

Dariusz NANOWSKI<sup>1</sup>

## **ANALIZA WYDAJNOŚCI CHŁODNICZEJ KASKADOWEGO OBIEGU SKRAPLANIA ETYLENU I STANU IZOLACJI ZBIORNIKÓW ŁADUNKOWYCH PODCZAS TRANSPORTU ŁADUNKU NA GAZOWCU LPG O POJEMNOŚCI 22500 M<sup>3</sup>**

W pracy przedstawiono metody analizy służące do oceny efektów schładzania etylenu podczas transportu morskiego tego ładunku. Wykonano je na statku transportującym etylen, gdzie stwierdzono znaczne różnice pomiędzy zakładanymi przez projektantów prędkościami schładzania w zbiornikach ładunkowych, a tymi uzyskiwanymi podczas podróży morskiej. Temperatura ładunku wynosiła około minus stu stopni Celsjusza. Problemy stwierdzono po dziesięciu latach eksploatacji statku. Przeprowadzone obliczenia i testy miały za zadanie przeanalizowanie dwu głównych możliwości spadku prędkości chłodzenia ładunku, tj. obniżenia współczynnika wydajności chłodniczej systemu kaskadowego skraplania ładunku oraz stanu izolacji zbiorników ładunkowych. W tym celu połowa ładunku została odcięta od instalacji skraplającej na okres czterdziestu ośmiu godzin, a druga połowa etylenu w zbiornikach była w tym czasie schładzana przez wszystkie trzy układy instalacji kaskadowej. Wzrost temperatury w zbiornikach w okresie dwu dni testu umożliwił dokonanie obliczeń ilości ciepła napływającego poprzez izolację termiczną do ładunku. W celu obliczenia wydajności chłodniczej obiegów kaskadowych wykonano szczegółowe pomiary w dwu różnych okresach czasu i w różnej konfiguracji. Obliczenia przeprowadzono na oceanie Atlantyckim w okolicy wysp Azorskich przy średniej temperaturze otoczenia wody i powietrza ok. 19°C.

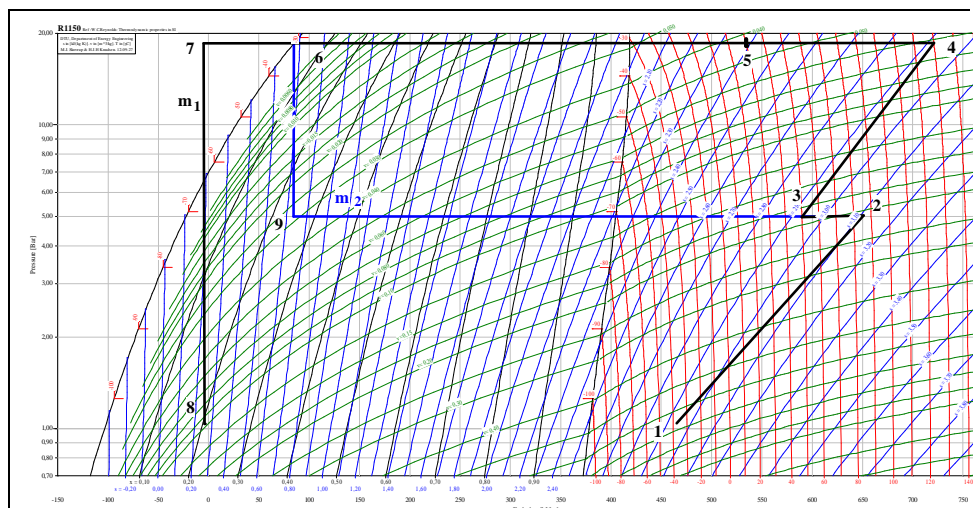
**Słowa kluczowe:** statek LPG, etylen, obieg kaskadowy, wydajność chłodnicza

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Dariusz Nanowski, Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81-225 Gdynia, tel. +48 58 690 14 49, d.nanowski@wm.am.gdynia.pl

## 1. Wprowadzenie

Transport etylenu drogą morską wiąże się z jego schładzaniem w zbiornikach ładunkowych do temperatury ok.  $-103^{\circ}\text{C}$  [1,4]. Wykorzystując kaskadowe obiegi chłodnicze utrzymuje się w ten sposób ciśnienie w tych zbiornikach zbliżone do atmosferycznego i spełnia jednocześnie typowe warunki odbiorcy na terminalu wyładunkowym. Podróże morskie od portu załadunkowego do odbiorcy trwają czasami dobę, czasami dziesięć lub więcej. W tym czasie temperatura ładunku jest obniżana maksymalnie w ekstremalnych warunkach (temperatura wody morskiej  $30^{\circ}\text{C}$ ) o ok. 0,6 K na dobę, zgodnie z typowymi projektami etylenowców, czyli statków przystosowanych do przewozu tego ładunku. Na rysunku 1 przedstawiono typowe procesy realizowane podczas schładzania etylenu [2].



Rys. 1. Procesy realizowane w obiegu kaskadowym schładzania etylenu

Fig. 1. Processes performed in cascade cycle of ethylene refrigeration

Pary etylenu o temperaturze ok.  $-60^{\circ}\text{C}$  zasysane są przez dwustopniową sprężarkę tłokową i w pierwszym stopniu sprężane do ciśnienia ok. 0,4 MPa (proces 1-2). Po schłodzeniu par w chłodnicy międzystopniowej (2-3) następuje proces sprężania 3-4 stopnia drugiego do ciśnienia 1,7 MPa. Przy tym ciśnieniu etylen jest wstępnie schłodzony za pomocą wody morskiej do temperatury ok.  $35^{\circ}\text{C}$  (proces 4-5), a potem kierowany do chłodzonego obiegiem kaskadowym skraplacza etylenu gdzie skrapla się przy temperaturze ok.  $-35^{\circ}\text{C}$  (5-6). Proces dławienia kondensatu 7-8 poprzedzony jest jego dochłodzeniem w chłodnicy międzystopniowej do temperatury  $-65^{\circ}\text{C}$ . Procesy 6-9-3 przedstawione niebie-

skim liniami są przemianami strumienia masowego etylenu wykorzystywanego jako element chłodzący w chłodnicy międzystopniowej (ang. *economizer*).

Całkowita wydajność chłodnicza, oraz faktyczny stan techniczny trzech takich układów kaskadowych zainstalowanych na pokładzie decyduje o szybkości schładzania etylenu na omawianym statku. Jednocześnie zbiorniki ładunkowe w których transportowany jest etylen są izolowane za pomocą warstwy styropianu o grubości zapewniającej uzyskanie współczynnika przenikania  $k$  o wartości:

$$k = 0,186 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (1)$$

co ma zapewnić optimum pomiędzy nakładami inwestycyjnymi statku, a ilością ciepła napływającego do ładunku.

## 2. Napływ ciepła z otoczenia do zbiorników ładunkowych

Po załadunku etylenu i rozpoczęciu podróży morskiej stwierdzono, że prędkość schładzania 11000 ton etylenu wynosi ok. 0,2 K na dobę we wszystkich czterech zbiornikach, zamiast wspomnianych wyżej 0,5-0,6K. Przeprowadzone przez załogę inspekcje samych zbiorników, jak i instalacji skraplania nie wskazały żadnej przyczyny tak znacznego obniżenia prędkości chłodzenia etylenu. Ponieważ istnieją dwa główne powody tj. spadek wydajności chłodniczej instalacji skraplania etylenu i wzrost ilości ciepła napływającego do zbiorników ładunkowych wskutek utraty własności cieplnych izolacji, w celu rozstrzygnięcia po której stronie leży problem przeprowadzono test.

Dwudniowy test przeprowadzony podczas podróży morskiej polegał na wyłączeniu z chłodzenia na 48 godzin zbiorników nr 1 i nr 2 w celu określenia przyrostu temperatury ładunku, a co za tym idzie ilości ciepła, które napłynęło do tych zbiorników. Jednocześnie zbiorniki ładunkowe nr 3 i nr 4 były chłodzone przez wszystkie trzy układy kaskadowe instalacji skraplania etylenu, dzięki czemu uzyskano dane do obliczenia rzeczywistej wydajności chłodniczej sprężarek ładunkowych. Wyniki wartości obserwowanego napływu ciepła w niechłodzonych w okresie 48 godzin zbiornikach nr 1 i nr 2 przedstawia tabela 1.

Zmiana entalpii etylenu została obliczona przy średniej temperaturze ładunku w zbiornikach statku. W ciągu 48 godzin temperatura ładunku wzrosła o 2K, a obliczony napływ ciepła wyniósł 156,5 kW, zamiast oczekiwanych 78,6 kW, łącznie dla obu zbiorników nr 1 i nr 2. Jeżeli uwzględni się napływ ciepła do zbiorników nr 3 i nr 4, o takiej samej wielkości i ilości ładunku jak nr 2, to całkowity napływ ciepła do etylenu wyniesie ok. 320 kW, zamiast zaprojektowanych 162,2 kW tj. 197% przyjętego do usunięcia przez system skraplania ładunku ciepła.

Tabela 1. Wartości uzyskane podczas testu dla zbiorników nr 1 i nr 2

Table 1. Values obtained during the test for the tanks no1 and no 2

		<b>Zbiornik nr 1</b>	<b>Zbiornik nr 2</b>
Powierzchnia izolacji	m <sup>2</sup>	1632	1868
Masa stali zbiornika	x10 <sup>3</sup> kg	438,1	440,7
Masa ładunku	x10 <sup>3</sup> kg	2730,57	3105,7
Temperatura początkowa etylenu	°C	-99	-99,3
Ciśnienie początkowe	bar g	0,28	0,25
Temperatura końcowa etylenu	°C	-97	-97,4
Ciśnienie końcowe	bar g	0,5	0,47
Obliczony napływ ciepła	kW	75,3	81,2
Średnia temperatura otoczenia	°C	19	19
Projektowany współczynnik przenikania k	W/m <sup>2</sup> K	0,186	0,186
Oczekiwany napływ ciepła	kW	36,6	42

### 3. Wydajność chłodnicza systemu skraplania etylenu

Wydajność chłodnicza systemu skraplania etylenu, a dokładnie wydajność chłodnicza sprężarek etylenu, była analizowana dwukrotnie, w dwu różnych układach. W tabeli 2 przedstawiono wielkości uzyskane podczas przeprowadzania opisanego wyżej testu, w którym cały system skraplania etylenu schładzał jedynie zbiorniki nr 3 i nr 4.

Tabela 2. Wartości uzyskane podczas testu dla zbiorników nr 3 i nr 4

Table 2. Values obtained during the test for the tanks no3 and no 4

<b>Zbiornik nr 3 i nr 4</b>		
Oszacowany napływ ciepła przez izolację	kW	181
Masa stali zbiornika	x10 <sup>3</sup> kg	880,7
Masa etylenu	x10 <sup>3</sup> kg	6122
Temperatura początkowa etylenu	°C	-99,1
Ciśnienie początkowe	bar g	0,27
Temperatura końcowa etylenu	°C	-102,0
Ciśnienie końcowe	bar g	0,06
Obliczone ciepło odebrane wskutek schłodzenia ładunku	kW	249
Oszacowana wydajność chłodnicza jednej sprężarki	kW	143
Średnie ciśnienie ssania	bar g	0,14
Średnia temperatura ssania	°C	-57
Katalogowa wydajność chłodnicza sprężarki z uwzględnieniem strat przegrzewu par na ssaniu sprężarki	kW	148

Oszacowana wydajność pojedynczej sprężarki 143 kW jest bardzo zbliżona z katalogową 148 kW przedstawioną w dokumentacji technicznej przez producenta. Szczególnie jeśli uwzględni się niezamierzony przegrzew par na ssaniu sprężarki wynikający z wad izolacji rurociągów ssących na drodze zbiornik

ładunkowy – sprężarka, które powodowały wzrost temperatury ssania z projektowanych  $-70^{\circ}\text{C}$  do  $-57^{\circ}\text{C}$ . W tabeli 3 przedstawiono wyniki analizy wydajności chłodniczej sprężarki etylenu w przypadku gdy wszystkie trzy układy kaskadowe chłodziły jednocześnie wszystkie cztery zbiorniki ładunkowe

Tabela 3. Wartości uzyskane podczas testu dla zbiorników nr 1-4

Table 3. Values obtained during the test for the tanks no 1-4

Zbiornik nr 1-4		
Oszacowany napływ ciepła przez izolację	kW	337
Masa stali zbiornika	$\times 10^3$ kg	1759,5
Masa etylenu	$\times 10^3$ kg	11958
Temperatura początkowa etylenu	$^{\circ}\text{C}$	-98,4
Ciśnienie początkowe	bar g	0,32
Temperatura końcowa etylenu	$^{\circ}\text{C}$	-99,2
Ciśnienie końcowe	bar g	0,27
Obliczone ciepło odebrane wskutek schłodzenia ładunku	kW	132
Oszacowana wydajność chłodnicza jednej sprężarki	kW	156
Średnie ciśnienie ssania	bar g	0,3
Średnia temperatura ssania	$^{\circ}\text{C}$	-48
Katalogowa wydajność chłodnicza sprężarki z uwzględnieniem strat przegrzewu par na ssaniu sprężarki	kW	156

W ciągu 48 godzin schładzano wszystkie zbiorniki etylenu, a uzyskana oszacowana wydajność chłodnicza pojedynczej sprężarki 156 kW również jest zgodna z wartością katalogową przewidzianą przez producenta.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone analizy wykazały, że główny problem związany z brakiem możliwości osiągania zakładanych prędkości schładzania etylenu leży po stronie izolacji zbiorników ładunkowych. Utrata własności cieplnych izolacji umożliwia jak oszacowano prawie dwukrotnie większy (197%) napływ ciepła do ładunku niż jest to założone w projekcie instalacji.

Kolejnym krokiem w ustaleniu przyczyny wzrostu współczynnika przenikania tej izolacji jest pobranie jej próbki ze statku i szczegółowe badania laboratoryjne, mające na celu ustalenie przyczyny takiego stanu rzeczy. Może to być wada materiałowa izolacji, bądź jej nieprawidłowa eksploatacja.

Przeprowadzanie testów opisanych powyżej na statku podczas jego eksploatacji zakłóca i obniża chłodzenie etylenu wydłużając czas transportu i ostatecznie przekazania go odbiorcy. Rosną również koszty eksploatacji samego gazowca. Jednym z rozwiązań, które ułatwiałyby szybkie analizy w określaniu przyczyn spadku prędkości chłodzenia ładunku (nie tylko etylenu): izolacja czy system skraplania mógłby być licznik kondensatu skroplonego ładunku. Obecnie nie wykorzystuje się go na gazowcach, jednak precyzyjny pomiar ilości

kondensatu kierowanego z instalacji skraplania do zbiorników ładunkowych mógłby umożliwić szybkie porównanie wydajności poszczególnych sprężarek, co podczas eksploatacji nie jest sprawą prostą [3].

### Literatura

- [1] McGuire and White: Liquefied gas principle on ships and in terminals, Witherby & Co, London 2000.
- [2] Nanowski D.: Wybrane parametry procesów termodynamicznych rzeczywistego obiegu kaskadowego wykorzystywanego do morskiego transportu etylenu, Technika chłodnicza i klimatyzacyjna, nr 4, 2012, s. 182-185.
- [3] Nanowski D.: Ocena pracy tłokowych sprężarek ładunkowych na statkach LPG na podstawie analizy procesów schładzania etylenu, Technika chłodnicza i klimatyzacyjna, nr 9, 2013, s. 410-412.
- [4] Włodarski J.K.: Bezpieczeństwo transport gazów skroplonych na zbiornikowcach, Wyższa Szkoła Morska Gdynia, 1993.

### **Analysis of refrigeration capacity of Ethylene reliquefaction plant and cargo tank insulation condition during carrying of cargo on board of 22 500 m<sup>3</sup> Ethylene carrier**

#### **S u m m a r y**

The paper presents methods of analysis used to assess results of precooling of ethylene during sea transport. The analysis was done during carrying ethylene, when significant differences between designed and performed speed of precooling in the cargo during sea transport was observed. Temperature of ethylene was around minus 100°C. The problems appeared on the board of ten years old ship. Calculation and tests were done in order to investigate two main reasons for the decrease of precooling speed of cargo, i.e. decreasing of refrigeration capacity of reliquefaction plant and the condition of the cargo tank insulation. For this purpose precooling of half cargo tank was stopped for 48 hours and reliquefaction of operated by all three installation systems. The increase of temperature in tanks during two days enabled to perform the calculation of heat quantity flow through the cargo tank insulation. The calculations of cooling capacity of cascade cycles were taken in two different periods of time and configuration. Calculations were made near the Azores in the Atlantic Ocean with average ambient and sea water temperature approximately of 19°C.

**Keywords:** LPG carrier, ethylene, cascade cycle, refrigeration capacity

DOI: 10.7862/rm.2014.25

*Otrzymano/received: 15.05.2014*

*Zaakceptowano/accepted: 20.06.2014*