Prędkość obrotowa wału wyjściowego	5904 [obr./min.]
Jednostkowe zużycie paliwa	0,496 [kg/kW]

Wymiary silnika:	
Wysokość:	760 [mm]
Długość:	626 [mm]
Szerokość:	1350 [mm]

Źródło: [11].

Jak pokazuje tabela silnik GTD-350 charakteryzuje się dość niewielkim, jak na grupę turbinowych silników śmigłowcowych, zużyciem jednostkowym paliwa, należy pamiętać też o tym, że śmigłowiec Mi-2 wymaga dwóch takich silników, co jednak nie jest dużym zużyciem uwzględniając masę własną śmigłowca porównując do innych silników śmigłowcowych [12, 13]. Obydwa silniki pracują na podwójnej przekładni zbiorczej napędzającej wirnik nośny śmigłowca. W literaturze zauważa się też dużą użyteczność silnika do zastosowań poza układem napędowym śmigłowca [12]:

- Do napędu prądnic,
- Do pomp dużej wydajności,
- Na laboratoryjnych stanowiskach hamowniowych.

Istotne jest również zwrócenie uwagi na to, jakie są parametry silnika GDT-350 w różnych parametrach obciążenia roboczego od pracy na biegu jałowym aż do pracy maksymalnej silnika:

Tabela 2. Podstawowe parametry pracy silnika GTD-350 w warunkach atmosfery wzorcowej.

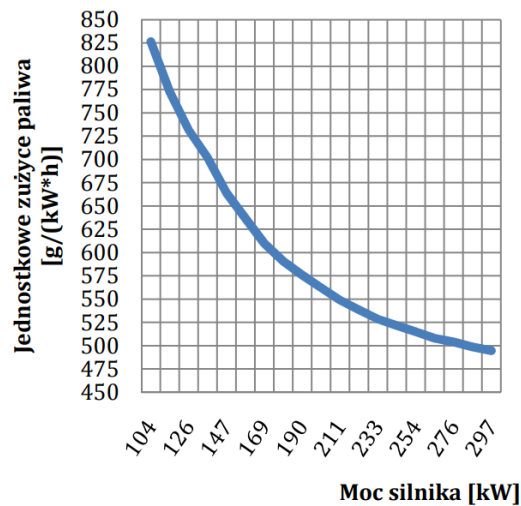
Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Zakres maksymalny	Zakres nominalny	Zakres przelotowy		Bieg jałowy
					I	II	
Moc na wale wyjściowym	P	[kW]	294,2	235,4	209,6	172,8	-
	n_{ws}	[%]	96	90	87,5	84,5	57±3

Prędkość obrotowa wrotnicy spalin		[obr./min.]	43200	40500	39375	38025	25650 ±1350
Prędkość obrotowa turbiny napędowej	n_{TN}	%	97±1	101±1	Max 104	Max 104	62 ±12
		[obr./min.]	23280 ±2400	24240 ±2400	24960	24960	14880 ±2880
Maks. temp. spalin za komorą spalania	T_3	[K]	1243	1193	1163	1073	1063
Jednostkowe zużycie paliwa	B_e	[kg/kWh]	0,496	0,530	0,557	0,605	5,0
Spręż	π	-	6,05	-	-	-	-
Strumień powietrza	\dot{m}	[kg/s]	2,19	-	-	-	-

Źródło: [13].

Obserwacja różnych trybów pracy silnika pokazuje, że jest on najbardziej nieekonomiczny w trakcie pracy na biegu jałowym, ale z kolei najwyższa ekonomiczność pracy jest widoczna w obciążeniu maksymalnym. W ten sposób zależność między mocą silnika a zużyciem paliwa w danym trybie pracy jest oparta odwrotnej proporcjonalności, którą prezentuje poniższa rycina:

Ryc. 2. Stosunek jednostkowego zużycia paliwa do mocy pracy silnika GTD-350.



Źródło: [14].

Powyższe dane pokazują zatem, że silnik GTD-350 po osiągnięciu maksymalnego nalotu przewidywanego dla jego żywotności technicznej nawet po wycofaniu z eksploatacji w śmigłowcach może być przeznaczony do zastosowań alternatywnych [14].

Przykładem takiego zastosowania stacjonarnego silnika GTD-350 jest testowanie możliwości zmiany rodzaju stosowanego paliwa w celu wytwarzania energii elektrycznej czy napędzania turbin wodnych, ale z zastosowaniem biopaliw (ciekłych i gazowych) [15].

W przypadku silnika GTD-350 dochodzi do dwuetapowej redukcji prędkości obrotowej elementów napędu, najpierw prędkość turbiny napędowej (24 000 obr./min.) jest redukowana do 6 000 obr./min. na wale napędowym (na reduktorze wstępnym), z kolei potem do prędkości ok., 400 obr./min. prędkości obrotowej wirnika nośnego śmigłowca [6].

Literatura:

- [1] Gundlach, W., Podstawy maszyn przepływowych i ich systemów energetycznych, PWN, Warszawa 2017.
- [2] Kozanecka, D., Wirnikowe maszyny przepływowe: przepływ, przetwarzanie energii, KBN, Łódź 1996.
- [3] Szantyr J., Podstawy teorii wirnikowych maszyn przepływowych, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2003.
- [4] Miller A., Teoria maszyn wirnikowych – zagadnienia wybrane, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1982.
- [5] Sobieski W., Mechanika płynów. Dynamika płynów idealnych, UWM, Olsztyn 2013, <http://pracownicy.uwm.edu.pl/wojsob/pliki/dydaktyka/mp-03.pdf> (dostęp: 26.11.2023)
- [6] Balicki W., Korczewski Z., Szczeciński S., Główne kierunki rozwoju i zastosowań turbinowych silników spalinowych, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, r. LXIX, nr 1 (172), 2008, s. 7-26.
- [7] Basic principles of ship propulsion, https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/basic-principles-of-ship-propulsion-eng.pdf?sfvrsn=48fc05b5_7 (dostęp: 26.11.2023)
- [8] Resistance and powering of the ships, https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/0207_Chapter_7_Jun20.pdf [dostęp: 27.11.2023)
- [9] Strumień masy, <https://www.pg.gda.pl/~krzyte/students/MP-C6.pdf> (dostęp: 28.11.2023)
- [10] Gałązkowski R., Gawroński Ł., Śmigłowiec Lotniczego Pogotowia Ratunkowego EC 135 P2+ - porównanie do Mi-2 plus, Bezpieczeństwo o Technika Przeciwpożarowa, nr 1, 2020, s. 87-97.
- [11] Silnik turbinowy GTD-350, źródło: https://pwrze.com/storage/file/core_files/2018/9/28/fe0e7d5f3ed928e733895ae2c0765c60/zal_nr_3_gtd-350_wersja_2pl.pdf (dostęp: 12.11.2023)

- [12] Magryta, P., Pietrykowski K., Wendeker M., Czyż Z., Badania symulacyjne eksploatacji helikopterowego silnika o zapłonie samoczynnym, *Logistyka*, nr 3, 2014, s. 5111-5117.
- [13] Pojawa B., Rozwiązanie problemu niedostatecznej możliwości obciążania silnika GTD-350 na stanowisku laboratoryjnym, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, r. XLVII, nr 4, 2006, s. 71-86.
- [14] Ryś M., Zastosowanie lotniczego turbinowego silnika przepływowego do zasilania stacjonarnych generatorów elektrycznych, *Silniki Spalinowe*, r. 50, nr 3, 2011, s. 1-8.
- [15] Hryniewicz M., Roman K., Simulations of fuels consumption in the CHP system based on modernised GTD-350 turbine engine, *Journal of Water and Land Development*, nr 51, 2021, s. 250-255.
- [16] C. Townsend, Marine fuels and engines, *Maritime Reporter & Engineering News*, November 2008, s. 112-116.
- [18] Starik A. M., Gaseous and Particulate Emissions with Jet Engine Exhaust and Atmospheric Pollution, *Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft*, Educational Notes RTO-EN-AVT-150, Paper 15, s. 15-1 – 15-22.
- [19] L. Chybowski, *Okrętowe układy napędowe*, Akademia Morska, Szczecin 2010.
- [20] MAN – Basic Principles for Ship Propulsion, https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/basic-principles-of-ship-propulsion-eng.pdf?sfvrsn=48fc05b5_7 (dostęp: 06.12.2023]
- [21] Fritt-Rasmussen, J., Heavy Fuel Oil (HFO), A review of fate and behaviour of HFO spills in cold seawater, including biodegradation, environmental effects and oil spill response, Nordic Council of Ministers, 2018, <https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1259220/FULLTEXT01.pdf> (dostęp: 06.12.2023)
- [22] Pojawa M. Charakterystyka okrętowych turbinowych silników spalinowych w stanach pracy ustalonej, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni*, r. LII, nr 4, (187), 2011, s. 83-102.

- [23] Wirtkowski P., Kniaziewicz T., Markowski J., Ocena parametrów eksploatacyjnych okrętowego turbinowego silnika spalinowego w aspekcie emisji związków szkodliwych spalin, *Autobusy*, nr 12, 2016, s. 1458-1463.
- [24] Charchalis, A., Wielosymptomowy system diagnozowania okrętowych turbinowych silników spalinowych, *Diagnostyka*, 2004, s. 101-105.
- [25] Sobieski, W., *Termodynamika: obiegi termodynamiczne*, 2022, <http://pracownicy.uwm.edu.pl/wojsob/pliki/dydaktyka/td-08.pdf> (dostęp: 07.12.2023)
- [26] Włodarski J. K., *Okrętowe silniki spalinowe: Podstawy teoretyczne*, <http://www.chabiera-krzysztof.cba.pl/kurs/silniki/ksi%C4%85%C5%BCki/docentwlodarskiokretowesilnikispalinowe.pdf> (dostęp: 07.12.2023)
- [27] Kniaziewicz, T., Piaseczny, L., Identyfikacja obciążenia okrętowych silników spalinowych w aspekcie oceny emisji toksycznych składników spalin, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, r. LII, nr 4 (187), 2011, s. 45-60.
- [28] Witkowski K., Badania wpływu wybranych uszkodzeń silników okrętowych na parametry pracy silnika i skład spalin, *Autobusy*, nr 4, 2016, s. 95-101.
- [29] Kowalski J., *Wykorzystanie składu spalin w diagnostyce czterosuwowych silników okrętowych*, Wydawnictwo Naukowe ITE-PIB, Radom 2015.
- [30] Publikacja 69/P, *Okrętowe silniki spalinowe, kontrola emisji tlenków azotu*, PRS, październik 2020, https://www.prs.pl/uploads/p69p_pl.pdf (dostęp: 07.12.2023)
- [31] Korczewski, Z. Test method for determining the chemical emissions of a marine diesel engine exhaust in operation, *Polish Maritime Research*, vol. 28, no. 2, (111), 2021, s. 76-87.