

Monika BORTNOWSKA

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

BADANIE OPTYMALNEJ WIELKOŚCI STATKU DO PRZEWOZU GAZU ZIEMNEGO DLA RÓŻNYCH TECHNOLOGII TRANSPORTU

Słowa kluczowe

Gazowce LNG, gaz skroplony, gazowce CNG, gaz sprężony, objętość ładunkowa, koszty eksploatacyjne.

Streszczenie

Wzrost zapotrzebowania na gaz ziemny w skali światowej, jego ograniczone zasoby jak również ograniczone możliwości pobierania z miejsc występowania siecią rurociągów będą powodowały wzrost cen, dlatego należy poszukiwać alternatywnych rozwiązań technologii transportu gazu ziemnego pod względem ekonomicznym, ekologicznym i bezpieczeństwa.

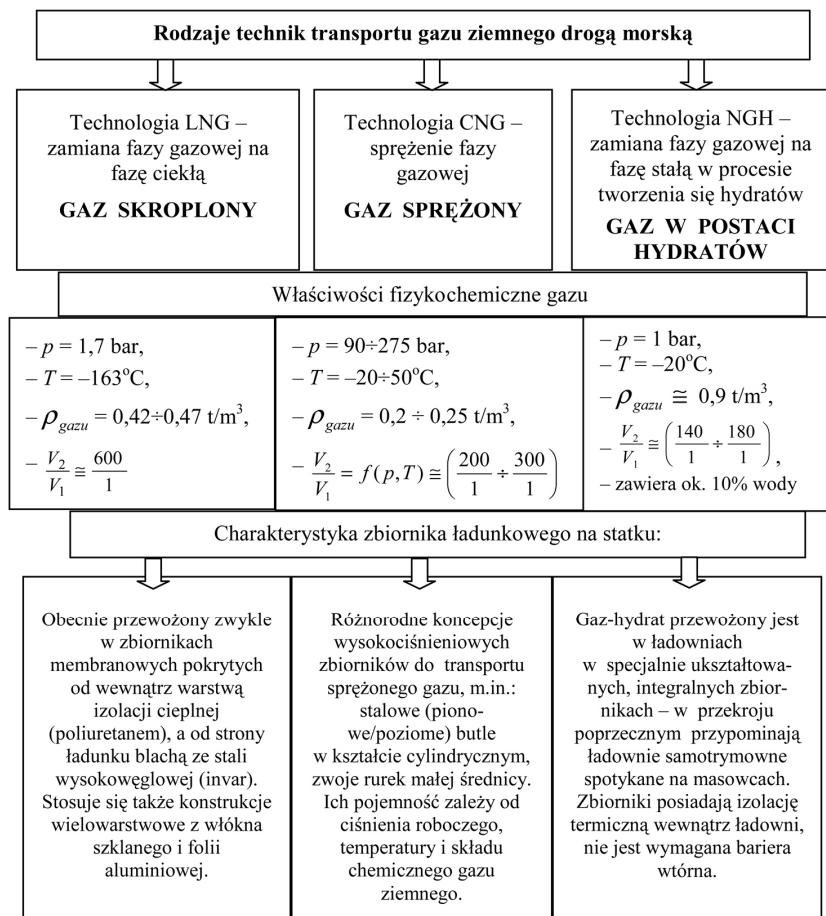
W artykule przedstawiono analizę projektową wraz z uproszczoną koncepcją statków do przewozu gazu w różnych jego postaciach, jako gaz skroplony (statkami LNG), gaz sprężony (statkami CNG) i gaz w postaci hydratów (statkami NGH). Scharakteryzowano i porównano główne parametry statków ze szczególnym uwzględnieniem przestrzeni ładunkowej. Oszacowano ilość rejsów w ciągu roku, liczbę floty na daną trasę żeglugową oraz przybliżone koszty eksploatacyjne. W analizie przewidziano transport gazu z Norwegii do Polski.

Wprowadzenie

Utrzymujący się duży popyt gazu ziemnego na całym świecie – głównie biorąc pod uwagę jego ekologiczne właściwości i szeroki poziom jego zastosowań,

wywołały „boom” w rozwoju nie tylko nowych inwestycji rurociągów przesyłowych, ale i coraz to większych statków do przewozu skroplonego gazu ziemnego (LNG). Jednocześnie utrzymujące się wysokie ceny gazu z perspektywą dalszych jego wzrostów oraz ekonomiczne ograniczenia transportu gazu w postaci skroplonej lub za pomocą podmorskich rurociągów, przyczyniły się do poszukiwania i rozwoju nowych technologii, m.in. technologii CNG – gaz sprężony pod dużym ciśnieniem, jak również technologii NGH – gaz w postaci hydratu. Szczególnie transport gazu sprężonego staje się realnie przyszłościową technologią przewozu gazu, biorąc pod uwagę trasy do 3000 Mm. Technologia NGH jest na razie na etapie projektów i możliwość jej wdrożenia jest dalece przyszłościowa, dlatego pominięto ją w analizie projektowej.

Najistotniejsze cechy i właściwości fizykochemiczne każdej z trzech technik transportu gazu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Rodzaje transportu gazu drogą morską z cechami przewożonego ładunku [1, 4]

1. Analiza parametrów projektowych gazowców typu LNG i CNG

1.1. Typ i wielkość gazowców

Wielkość gazowców typu LNG i CNG jak i całej floty wynika przede wszystkim z:

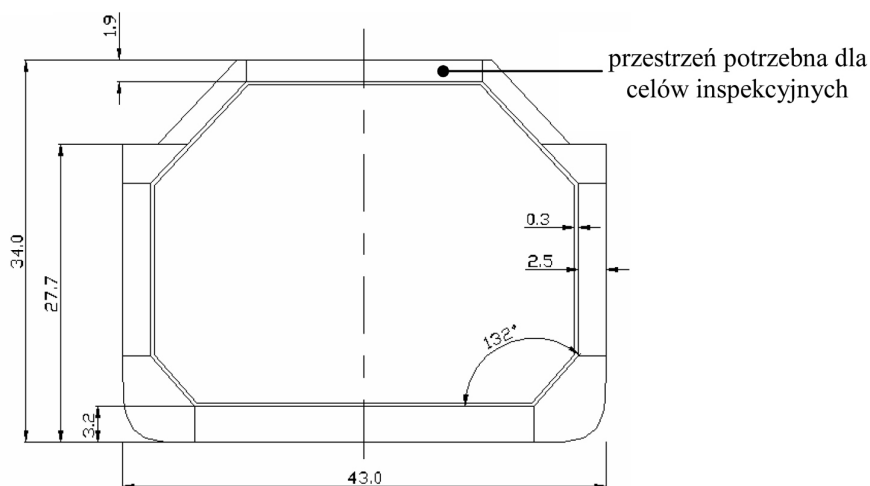
- kierunku importu, czyli odległości pomiędzy złożami gazu a odbiorcą ostatecznym – założono import gazu na linii żeglugowej Norwegia (Melkoya) – Polska (Świnoujście), 1620 Mm (ok. 3000 km),
- ilości importowanego gazu ziemnego – założono import na poziomie 5 mld m³ rocznie, co odpowiada 8,33 mln m³ gazu w postaci skroplonej i 16,7–20 mln m³ (w zależności od stopnia sprężenia) w postaci sprężonej,
- infrastruktury lądowej, tzn.: terminalu odbiorczego i sieci przesyłowej,
- ograniczeń drogi wodnej, na którą będzie eksploatowany statek – dotyczą głównie przejścia statku przez Cieśniny Duńskie.

1.2. Wybór typu zbiornika ładunkowego

1.2.1. Gazowce LNG

Na potrzeby opracowania koncepcji gazowca LNG przewidziano system zbiorników membranowych, których technologia budowy jest znana i stosowana od ponad 40 lat na sprawdzonych standardach – wysoka niezawodność jak i wysoki stopień rozpowszechnienia.

Wewnętrzna ściana zbiornika jest cienką membraną wykonaną z niskowęglowej stali nierdzewnej lub stopu (inwar) z wysoką zawartością niklu spoczywającą na mocnej izolacji, która z kolei oparta jest na konstrukcji statku.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny projektowanego gazowca LNG

Zgodnie z Międzynarodowym kodeksem budowy i wyposażenia statków przewożących skroplone gazy luzem (Kodeks IGC) i analizą rozwiązań podziału przestrzennego statków zbudowanych przyjęto – rys. 2 [2]:

- wysokość dna podwójnego $h = 3,2$ m,
- szerokość podwójnej burty $w = 2,5$ m,
- grubość warstwy izolacyjnej zbiornika membranowego $t = 0,3$ m,
- koferdamy w trzech odstępach wręgowych $3d = 2,7$ m – oddzielające przestrzeń ładunkową pomiędzy zbiornikami, grodzia zderzeniową i tylną grodzia siłowni.

1.2.2. Gazowce CNG

Z istniejących koncepcji przewozu gazu sprężonego, między innymi stalowe, pionowe/poziome butle cylindryczne, stalowe zwoje grubościennych rurek o małej średnicy nawiniętych na tzw. „karuzelę” czy też zbiorniki ciśnieniowe z tworzyw sztucznych wzmocnione włóknami szklanymi (FRP), na potrzeby oszacowania koncepcji projektowej gazowca CNG przewidziano zbiornik ładunkowy w postaci pionowych, stalowych butli cylindrycznych.

Parametry techniczne i fizykochemiczne dla zbiornika ładunkowego i transportu gazu:

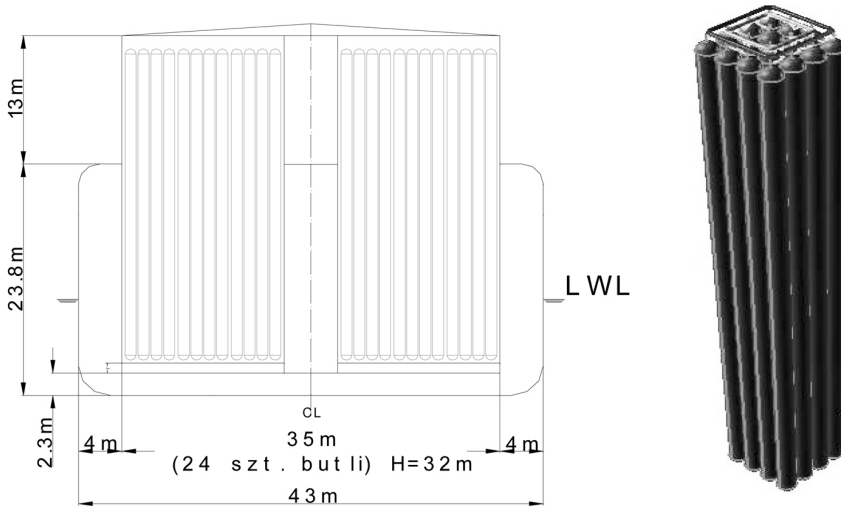
- wysokość $H_{zb} = 32,0$ m,
- średnica zewnętrzna $D_z = 1,04$ m,
- grubość ścianki zbiornika $t = 0,027$ m,
- materiał – zbiornik ze stali X-80 ($\rho_s = 7,801$ t/m³),
- Ciśnienie wewnętrzne gazu: $p = 20$ MPa,
- Promień walczaka $r = 500$ mm,
- Granica plastyczności $R_e = 555$ Mpa,
- Naprężenia dopuszczalne $k_r = 370$ MPa.

Wybór parametrów technicznych zbiornika ładunkowego poprzedzony był wcześniejszą analizą.

Na projektowanym gazowcu CNG znajduje się: 8 modułów zbiorników $6 \times 4 = 24$ butle (2304 butli), w zbiorniku nr 1 – 196 butli (moduły 4×5 oraz 4×4).

Przekrój poprzeczny przestrzeni ładunkowej na statku CNG przedstawiono na rys. 3 wraz z widokiem na jedno z modułów butli ładunkowych.

Dla ww. założeń przeprowadzono obliczenia objętości i ciężaru zbiornika pustego oraz ciężaru zbiornika wraz ze sprężonym gazem. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny gazowca CNG z widokiem na jeden z modułów

Tabela 1. Parametry techniczne zbiornika ładunkowego i gazu na statku CNG

Lp.	Parametr	Symbol/Wzór	Wartość
1	Ciężar stalowego zbiornika	$P_{zb} = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] \cdot H \cdot \rho_s$	21,45 [t]
2	Objętość stalowego zbiornika	$V_{zb} = \frac{4}{3} \pi r^3 + \pi r^2 H$	27,76 [m ³]
3	Ciężar sprężonego gazu w butli	$P_{gazu} = V_{zb} \cdot \rho_{spr.gazu}$	6,40 [t]
4	Ciężar gazu we wszystkich zbiornikach ładunkowych	$P_{wg} = P_{gazu} \cdot n_{zb}$	6350 [t]
5	Ciężar wszystkich zbiorników ładunkowych	$P_{wzb} = P_{zb} \cdot n_{zb}$	53 625 [t]
6	Objętość wszystkich zbiorników ładunkowych	$V_L = V_{zb} \cdot n_z$	69 500 [m ³]

2. Koncepcja projektowa

2.1. Zestawienie optymalnych wielkości statków gazowców

Maksymalna objętość ładunkowa dla dwóch rodzajów statków będzie – w przypadku założonej trasy żeglugowej – zdeterminowana ograniczeniami drogi wodnej prowadzącej przez Cieśniny Duńskie. Ograniczenia wymiarowe statków gazowców dotyczą szerokości, zanurzenia, wysokości przelotowej i maksymalnej długości. Według danych literaturowych [2] $B_{max} = 43$ m, $T_{max} = 15$ m, $H_{max} = 57$ m, $L_{max} = 285$ m.

W wyniku analizy projektowej – opartej o zależności regresyjne opracowane na podstawie danych ze statków zbudowanych i istniejących projektów statków, wyznaczono podstawowe wielkości techniczno-eksploatacyjne statków LNG i CNG. Oszacowano przede wszystkim ich maksymalną objętość ładunkową na założoną linię żeglugową. Dla gazowca LNG maksymalna objętość zbiorników ładunkowych nie powinna przekroczyć $V_L = 150\,000\text{ m}^3$, dla statku CNG: $V_L = 69\,500\text{ m}^3$. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry projektowe dwóch typów gazowców.

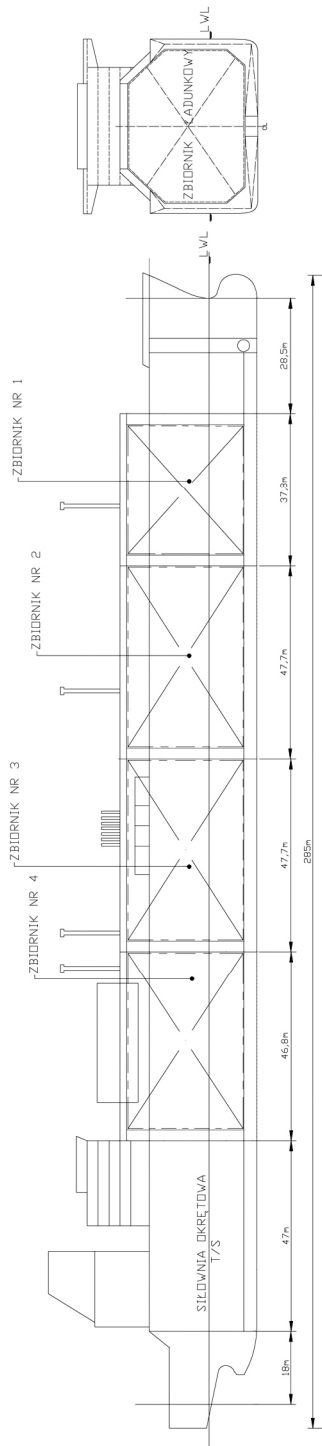
Tabela 2. Wymiary główne i parametry projektowe gazowców LNG, CNG

Lp.	Parametr	Typy gazowców		
		LNG	CNG	jednostka
1	Objętość zbiorników ładunkowych statku V_L	150 000	69 500	m^3
2	Ciężar ładunku	64 300	16 000	t
3	Ciężar właściwy gazu skroplonego/sprężonego	0,43	0,23	t/m^3
4	Długość całkowita L_c	285 ^{*)}	264,0	m
5	Długość między pionami L_{pp}	273,5	250,0	m
6	Szerokość B	43,0 ^{*)}	43,0 ^{*)}	m
7	Wysokość boczna H	26,7	23,8	m
8	Wysokość szańca zbiornika ładunkowego H_{trak} /Wysokość butli	34,0	32,0	m
9	Moduł objętościowy LBH	314 005	255 850	m^3
10	Zanurzenie projektowe T	11,85	9,85	m
11	Współczynnik pełnotliwości podwodzia C_B	0,745	0,77	–
12	Wyporność D	106 894	84 000	t
13	Nośność DWT	75 500	19 500	t
14	Masa statku pustego MSP	31 400	64 500	t
15	Wskaźnik wykorzystania wyporności: $\eta = \frac{DWT}{D}$	0,706	0,232	–
16	$F_n = \frac{v}{\sqrt{L_w g}}$	0,2	0,185	–
17	Moc napędu	28 000	19 500	kW

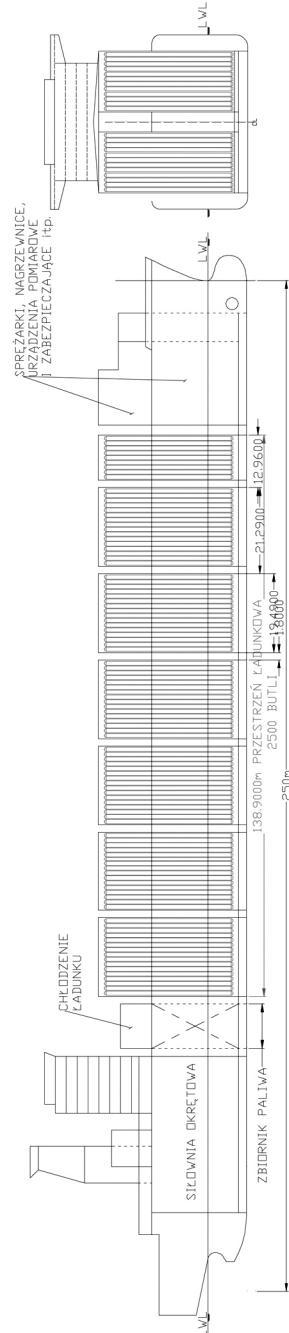
^{*)} ograniczenia wymiarowe dróg wodnych

2.2. Rozplanowanie głównych przedziałów na statku

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono koncepcję projektową bocznej sylwetki analizowanych typów statków ze zwymiarowanymi głównymi przedziałami.



Rys. 4. Koncepcja projektowa statku typu LNG – widok boczny i przekrój poprzeczny [opracowanie własne]



Rys. 5. Koncepcja projektowa statku typu CNG – widok boczny i przekrój poprzeczny [opracowanie własne]

3. Analiza kosztów eksploatacji

3.1. Obliczenie okresu eksploatacyjnego

Okres eksploatacji dla statków (tabela 2) i założonej linii żeglugowej z Małoyaki do Świnoujścia obliczono według następujących zależności:

- czas eksploatacji statku z ładunkiem:

$$T_L = \frac{L_T}{V_{lad} \cdot 24} \quad (1)$$

V_{lad} – prędkość z ładunkiem [w],

L_T – długość trasy [km];

- czas eksploatacji statku pod balastem:

$$T_B = \frac{L_T}{V_{bal} \cdot 24} \quad (2)$$

V_{bal} – prędkość z ładunkiem [w],

$V_{bal} = V_{lad} + 0,5$.

- Założenia:

- czas oczekiwania w porcie $T_{ocz} = 0,5$ [doby],

- czas załadunku i rozładunku $T_{ZAL} = 1$ [doba], $T_{ROZ} = 2$ [doby].

- Całkowity czas podróży okrężnej:

$$T_C = T_L + T_B + T_{ocz} + T_{ZAL} + T_{ROZ} \text{ [doby]} \quad (3)$$

- Ilość podróży w ciągu roku – przy założeniu czasu eksploatacyjnego

$T_E = 320$ dób

$$N_R = \frac{T_E}{T_C} \quad (4)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

3.2. Obliczenie kosztów związanych z eksploatacją

Do szacowania kosztów eksploatacyjnych, związanych z podróżą wzięto pod uwagę najistotniejsze składowe, tj: koszty paliwa ciężkiego oraz koszty utrzymania załogi. Koszty paliwa K_{pal} uzależniono głównie od masy jego zapasów M_{pal} , które z kolei zależą od mocy silnika głównego PB i jednostkowego zużycia paliwa ρ_{pal} oraz jednostkowego kosztu paliwa JK_{pal} . Koszty utrzymania załogi K_{zat} uzależniono od liczby załogi, stawki godzinowej oraz czasu trwania rejsu. Dane wejściowe do obliczeń ww. kosztów eksploatacyjnych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Dane wejściowe do obliczeń kosztów eksploatacyjnych

Lp.	Parametr	Statek LNG	Statek CNG
1	Moc silnika głównego PB [kW]	28 000	19 500
2	Jednostkowe zużycie paliwa ρ_{pal} [g/kWh]	210	180
3	Masa zapasu paliwa M_{pal} z zapasem 10% [t]	1150	990
4	Liczba załogi/oficerów [osoby]	25/10	20/8
5	Jednostkowe koszty paliwa ciężkiego JK_{pal} [\$/t] [5]	150	
6	Stawka godzinowa dla załogi/oficerów [\$/h]	15/40	

Wyniki obliczeń w formie porównania kosztów eksploatacyjnych i ilości podróży dla dwóch typów statków przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Porównanie kosztów eksploatacyjnych i ilości podróży statku LNG i CNG

Lp.	Parametry	Statek LNG	Statek CNG
1	Objętość zbiorników ładunkowych [m ³]	150 000	69 500
2	Ilość zbiorników ładunkowych (zbiorniki membranowe/butle stalowe) [sztuki]	4	2500
3	Stopień skroplenia/sprężenia [-]	600 : 1	250 : 1
4	Ilość uzyskanego gazu naturalnego [mln m ³]	90,0	17,38
5	Prędkość statku v [węzły]	19,5	18,0
6	Czas podróży okrężnej t_p [doby]	7,4	8,35
7	Liczba podróży statku w ciągu roku n_R	32	38
8	Liczba całej floty – niezbędna do zapewnienia ciągłości dostaw n_{fl}	2	8
9	Koszty paliwa [\$/]	172 500	117 000
10	Koszty załogi [\$/]	137 640	124 250
11	Koszty eksploatacyjne jednej podróży statku [\$/]	310 140	241 250
12	Roczne koszty eksploatacyjne statku [mln\$/rok]	9,9	9,2
13	Roczne koszty eksploatacyjne całej floty [mln\$/rok]	20,0	70,0
14	Koszt budowy statku [mln\$]	180	–

W przypadku statku LNG pominięto koszty związane ze skropleniem (ok. 24,5–42 \$/ 1000 m³ gazu i regazyfikacją LNG (ok. 10–17,5 \$/1000 m³ gazu) wg [6]. Są to znaczące koszty całego łańcucha dostaw – wynoszą zgodnie z danymi [3] blisko 50% całości inwestycji. Dlatego też zaletą wykorzystania technologii CNG jest przede wszystkim uniknięcie kosztów związanych z budową instalacji do skraplania gazu ziemnego, jego magazynowania i regazyfikacji. Technologia ta rozwija się i posiada coraz więcej zalet ekonomicznych, dzięki czemu warto byłoby wziąć ją pod uwagę w planowanym transporcie gazu ziemnego do Polski.

Roczne koszty eksploatacyjne całej floty nie uwzględniają porównania kosztów budowy ze względu na brak rzetelnych danych w przypadku statku CNG. Koszt gazowca LNG został oceniony na poziomie 180 mln\$.

Wnioski

W artykule w wyniku analizy projektowej oszacowano optymalną a zarazem maksymalną wielkość statków do przewozu gazu w postaci skroplonej i sprężonej dla linii żeglugowej Polska–Norwegia. Wymiary dwóch typów statków zdeterminowane są ograniczeniami drogi wodnej, a w przypadku CNG dodatkowo dużym ciężarem butli ładunkowych w stosunku do ilości przewożonego gazu. Droga wodna jak i parametry przyszłego polskiego gazoportu nie pozwalają na przyjęcie największych gazowców typu Q-max.

Zdolność przewozowa statku CNG jest w stosunku do technologii LNG ponad 2-krotnie mniejsza. Czas i liczbę podróży w ciągu roku uzyskano na podobnym poziomie. Liczba całej floty ze względu na zdolność ładunkową jest w przypadku CNG 3-krotnie większa, czego konsekwencją są wyższe koszty eksploatacyjne.

Analiza kosztów nie wykazała oczekiwanej, zdecydowanej przewagi technologii CNG nad LNG dla badanej trasy. Bez uwzględnienia całego łańcucha dostaw (w dwóch przypadkach) technologia CNG okazała się droższą. Jednakże należy podkreślić, iż wyniki obliczeń kosztów eksploatacyjnych dla statku CNG przedstawiają – wg danych literaturowych [3] – blisko 90% wszystkich kosztów łańcucha dostaw gazu, a w przypadku statku LNG jest to zaledwie 45%.

Bibliografia

1. Bortnowska M.: Development of new technologies for shipping natural gas by sea, Polish Maritime Reserch 3(61) 2009 Vol 16; pp. 70–78.
2. Bortnowska M.: Technological and operational concept of an LNG carrier, Scientific Journals, Maritime University of Szczecin 2010, 21(93) pp. 28–33.

3. Deshpande A. Michael J. Economides: CNG: An Alternative Transport for Natural Gas Instead of LNG, University of Houston, 2006.
4. Embankment A.: Interim guidelines for the construction and equipment of ships carrying natural gas hydrate pellets (NGHP) in bulk, LONDON SE1 7SR, MSC.1/Circ.1363 30 June 2010, IMO.
5. MAN B&W Diesel A/S, LNG Carrier Propulsion by ME-GI Engines and/or Reliquefaction, Copenhagen, Denmark 2007.
6. Trzop S.: Hossa na nowe technologie w transporcie i magazynowaniu gazu ziemnego, *Nowoczesne Gazownictwo* 3 (X) 2005.

Recenzent:
Jerzy KUBICKI

Analysis of optimum size of ships for natural gas transportation with the use of various transport technologies

Key words

LNG ship, liquefied gas, CNG carrier, compressed gas, capacity cargo, operating costs.

Summary

The increase in demand for natural gas in the world and the limited capacity of pipelines will cause an increase in prices; therefore, alternative natural gas transportation technologies must take into account economic, environmental and safety concerns.

The article presents an analysis of the design concepts for the transport of gas in its various forms, particularly, liquefied natural gas (LNG ships), compressed natural gas (CNG ships) and in the form of gas hydrates (NGH ships). The main parameters of vessels with particular reference to cargo capacity are characterised and compared. An estimated number of voyages during the year, the number of the fleet on the route and approximate operating costs are considered. The analysis concerns the transport of natural gas from Norway to Poland.

