



## **KONCEPCJA WYKORZYSTANIA CIEPŁA ODPADOWEGO DO WYTWARZANIA CHŁODU NA JEDNOSTKACH PŁYWAJĄCYCH**

**Artur BOGDANOWICZ,  
Tomasz KNIAZIEWICZ,  
Marcin ZACHAREWICZ**

*Akademia Marynarki Wojennej*  
*Ul. Śmidowicza 69, 81-173 Gdynia, tel.: +48 261 26 26 25*  
*e-mail: [A.Bogdanowicz@amw.gdynia.pl](mailto:A.Bogdanowicz@amw.gdynia.pl), [T.Kniaziewicz@amw.gdynia.pl](mailto:T.Kniaziewicz@amw.gdynia.pl),  
[M.Zacharewicz@amw.gdynia.pl](mailto:M.Zacharewicz@amw.gdynia.pl)*

### **Streszczenie**

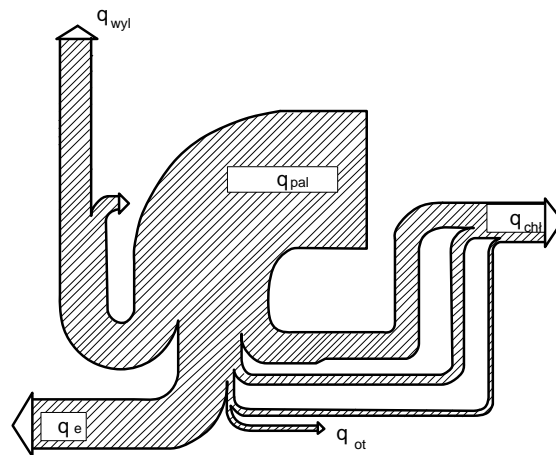
*W artykule podjęto rozważania nad możliwościami wykorzystania ciepła odpadowego z urządzeń pracujących w siłowni okrętowej na potrzeby wytwarzania chłodu. Pod uwagę wzięto urządzenia absorpcyjne, do których zasilania wystarczająca jest energia cieplna. Autorzy przeprowadzili analizę urządzeń pod kątem możliwości wykorzystania ich jako źródeł ciepła o niskich parametrach energetycznych. Pod uwagę wzięto silniki napędu głównego, silniki pomocnicze oraz kotły okrętowe. Analizie poddano główne źródła strat energetycznych takie jak spaliny wylotowe i woda chłodząca.*

*Słowa kluczowe: chłodnie absorpcyjne, silniki spalinowe, ciepło odpadowe*

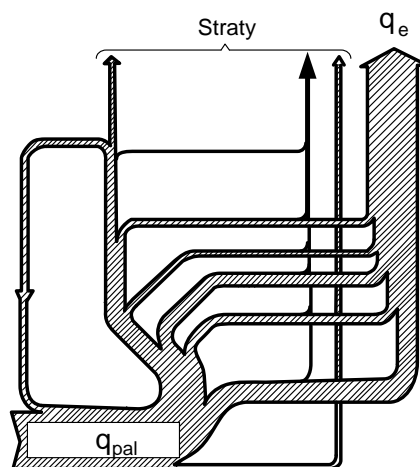
### **1. Wstęp**

Zgodnie z definicją siłownia okrętowa stanowi złożony układ silników, maszyn i urządzeń mających za zadanie pokrycie zapotrzebowania na energię mechaniczną, elektryczną i ciepłą [1]. W skład siłowni wchodzi zarówno silniki napędu głównego jak i pomocnicze. Najczęściej są to silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym. Ponadto w siłowni zawsze znajdują się urządzenia niezbędne dla zapewnienia poprawnej pracy silników spalinowych takie jak pompy, sprężarki, wymienniki ciepła. Często spotykanymi urządzeniami montowanymi w siłowniach okrętowych są kotły oraz agregaty chłodnicze i klimatyzacyjne. Źródłami energii na okręcie są silniki spalinowe oraz kotły okrętowe. Każde z tych urządzeń ma sprawność niższą od 100%. Wynika to z faktu występowania szeregu strat

takich jak: chłodzenia, wydechu, niecałkowitego i niepełnego spalania paliwa oraz straty mechaniczne w węzłach ciernych (w przypadku silników). Wszystkie z wymienionych źródeł strat energii, z wyjątkiem strat niecałkowitego spalania) ulegają rozproszeniu w postaci ciepła. Sprawność współczesnych silników okrętowych może dochodzić nawet do 55%, pozostałe 45% energii stanowią straty. Sprawność kotłów okrętowych jest zdecydowanie wyższa, sięga nawet 95% [6]. Przykładowe bilanse energetyczne silnika okrętowego (rys. 1.) oraz kotła (rys. 2.) przedstawiono za pomocą wykresów Sankey'a.



Rys. 1. Bilans energetyczny okrętowego tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym [4]



Rys. 2. Bilans energetyczny kotła okrętowego [2]

Na rysunkach oznaczono ciepło doprowadzone wraz z paliwem  $q_{pal}$ , straty chłodzenia  $q_{chl}$ , straty ciepła unoszonego wraz ze spalinami  $q_{wyl}$ , energię cieplną równoważną energii mechanicznej  $q_e$ , oraz ciepło przekazaną parze przegrzanej  $q_{par}$ . Z przedstawionej analizy wynika, że głównym źródłem energii cieplnej (odpadowej) są silniki okrętowe, w których ciepło to stanowi nawet do 60% ciepła doprowadzonego do silnika poprzez spalanie paliwa (w zależności od sprawności).

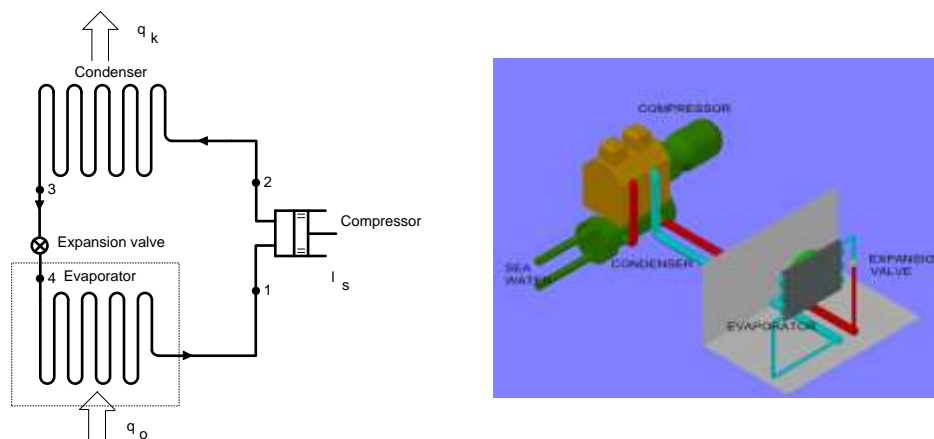
W przypadku kotłów straty energetyczne są niewspółmiernie niższe i wynoszą zazwyczaj od 5 do 15%. W związku z tym w dalszej analizie skupiono się na okrętowych silnikach spalinowych.

W klasycznych rozwiązaniach energia unoszona wraz ze spalinami jest wykorzystywana w układach turbodoładowania silników oraz w kotłach regeneracyjnych.

Inną koncepcją wykorzystania ciepła odpadowego jest użycie go do „wytwarzania chłodu” w absorpcyjnych urządzeniach chłodniczych.

## 2. Absorpcyjne urządzenia chłodnicze

W eksploatacji jednostek pływających często istnieje konieczność obniżenia a następnie utrzymania na zadanym poziomie temperatury przewożonych ładunków oraz produktów spożywczych. Ponadto praktycznie każda jednostka pływająca wyposażona jest w urządzenia klimatyzacyjne. Dąży się w nich do obniżenia temperatury powietrza poniżej temperatury otoczenia. Jest to niezbędne do zapewnienia odpowiednich warunków komfortu klimatycznego tj. wilgotności powietrza oraz jego temperatury. Obecnie większość urządzeń chłodniczych stosowanych na statkach stanowią urządzenia sprężarkowe. W najprostszym układzie składają się one ze sprężarki, dwóch wymienników ciepła (skraplacza oraz parownika) oraz z zaworu rozprężnego. Schemat sprężarkowego urządzenia chłodniczego pokazano na rysunku 3.

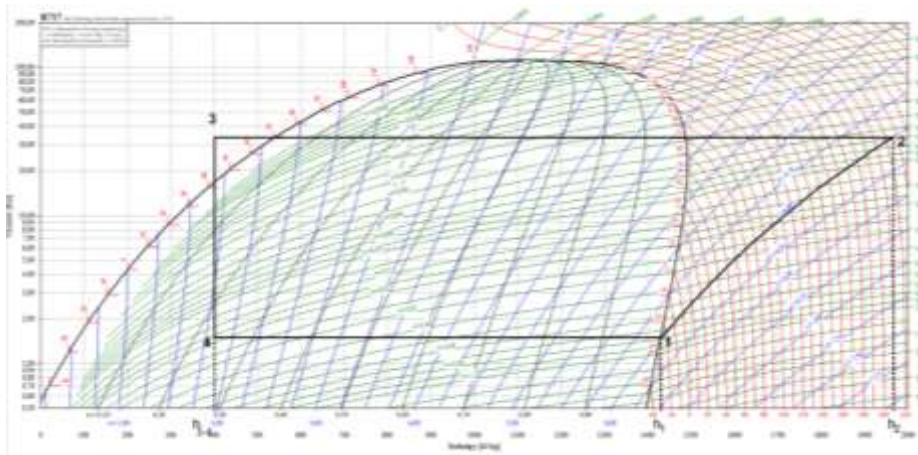


Rys. 3. Schemat sprężarkowego urządzenia chłodniczego [1]

W urządzeniu tym zachodzą następujące przemiany termodynamiczne:

- 1-2 – adiabatyczne sprężania (zakłada się, że nie wstępuje wymiana ciepła pomiędzy powietrzem a elementami sprężarki),
- 2-3 – chłodzenie izobaryczne, a w zakresie pary mokrej izobaryczno-izotermiczne,
- 3-4 – dławienie izentalpowe,
- 4-1 – ogrzewanie izobaryczne, w zakresie pary mokrej izobaryczno-izotermiczne.

Przemiany te można przedstawić za pomocą wykresu ciśnienie – entalpia (rysunek 4). Założono, że czynnikiem chłodniczym jest R717 czyli amoniak. Temperaturę parowania przyjęto na 253K natomiast temperaturę skraplania na 343K.



Rys. 4. Obieg chłodniczy przedstawiony na wykresie ciśnienie entalpia

Obieg chłodniczy przedstawiony na rysunku 4 pozwala w prosty sposób na obliczenie jednostkowej wydajności chłodniczej, czyli ilości ciepła, jaką odbiera 1 kg czynnika od środowiska w parowniku, która jest opisana zależnością [3]:

$$q_0 = h_1 - h_4 \quad (1)$$

Jednostkową wydajność cieplną skraplacza, którą opisuje zależność [3]:

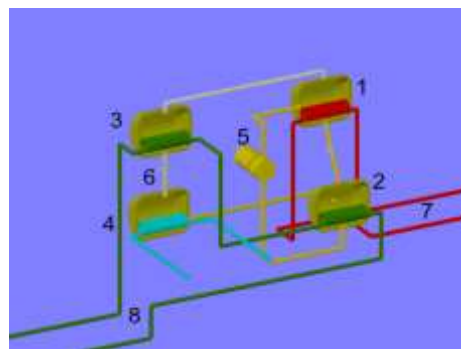
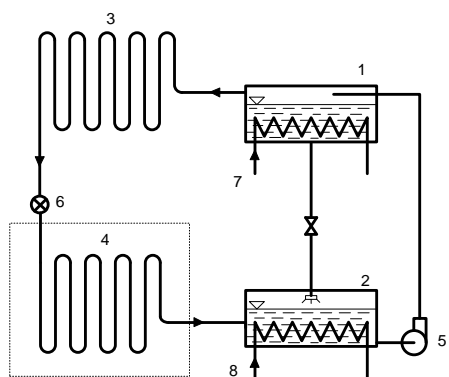
$$q_k = h_2 - h_3 \quad (2)$$

Jednostkową teoretyczną pracę sprężania [3]:

$$l_s = h_2 - h_1 \quad (3)$$

Z analizy zaprezentowanego wykresu obiegu chłodniczego bazującego na czynniku R717 Jednostkowa wydajność chłodnicza  $q_0$  układu wynosi  $1020 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ , natomiast jednostkowa teoretyczna praca sprężania  $l_s$   $560 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ . Z tego wynika, że jednostkowa praca teoretyczna, dla przyjętych parametrów pracy obiegu, stanowi około 50% jednostkowej wydajności chłodniczej.

W przypadku obiegu absorpcyjnego urządzenie chłodnicze składa się z następujących elementów składowych: warkana, absorbera, pompy transportującej czynnik, wymienników ciepła (skraplacz i parownik) oraz z zaworu rozprężnego. Schemat najprostszego urządzenia absorpcyjnego pokazano na rysunku 5.



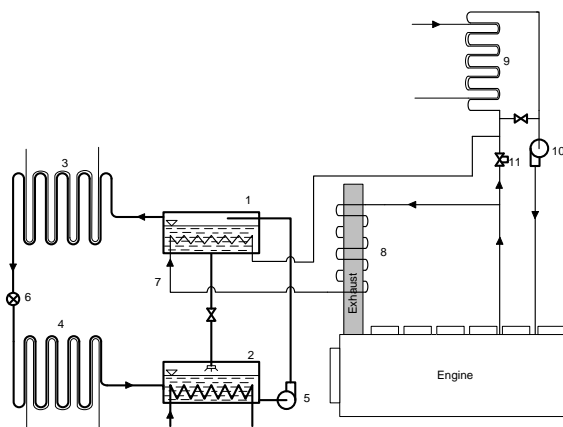
Rys. 5. Schemat absorpcyjnego urządzenia chłodniczego [3]

1 – warnik, 2 – absorber, 3 – skraplacz, 4 – parownik, 5 – pompa czynnika,  
6 – zawór rozprężny, 7 – źródło ciepła doprowadzanego do warnika, 8 – chłodzenie absorbera

Absorpcyjne urządzenie chłodnicze różni się od urządzenia sprężarkowego sposobem wytworzenia różnicy ciśnień skraplania i parowania. W urządzeniu absorpcyjnym sprężarka jest zastąpiona zespołem absorber – warnik – pompa czynnika. Różnica ciśnień jest wytwarzana dzięki procesowi absorpcji czynnika chłodniczego w absorberze (rys. 5 – element 2) oraz desorpcji czynnika w warniku – element 1. W wyniku absorpcji czynnika wytwarzane jest ciśnienie odpowiadające ciśnieniu parowania czynnika w parowniku urządzenia. W absorberze następuje rozpuszczanie czynnika chłodniczego w cieczy np. amoniaku w wodzie lub pary wodnej w bromku litu. W wyniku tego procesu powstaje roztwór stężony. Absorbowaniu czynnika towarzyszy spadek ciśnienia w parowniku. Stężony roztwór przepompowywany jest do warnika za pomocą pompy 5. W warniku dostarczane jest ciepło, które powoduje desorpcję czynnika chłodniczego, któremu towarzyszy powstawanie tzw. wysokiego ciśnienia odpowiadającego ciśnieniu skraplania czynnika w skraplaczu. W wyniku „uwalniania czynnika” tworzy się roztwór ubogi, który poprzez zawór trafia do absorbera. Czynnik „uwolniony” w warniku trafia do skraplacza – 3, w którym oddaje ciepło do otoczenia i ulega przemianie fazowej (z gazu do cieczy) następnie ciecz jest dławiona w zaworze rozprężnym 6 do postaci pary mokrej. Trafia ona do parownika 4, gdzie zachodzi przemiana fazowa z pary mokrej w gaz, przemianie tej towarzyszy pobieranie ciepła z otoczenia. W urządzeniu chłodniczym absorpcyjnym źródłem energii koniecznej do jego funkcjonowania jest ciepło doprowadzane do warnika oraz energia elektryczna niezbędna do napędu pompy 5.

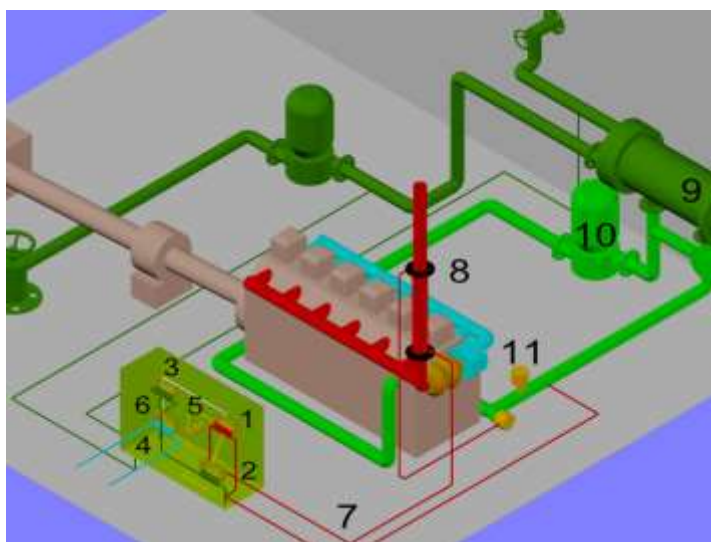
Źródłem energii cieplnej dostarczanej do warnika może być ciepło odpadowe z urządzeń zamontowanych w siłowni okrętowej np. z silników spalinowych. Przykładowy schemat urządzenia absorpcyjnego korzystającego z ciepła odpadowego okrętowego tłokowego silnika spalinowego przedstawiono na rysunku 6. Sposób rozmieszczenia poszczególnych elementów siłowni okrętu pokazana na rysunku 7.

Przedstawione na rysunkach 6 i 7 absorpcyjne urządzenie chłodnicze zasilane jest ciepłem odpadowym okrętowego tłokowego silnika spalinowego. Woda ogrzewająca warnik pobierana jest z układu chłodzenia silnika okrętowego. Punkt poboru zlokalizowany jest na wyjściu z silnika, gdzie woda chłodząca podczas pracy ustalonej silnika ma około  $50\div 70^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 6. Schemat absorpcyjnego urządzenia chłodniczego zasilanego ciepłem odpadowym okrętowego tłokowego silnika spalinowego

1 – wernik, 2 – absorber, 3 – skraplacz, 4 – parownik, 5 – pompa czynnika,  
 6 – zawór rozprężny, 7 – woda ogrzewająca wernik, 8 – wymiennik ciepła zainstalowany na kanale wylotowym,  
 9 – chłodnica wody słodkiej, 10 – pompa obiegowa wody słodkiej, 11 – zawór dławiący.



Rys. 7. Wizualizacja rozmieszczenia elementów chłodni absorpcyjnej w siłowni okrętu

Woda ta jest dodatkowo dogrzewana za pomocą wymiennika zainstalowanego na układzie wylotu spalin silnika 6. Na wyjściu z wymiennika osiąga ona temperaturę około  $90^{\circ}\text{C}$ . Woda wykorzystywana do podgrzewania wernika ma stosunkowo niskie parametry energetyczne, lecz znane są w literaturze rozwiązania bazujące, gdzie tak niskoenergetyczne źródło ciepła jest wystarczające [5]. Woda ta w dalszej kolejności wykorzystywana jest do ogrzewania wernika 7, z którego wraca z powrotem do obiegu wody słodkiej chłodzącej silnik, gdzie w dalszej kolejności kierowana jest do chłodnicy wody słodkiej 9. Różnica ciśnień w instalacji wody ogrzewające wernik uzyskiwana jest dzięki zastosowaniu pompy obiegowej wody słodkiej 10 oraz zaworu dławiącego 11.

### 3. Podsumowanie

Zaprezentowany w artykule problem badawczy stanowi propozycję minimalizacji strat energetycznych generowanych przez okrętowe tłokowe silniki spalinowe. Jednym ze sposobów wykorzystania ciepła odpadowego jest ogrzewanie wężownika urządzenia absorpcyjnego. Urządzenie to może zostać wykorzystywane zarówno do chłodzenia – chłodnia jak i do produkcji ciepła pompa ciepła. Obecnie coraz popularniejsze jest stosowanie urządzeń absorpcyjnych, w gospodarce lądowej, wykorzystujących ciepło odpadowe produkowane np. przez elektrociepłownię w okresie letnim [5]. Oczywiście zagadnienie produkowania dużych ilości ciepła odpadowego dotyczy również gospodarki morskiej, w której wykorzystywane są powszechnie silniki cieplne do napędu jednostek pływających oraz do produkcji energii elektrycznej. W przypadku silników tłokowych ciepło odpadowe stanowi zazwyczaj około 50% energii zawartej w paliwie. Tak duże ilości ciepła wykorzystywane są zazwyczaj w kotłach utylizacyjnych. Alternatywą dla kotłów mogą być urządzenia absorpcyjne stosowane do wytwarzania chłodu na potrzeby klimatyzacji lub chłodzenia ładunku. Rozwiązanie takie pozwoli na zaoszczędzenie energii elektrycznej niezbędnej do napędu powszechnie stosowanych chłodniczych urządzeń sprężarkowych.

### References

- [1] Balcerski A.: Siłownie okrętowe, 1986 Politechnika Gdańska.
- [2] Górski Z., Perepeczko A.: Okrętowe kotły parowe, 2013 Akademia Morska w Gdyni.
- [3] Gutkowski K. M., Butrymowicz D. J.: Chłodnictwo i klimatyzacja, 2006, WNT.
- [4] Piotrowski I, Witkowski K.: Okrętowe silniki spalinowe, 2003 Trademar Gdynia.
- [5] Tiwari V.: Solar absorption domestic refrigeration system, 2015 Phagwara, Punjab (India).
- [6] Wajand J. A., Wajand J. T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe, 2005 WNT.