ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 10(82)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

IV MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA
EXPLO-SHIP 2006

Wojciech Chądzyński

Trendy rozwoju układów napędowych gazowców LNG

Słowa kluczowe: LNG, ubytki ładunku, układ napędowy, układ ponownego skraplania, turbina parowa, silnik spalinowy dwupaliwowy

Zdolności przewozowe światowej floty gazowców LNG rosną gwałtownie, a ilość zamówień na nowe statki wzrasta bardzo dynamicznie. Niewykluczone, że budowa gazowców LNG zostanie podjęta także w naszym kraju. W niniejszej pracy zostaną przedstawione wymagania, jakie stawiane są przed układem napędowym gazowca LNG, sposoby wykorzystania naturalnych ubytków LNG podczas rejsu, warianty możliwych do zastosowania układów napędowych wraz z ich cechami eksploatacyjnymi, szkic założeń do badań nad optymalnym rozwiązaniem układu napędowego w powiązaniu z wielkością statku.

Developments of Propulsion Systems of LNG Carriers

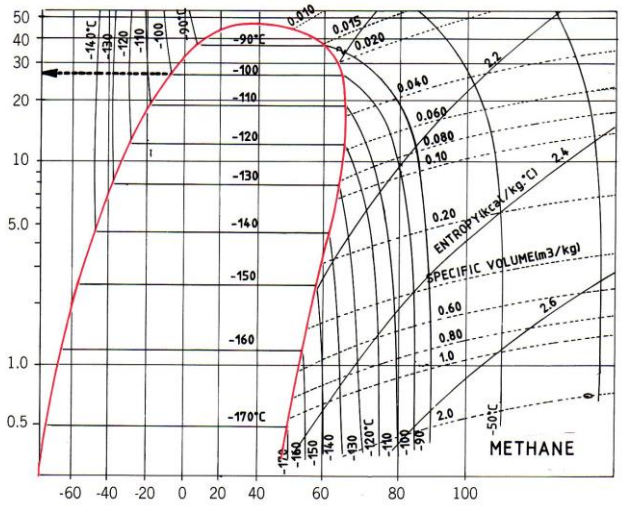
Key words: LNG, boil-off, propulsion system, reliquefaction plant, steam turbine, dual fuel diesel engine

The global LNG shipping capacity is growing sharply and the number of ordered LNG carriers is very high at the moment. It is possible that Poland will appear among experienced builders of those ships. The author considers the requirements for propulsion systems of modern LNG carriers, the methods of utilising boil-off gas, different alternatives of power sources. Besides, the paper introduces a preliminary idea of research on an optimal solution of propulsion system closely related with the size of the vessel.

Wstęp

Gazowce LNG posiadają dwie cechy, które zdecydowanie wyróżniają je spośród innych statków towarowych.

Pierwszą cechą jest kriogeniczny charakter przewożonego ładunku. Z tego powodu konstrukcja zbiorników ładunkowych musi być dostosowana do temperatur, z jakimi nie kontaktuje się konstrukcja żadnego innego statku. Wystarczy powiedzieć, że najniższa temperatura ładunku gazowca LPG wynosi –104°C, podczas gdy ładunek gazowca LNG ma temperaturę o ponad 60°C niższą. Konstrukcja zbiorników ładunkowych wymaga szczególnych materiałów (rodzaj, grubość) na powłokę bezpośrednio stykającą się z ładunkiem, a ponadto dwie bariery izolacyjne chronią stal zewnętrznego kadłuba przed kontaktem z niskimi temperaturami. Dlatego konstrukcja zbiorników ładunkowych gazowców LNG jest rezultatem wielu lat badań i wdrożeń, projektowanie i budowa nowych statków zawsze są oparte na zakupie licencji, a wykonawstwo jest kosztowne, wymaga nietypowych materiałów, specjalnych technologii spawalniczych, makietyzacji i innych zabiegów przygotowawczych.



Rys. 1. Wykres ciśnienie – entalpia dla metanu
Fig. 1. Mollier diagram for methane

Drugą unikalną cechą gazowców LNG jest stan fizyczny przewożonego ładunku. Ładunek ten jest przewożony w temperaturze wrzenia, co oznacza, że przez cały czas podróży w zbiornikach zachodzi parowanie przewożonego ładunku. Ilość odparowanego ładunku zależy od stopnia efektywności izolacji i, w mniejszym stopniu, od strefy klimatycznej. Ponowne skraplanie – tak jak to

ma miejsce na gazowcach LPG – nie jest stosowane, pary pozostają w przestrzeni ładunkowej. Ilość tych par jest od dawna przyjmowana jako 0,15% objętości ładunkowej dziennie i z uwagi na wytwarzane ciśnienie muszą one być stale odprowadzane z przestrzeni ładunkowej.

Ta właśnie cecha powoduje, że układ napędowy gazowca LNG zawsze różnił się od układów stosowanych na większości statków towarowych i był przedmiotem licznych rozważań i prac. W niniejszej pracy zostaną przedstawione wymagania, jakie stawiane są przed układem napędowym gazowca LNG, warianty możliwych do zastosowania układów wraz z ich cechami eksploatacyjnymi oraz założenia do badań nad optymalnym rozwiązaniem układu napędowego w powiązaniu z wielkością statku.

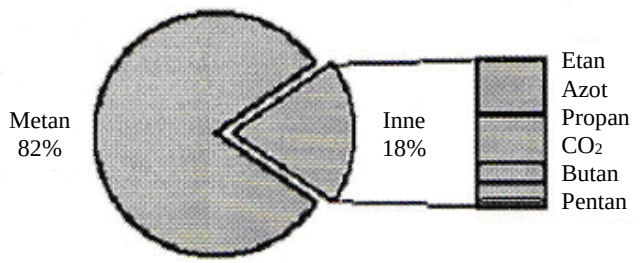
1. Wymagania stawiane przed układem napędowym gazowca LNG

Główne wymaganie stawiane nie tyle przed układem napędowym, ile przed statkiem jako całością – ale mające zasadniczy wpływ na ten układ – to uniknięcie odprowadzania par ładunku do atmosfery.

Istnieją trzy możliwości postępowania:

- całkowite uniknięcie odparowania,
- ponowne skroplenie par,
- spalanie w układzie napędowym.

Zmniejszenie odparowania jest możliwe poprzez zastosowanie izolacji o bardzo niskich współczynnikach przewodności cieplnej. Wartość stopnia odparowania przyjmowana jako 0,15%, a w niektórych źródłach oceniana na 0,1 do 0,15%, obecnie dzięki ulepszeniom wynosi – jako średnia dla cyklu podróży pod ładunkiem i pod balastem – ok. 0,084%. Dalsza poprawa jest na dzień dzisiejszy nierealna, gdyż wywołałaby wzrost objętości i kosztu izolacji. Opanowanie wzrostu ciśnienia, co wynika z zależności ciśnienia i temperatury jak na rysunku 1, wymagałoby instalacji dodatkowych zbiorników ciśnieniowych dla zmagazynowania nadmiaru LNG i odpowiedniej instalacji.



Rys. 2. Typowe składniki gazu naturalnego
Fig. 2. Typical composition of natural gas

Można powiedzieć, że całkowite uniknięcie strat wynikających z odparowania nie jest możliwe i chyba jest niecelowe. Ponowne skraplanie par oznacza, że na statku powinna się znaleźć odpowiednia instalacja dla tego celu o odpowiednim stopniu redundancji, co byłoby równoznaczne z jej zdublowaniem. Oznaczałoby to dodatkowy koszt inwestycji, jak również potrzebę zwiększenia mocy elektrowni okrętowej, koszty napraw i remontu jak również koszty osobowe (wykwalifikowana obsługa).

Ilość energii potrzebnej do zasilania takiego urządzenia może wynosić nawet do 10% wartości energetycznej przewożonego gazu. Ponadto LNG zawiera od 0,7 do 1,2% azotu, który stanowiłby do 27% objętości par i który także trzeba by było skraplać (rys. 2).

Najkorzystniejsze wykorzystanie naturalnych ubytków LNG (także w układzie napędowym) jest więc wymaganiem, które było do chwili obecnej i nadal jest szeroko stosowane do gazowców LNG.

Oprócz tego wymagania funkcjonują także wymagania mające zastosowanie do większości siłowni statków towarowych, których spełnienie dla gazowców nie zawsze jest tak oczywiste, jak by się mogło zdawać:

- elastyczność pracy,
- łatwość i niskie koszty eksploatacji,
- niski koszt paliwa i wysoka sprawność napędowa,
- redundancja i dostępność,
- niski poziom szkodliwych emisji,
- dostępność wykwalifikowanej obsługi,
- niski poziom całkowitych kosztów eksploatacyjnych.

2. Stosowane dotychczas rozwiązania siłowni gazowców LNG

Przez wiele lat podstawowym rozwiązaniem był układ dwóch turbin parowych, nisko- i wysokoprężnej, zasilany przez dwie wytwornice pary. Energia elektryczna była zwykle wytwarzana przez dwa turbogeneratory i jeden zespół prądotwórczy Diesla.

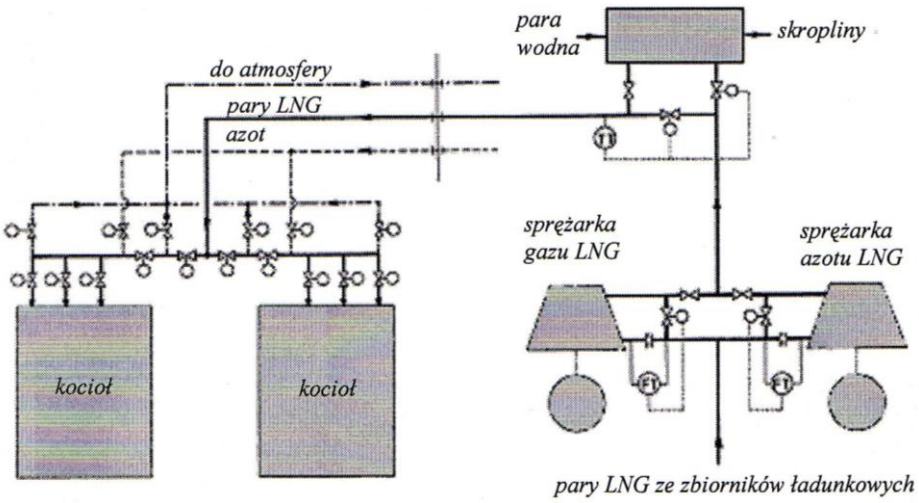
Ubytki LNG w postaci par ze zbiorników ładunkowych były sprężane, a następnie podawane do palników wytwornic pary (rys. 3). Niska sprawność układu napędowego z turbiną parową powoduje, że ilość par jest niewystarczająca dla pokrycia zapotrzebowania i z tego powodu zachodzi potrzeba uzupełniania zapasu paliwa przez dodatkowy zapas paliwa ciężkiego lub przez dodatkowe pobieranie LNG ze zbiorników ładunkowych.

Powyższe wymagania spowodowały, że od momentu pojawienia się gazowców LNG projektanci rozpatrywali alternatywne w stosunku do siłowni turboparowej warianty napędu. Brano pod uwagę takie warianty, które zapewniałyby

znaczną redukcję zużycia paliwa, prostotę obsługi, lepsze wykorzystanie par LNG ze zbiorników ładunkowych, a mianowicie:

- turbiny gazowe,
- silniki spalinowe dwupaliwowe (LNG, paliwo ciężkie),
- silniki spalinowe (LNG).

Turbiny gazowe mają sprawność pośrednią pomiędzy silnikiem spalinowym a turbiną parową i są dobrze przystosowane do prac na parach przewożonego LNG, ale nie nadają się do pracy na ciężkim paliwie stosowanym na morzu. Oferowana obecnie turbina gazowa MT 30 ma moc zależnie od temperatury powietrza 30 do 36 megawatów, a jej zużycie paliwa według producenta wynosi 207 g/kWh, co jest wartością nieco wyższą niż zużycie paliwa silników spalinowych średnioobrotowych. Jej zaletą jest mały ciężar i gabaryty, co pozwala przy założonych wymiarach statku zmniejszyć rozmiary przedziału siłowni, a tym samym zwiększyć zdolności przewozowe statku.

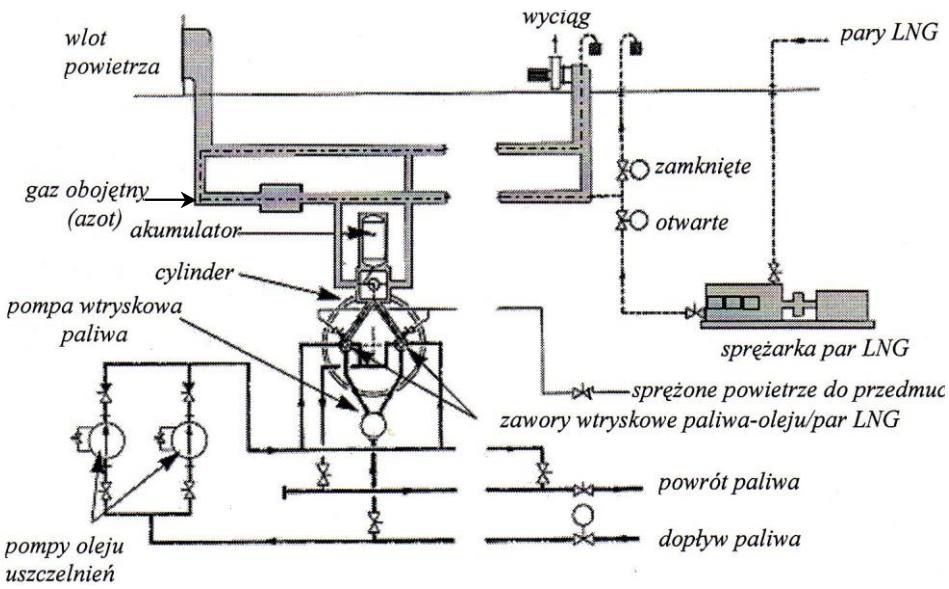


Rys. 3. Zasilanie kotłów siłowni turboparowej parami LNG
Fig. 3. Boiler gas feeding (steam propulsion)

Silniki spalinowe dwupaliwowe są oferowane od 20 lat, lecz armatorzy w ogromnej większości przypadków preferowali napęd turboparowy. Mimo znacznie mniejszej sprawności układu turboparowego istniał szereg racjonalnych powodów, dla których był on stosowany. Po pierwsze: niezawodność, a w tym łatwy i szybki rozruch siłowni, co dla gazowców LNG ma duże znaczenie z uwagi na wymagania władz portowych; po drugie: zupełna dowolność co do stosowanego paliwa, w tym także par LNG; po trzecie: ogromna przewaga nad innymi wariantami co do kosztu przeglądów i napraw oraz oleju smarnego.

Obecnie siłownie spalinowe jako podstawowe źródło napędu gazowców LNG pojawiły się w znacznej ilości wśród nowo zamawianych gazowców i reprezentują różne warianty. Dwa spośród nich wydają się być najbardziej perspektywiczne:

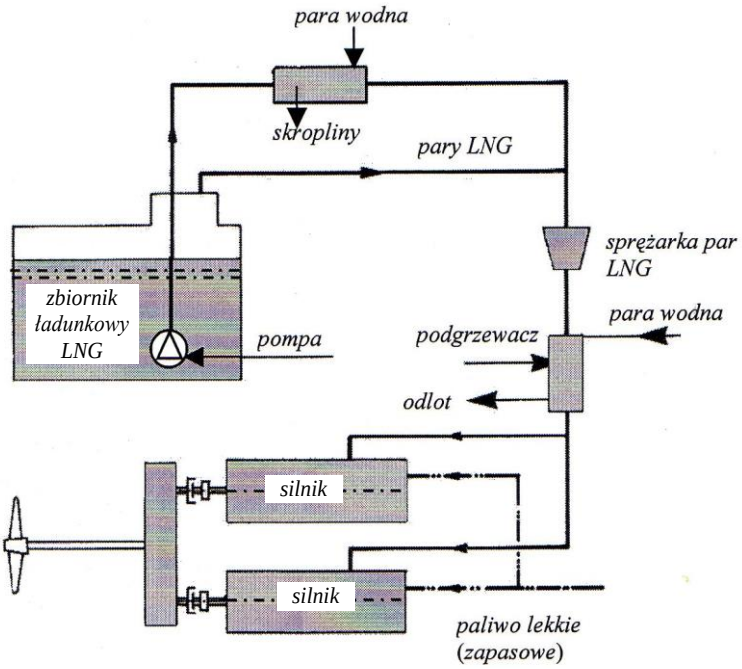
- silnik spalinowy dwupaliwowy stosowany wtedy, gdy pary ładunku mogą być wykorzystane dla potrzeb napędu głównego i schładzania ładowni w drodze powrotnej;
- silnik wolnoobrotowy z elektronicznym sterowaniem rozrządem oraz stacją ponownego skraplania LNG, który miałby być stosowany wtedy, gdy warunki kontraktu wymagają dostarczenia całego ładunku, bez ubytków.



Rys. 4. Doprowadzenie paliwa i par LNG do cylindra silnika dwupaliwowego
Fig. 4. Dual fuel operation (one cylinder shown only)

Silnik spalinowy dwupaliwowy jest koncepcją, która pojawiła się stosunkowo dawno, a jego idea polega na odprowadzeniu nadmiaru par LNG do sprężarek, które doprowadzają gaz pod ciśnieniem ok. 250 atm. do specjalnej konstrukcji dwufunkcyjnych wtryskiwaczy (rys. 4). System wysokociśnieniowy może być przyczyną zagrożeń i z tego powodu średnica i ciśnienie w rurociągu gazowym są ograniczone. Istnieją także silniki średniobrotowe pracujące przy niskim ciśnieniu. Gaz jest dostarczany pod niskim ciśnieniem rzędu ok. 5 atm do zaworów wlotowych powietrza poszczególnych cylindrów i miesza się z powietrzem w komorze spalania. Zapłon zostaje wywołany przez wtrysk małej ilości

pilotowego paliwa dieslowego, podobnie jak to następuje w zwykłym silniku Diesla. Sterowanie wtryskiem i dozowanie proporcji gaz – powietrze jest realizowane elektronicznie. Wciąż występująca nieufność armatorów do silnika dwupaliwowego wynika z wątpliwości, jak będzie się on zachowywał po dłuższym używaniu paliwa ciężkiego i gazu. Wprawdzie pozytywne doświadczenia tego typu istnieją i obejmują okres ponad 10 lat, ale dotyczą instalacji lądowych.

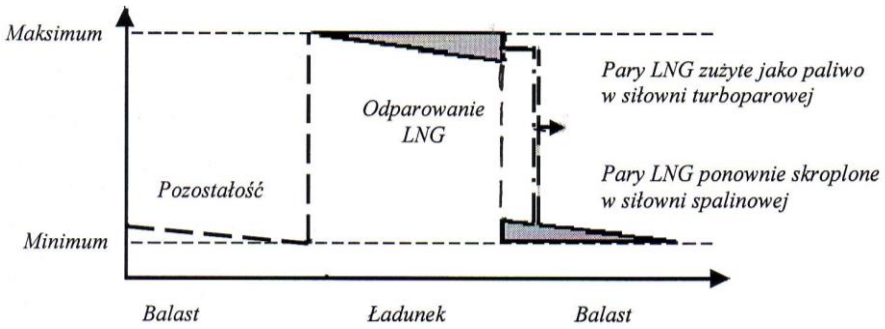


Rys. 5. Napęd na jednym paliwie (tylko gas LNG)
Fig. 5. Single fuel (LNG only) propulsion

Silniki wykorzystujące jako paliwo tylko LNG to alternatywa bardzo korzystna z punktu widzenia eksploatacyjnego (rys. 5). Przeglądy i remonty mogą być zredukowane, a żywotność silnika wzrośnie. Jednak ponieważ ilość LNG pochodząca z naturalnego odparowania w czasie rejsu pod ładunkiem, a tym bardziej pod balastem byłaby za mała, alternatywa ta wymagałaby oddzielnego zbiornika LNG dla celów napędu i ewentualnie zespołów prądotwórczych. Odpowiedź na pytanie, czy takie rozwiązanie mogłoby być interesujące, wymaga przeprowadzenia analizy technicznej i kosztowej.

3. Gospodarka parami ładunku LNG

Naturalne ubytki ładunku LNG podczas rejsu do portu przeznaczenia nie wynikają tylko z odparowania. Są one także spowodowane przez fakt, że gazowiec musi zachować pewną ilość LNG dla schłodzenia do odpowiedniej temperatury zbiorników ładunkowych przed przybyciem do portu załadowania (rys. 6). Nie można wykluczyć, że ten LNG będzie użyty także dla kotła w siłowni turboparowej, jeśli będzie to uzasadnione aktualną cena paliwa.



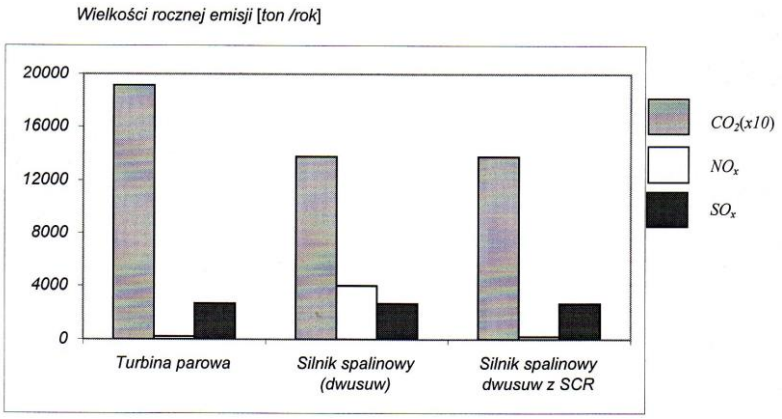
Rys. 6. Alternatywy wykorzystania par LNG
Fig. 6. Two different solutions for LNG boil-off utilisation

Dodatkową komplikację powoduje to, że metan odparowuje wcześniej niż inne składniki przewożonego LNG. Jeśli zatem wspomniana ilość LNG nie będzie właściwie wykorzystywana, to może się okazać, że LNG, które pozostanie w zbiornikach nie będzie miało składu umożliwiającego efektywne ich schłodzenie. W ten sposób statek będzie musiał schładzać się w porcie ładowanym LNG, tracąc czas i pieniądze. Z tego powodu prace nad systemami ponownego skraplania LNG kontynuowano, dochodząc w ostatnich latach do stworzenia demontowalnego modułu, który może być w razie potrzeby zainstalowany na statkach. Ten moduł ponownego skraplania wykorzystuje w swoim obiegu dla chłodzenia azot zawarty w LNG jako czynnik odbierający ciepło, dając w rezultacie LNG o zmniejszonej zawartości niepełnowartościowego składnika.

4. Ochrona środowiska i niezawodność

Gazowce LNG są statkami dużymi i rozwijającymi znaczną szybkość. Ilość zamówień na nowe gazowce jest duża i stale rośnie, ponieważ coraz więcej krajów wchodzi na rynek jako odbiorcy LNG. W tej sytuacji ważnym aspektem sprawy stają się względy ochrony środowiska. Turbina parowa nie ma znanej wady silników spalinowych, które na zmiany obciążenia odpowiadają wzmożoną emisją NO_x. Pewna poprawa tego niedostatku może być uzyskana przez

wybór silnika z elektronicznie sterowanym wtryskiem paliwa. Zużycie oleju smarnego przez turbinę jest dziesięciokrotnie mniejsze niż wolnoobrotowego silnika spalinowego, jej głośność pracy jest także mniejsza niż silnika spalinowego. Nie ulega natomiast wątpliwości, że emisja CO_2 na skutek małej sprawności turbiny jest ok. 30% wyższa niż silnika spalinowego (rys. 7).



Rys. 7. Porównanie rocznej emisji szkodliwych gazów
Fig. 7. Comparison of yearly emissions of noxious gases

Oddzielnym tematem jest sprawa niezwykle ważna przy przewozie LNG, to jest niezawodność siłowni. Jest rzeczą powszechnie znaną, że siłownia turbinowa ma wysoką niezawodność. Takiej niezawodności nie ma pojedynczy silnik spalinowy i dlatego, aby zapewnić właściwą rezerwację mocy, producenci siłowni spalinowych proponują dwuśrubowe układy napędowe lub też alternatywny napęd w postaci układu prądnica wałowa/silnik elektryczny jako rezerwacja na wypadek awarii silnika głównego. Przy prędkości projektowej ok. 21 węzłów układ dwuśrubowy, w przypadku awarii jednego z systemów napędowych, zapewni prędkość rzędu 15 węzłów, natomiast alternatywny napęd zapewni tylko prędkość „take me home" stanowiącą ułamek prędkości projektowej. Wymaganie redundancji w postaci zdwojonego układu napędowego podwyższa koszt inwestycyjny i koszty eksploatacyjne siłowni spalinowej i pogarsza jej walory ekologiczne.

5. Kierunki prawdopodobnych zmian siłowni gazowców LNG

Powszechnie znany kierunek wzrostu opłacalności przez budowę coraz większych statków raczej nie będzie miał miejsca, ponieważ oparte na licencji rozwiązanie konstrukcyjne gazowców w ostatnich 25 latach pozostaje prawie niezmienne. Pozostaje to wciąż ten sam kadłub, w którym zmienia się w nie-

wielkim stopniu długość wstawki cylindrycznej oraz siłowni, dając w rezultacie wzrost objętości ładunkowej od 125 000 m^3 do 140 – 150 000 m^3. Prawdopodobnie ta wielkość pozostanie ważna dla tradycyjnych rynków, ale już obecnie są zakontraktowane statki według nowych projektów, w których wielkość statku sięgająca 210 – 216 000 m^3 jest rezultatem optymalizacji objętości zbiorników, szybkości statku i kosztu ubytków LNG.

Koszt związany z wykorzystaniem par ładunku był zawsze przedmiotem wielu kontrowersji. Początkowo uważano, że jest on równy zeru, gdyż nie było instalacji ponownego skraplania, tak jak na statkach LPG i gdyby nie wykorzystanie LNG dla potrzeb napędu statku, byłby on usuwany do atmosfery, co byłoby marnotrawstwem. Ponieważ w tym czasie cały system skraplania i przewozu LNG znajdował się zwykle w ręku jednego konsorcjum, wielkość ubytku LNG podczas transportu nie była tak istotna. Obecnie przy ocenie opłacalności przedsięwzięcia trzeba brać pod uwagę, że gaz spalony w układzie napędowym ma swoją cenę rynkową i dlatego konieczna jest wariantowa analiza opłacalności wykorzystania par gazu jako paliwa dla instalacji napędowej lub też ponownego skroplenia, tak aby nie występowała istotna różnica pomiędzy ilością LNG załadowanego i dostarczonego. W związku z perspektywicznym wzrostem zapotrzebowania na gaz, wytwarzanie LNG, jego transport, a następnie regazyfikacja i wprowadzenie do sieci rurociągów na lądzie stają się domeną działania wielu niezależnych firm.

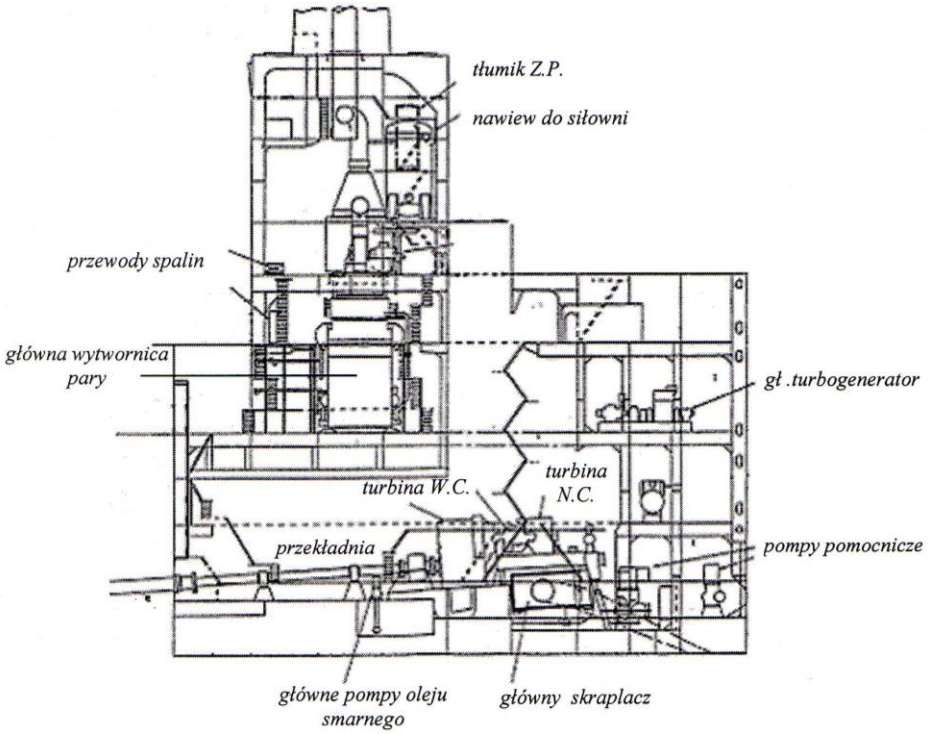
Warunki przewozu LNG mogą być zarówno typu CIF (koszt towaru, ubezpieczenie i fracht płaci importer, przy czym te ostatnie załatwia eksporter) jak i typu FOB (koszt towaru, ubezpieczenie i fracht ponosi i załatwia kupujący). Jeśli dodać do tego, że na rynek wchodzą liczne przedsiębiorstwa armatorskie, w tym znaczna liczba armatorów z Indii i Chin, to można stwierdzić, że przewóz LNG stał się niezależną operacją, która musi być opłacalna ekonomicznie.

W związku z tym armatorzy będą współzawodniczyli o pozyskanie kontraktu na przewóz, poszukiwali sposobów na obniżkę kosztów przewozu i wywierali nacisk na stocznie o niższe ceny nowych statków i niższe koszty ich eksploatacji.

6. Założenia do badań nad optymalnym rozwiązaniem układu napędowego gazowca LNG

Wszystkie prowadzone w ostatnich latach badania wskazują wyraźnie na przewagę rozwiązań opartych na silniku Diesla jako podstawowym i pomocniczym źródle mocy. Badania te dotyczyły zwykle typowych wielkości gazowca 130 – 150 tys. m^3. Jeżeli jednak porównać wyniki tych badań ze stanem zamówień na gazowce, to widoczna jest pewna niespójność. Na dzień 01.03.2006 r. portfel zamówień na gazowce LNG obejmował 131 statków o zróżnicowanej

wielkości od 130 – 150 000 m^3 do niespotykanej dotąd wielkości 216 000 m^3. Tych 131 statków ma być zbudowanych do końca roku 2009. Jest to jeden z najwyższych szczytów koniunktury na określony typ statku w historii przemysłu stoczniowego. Otóż wśród tych 131 statków jest tylko 46 z siłownią spalinową i wcale nie są to najpóźniej podpisane kontrakty.



Rys. 8. Przekrój wzdłużny siłowni turboparowej
Fig. 8. Steam turbine propulsion system

Wydawać by się mogło, że armatorzy zachowują się nieracjonalnie. Nie biorą pod uwagę licznych doniesień prasowych o braku wykwalifikowanych załóg dla obsługi przestarzałych siłowni turbinowych, nie biorą pod uwagę mniejszej sprawności takich siłowni, nie liczą się z faktem, że produkcja turbin parowych jest zmonopolizowana przez Japonię, że turbiny na nowe budowy są i będą przy takim spiętrzeniu zamówień dostarczane nierytmicznie i z opóźnieniami. Rodzi się jednak pytanie, czy można takie zachowanie odnieść tylko do ostrożności i konserwatyzmu armatorów.

Dlatego przygotowania do ewentualnej budowy gazowców muszą być poprzedzone badaniami nad optymalnym rozwiązaniem układu napędowego prowadzonymi nie tylko przez producentów silników spalinowych, ale przez

stocznie przy współudziale armatorów. W badaniach należy uwzględnić takie czynniki jak zależność cech fizycznych i handlowych LNG zależnie od dostawcy, długość trasy przewozu, dynamikę relacji ceny paliwa ciężkiego do ceny LNG, wielkość i prędkość statku, dynamikę cen stacji ponownego skraplania ubytków LNG, wielkość ubytku ładunku LNG, koszt obsługi, remontów, oleju smarnego, ale także przesłanki nie dające się przedstawić liczbowo.

Metoda badań będzie wymagała stworzenia matematycznego modelu układu napędowego i całego statku, który pozwoli na takie zaplanowanie przewozu LNG, jakie będzie optymalne z punktu widzenia indywidualnego przewoźnika.

Literatura

1. American Bureau of Shipping, *Guide for propulsion systems for LNG carriers*, ABS, Houston 2005.
2. Jean P., Petit H., *Methane by sea*, P. Tacussel Editeur Gaz Transport & Technigaz S.A., Marseille 1998.
3. Peile C. H. W., *Overview of LNG Transportation*, Gastech, Houston 2000.
4. Barry Rogliano Sales, *The LNG Shipping Market in 2000*, January 2001.
5. Kabaciński J., Kicińska M., Wolski A., *Eksploatacja statków do przewozu gazów skroplonych*, Wydawnictwo WSM, Szczecin 1993.
6. Materiały firmowe MAN B&W, Wartsilla, Kawasaki i inne.

Wpłynęło do redakcji w marcu 2006 r.

Recenzent

dr hab. inż. Andrzej Adamkiewicz, prof. AM

Adres Autora

dr hab. inż. Wojciech Chądzyński
Politechnika Szczecińska
Wydział Techniki Morskiej
Katedra Oceanotechniki i Projektowania Systemów Morskich
71-065 Szczecin, al. Piastów 41
tel. (091) 449 48 08