



## ANALIZA METOD STOSOWANYCH PRZY PROJEKTOWANIU OKRĘTOWYCH INSTALACJI GRZEWczyCH

**Dominik Kreft**

*Politechnika Gdańska  
ul. Narutowicza 11/12, 80-950 Gdańsk, Poland  
tel.: +48 506 850 746  
e-mail: dominikkreft@gmail.com*

### **Abstrakt**

*W artykule przedstawiono wybrane problemy dotyczące etapów projektowania instalacji grzewczych. Przedstawiono metody doboru zapotrzebowania na ciepło na statkach morskich podczas wstępnego projektowania oraz technikę sporządzania bilansu ciepła.*

**Słowa kluczowe:** instalacja pary grzewczej, instalacja oleju grzewczego, projektowanie wstępne, zapotrzebowanie na ciepło

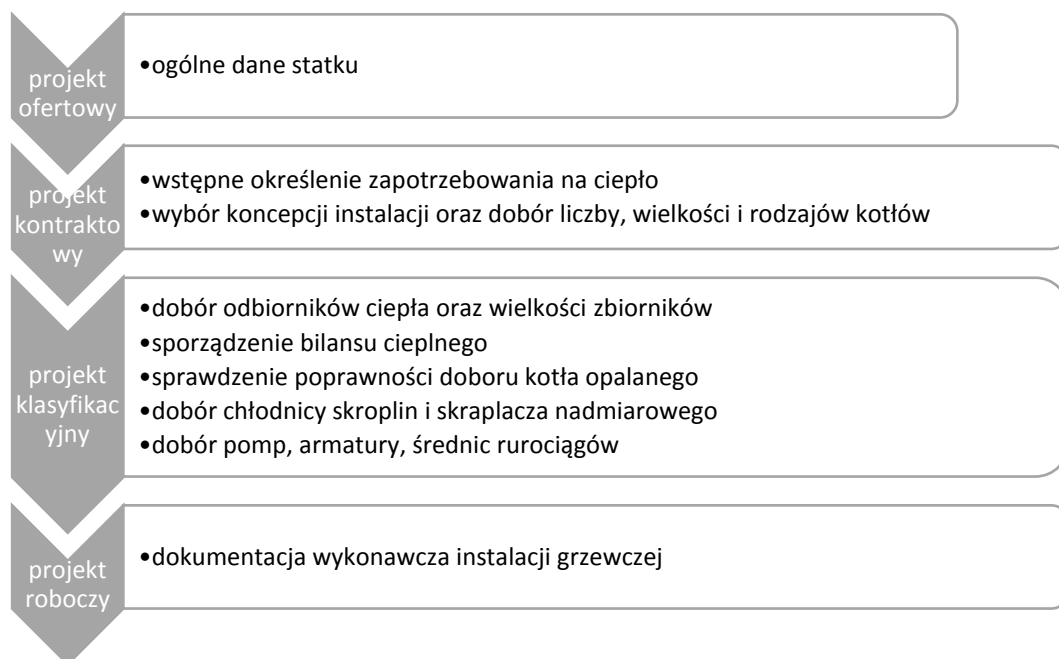
### **1. Wstęp**

Zapotrzebowanie na ciepło, konieczne do realizacji założonych funkcji statku pokrywane jest przez okrętową instalację grzewczą. Zapotrzebowanie to jest zmienne w poszczególnych stanach eksploatacji statku. Czynniki grzewcze na statku jest wykorzystywane do podgrzewania: [2,4,10]

- paliwa (przed wirówkami, końcowe przed silnikami)
- oleju (przed wirówkami)
- wody (sanitarnej i przed silnikami)
- węzownic w zbiornikach paliwa, oleju i wody
- nagrzewnic w centralach klimatyzacyjnych

Ogólny tok postępowania przy projektowaniu instalacji grzewczej odbywa się w podobny sposób do projektowania innych instalacji okrętowych. Na początku tworzony jest projekt ofertowy. Następnie w projekcie kontraktowym wykonywane jest zestawienie różnych wariantów systemów grzewczych i zostają podjęta decyzja, aby wybrać najkorzystniejszy. Dysponując niewielkim zasobem danych należy wstępnie określić zapotrzebowanie statku na ciepło. Dobiera również wielkość, liczbę i rodzaj kotłów. W projekcie klasyfikacyjnym, po doborze wszystkich odbiorników ciepła i wielkości zbiorników, sporządza się bilans cieplny. W końcowym etapie dobiera chłodnicę skroplin oraz skraplacz nadmiarowy a następnie inne urządzenia takie jak pompy, odwadniacze,

zawory itp. Na schemacie graficznym 1 przedstawiono etapy projektowania okrętowej instalacji grzewczej. [5,6]



Rysunek 1 Ogólny schemat postępowania przy projektowaniu parowej instalacji grzewczej

Przy doborze elementów instalacji grzewczej, należy wziąć pod uwagę minimalizację zużycia energii cieplnej oraz użycie do jej wytwarzania najtańszego paliwa przy jednoczesnym wykorzystaniu ciepła odpadowego. Warto rozważyć różne warianty medium grzewczego jak para sucha nasycona, olej grzewczy lub woda kotłowa. Wybrane rozwiązanie należy przeanalizować w aspekcie kosztów inwestycyjnych, kosztów obsługi i napraw oraz integralności całego systemu siłowni okrętowej. [8]

## 2. Wstępne określenie zapotrzebowania na ciepło

Aby wstępnie określić zapotrzebowanie statku na ciepło, korzysta się z metod wskaźnikowych i zależności regresyjnych. Wszystkie zależności umożliwiają jedynie oszacowanie całkowitego zapotrzebowania na ciepło. Nie istnieją metody, które określają eksploatacyjne zapotrzebowanie i uwzględniają losowy charakter wytwarzania oraz zużywania ciepła. [3]

Do najpopularniejszych metod należą wzory empiryczne, które powstały na podstawie list statków podobnych lub doświadczenia projektantów. Wzory stosowane są w pewnych przedziałach wartości zmiennych niezależnych, określonych przez twórców tych zależności. Z uwagi na różne lata tworzenia wzorów, należy mieć na uwadze zmiany konstrukcyjne instalacji siłownianych. Zużycie ciepła określone jest dla stanu eksploatacyjnego statku, w którym zapotrzebowanie na nie jest najwyższe. Wzory (1-6) pochodzące z pracy [4] opracowane zostały w zależności od typu statku i mocy silnika głównego:

Kontenerowce:

$$D_{kmax} = 2537 + 0,0657N_{sg} [kg/h] \quad (1)$$

Promy i statki typu ro-ro:

$$D_{kmax} = 1382 + 0,15265N_{sg} \text{ [kg/h]} \quad (2)$$

Statki pasażerskie:

$$D_{kmax} = -4763 + 1,15191N_{sg} \text{ [kg/h]} \quad (3)$$

Tankowce:

$$D_{kmax} = 24981 + 2,4289N_{sg} \text{ [kg/h]} \quad (4)$$

Gazowce:

$$D_{kmax} = -1010 + 0,4761N_{sg} \text{ [kg/h]} \quad (5)$$

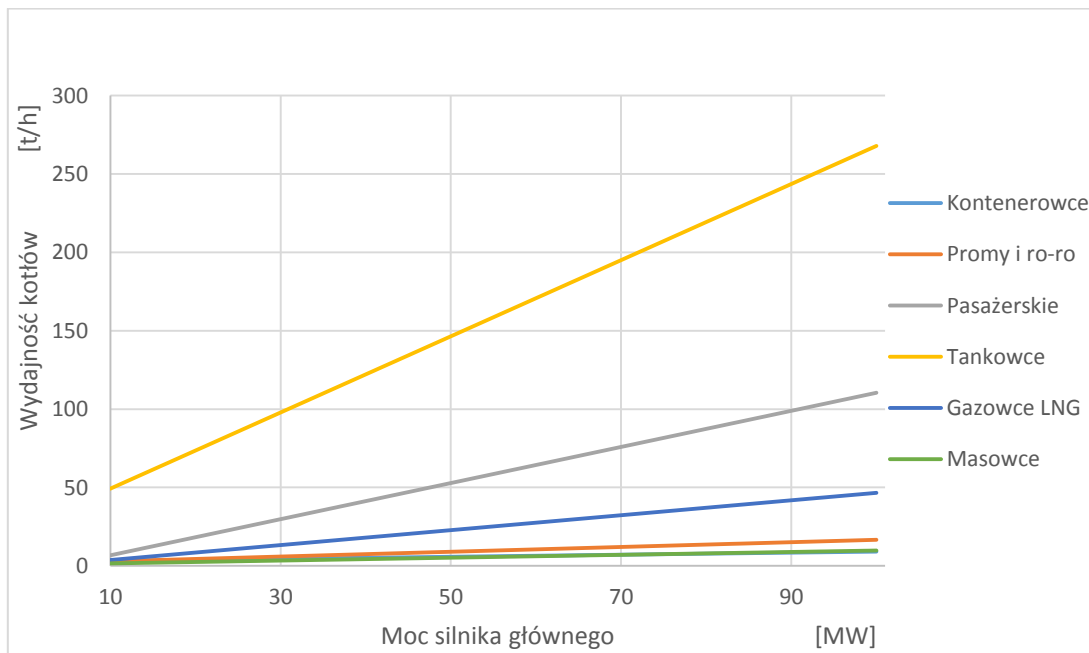
Masowce:

$$D_{kmax} = 656,6 + 0,09145N_{sg} \text{ [kg/h]} \quad (6)$$

Gdzie:

$D_{kmax}$  – maksymalna wydajność kotłów, [kg/h];

$N_{sg}$  – moc silnika głównego (powyżej 10.000), [kW]



Rysunek 2 Wykres przedstawiający wydajność kotłów dla różnych rodzajów statków wg. wzorów 1-6

Wzór (7) zaproponowany w pracy [9], służy do określenia przybliżonego średniego zapotrzebowanie na parę grzewczą w warunkach zimowych dla małych i średnich statków towarowych:

$$D_{sr} = 0,075N_{sg} + 1055 \text{ [kg/h]} \quad (7)$$

Dla zbiornikowców i statków kombinowanych analogiczny wzór (8) pochodzący z pracy [7] ma postać wielomianu 3 stopnia:

$$D_{\dot{s}r} = 1,2507 \cdot 10^{-8} N_{sg}^3 - 3,7444 \cdot 10^{-4} N_{sg}^2 + 5,607 \cdot N_{sg} - 7960 [kg/h] \quad (8)$$

Inne zależności (9,10), pochodzące z pracy [7] opracowane zostały dla siłowni kontenerowców latem ( $D_L$ ) oraz zimą ( $D_Z$ ) w zależności od mocy silnika głównego, liczby załogi ( $Z$ ), zasięgu pływania ( $z [Mn]$ ), lepkości kinematycznej paliwa ( $\nu [cSt - 50^\circ C]$ ) oraz iloczynu głównych wymiarów kadłuba  $LBT[m^3]$  prezentują się następująco:

$$D_{L \dot{s}r} = 1,16Z + 0,369z - 0,53N_{SG}^{nom} - 1,4\nu + 1,4LBT \quad (9)$$

$$D_{Z \dot{s}r} = 0,149Z - 0,44N_{SG}^{nom} - 0,01\nu + 1,28LBT \quad (10)$$

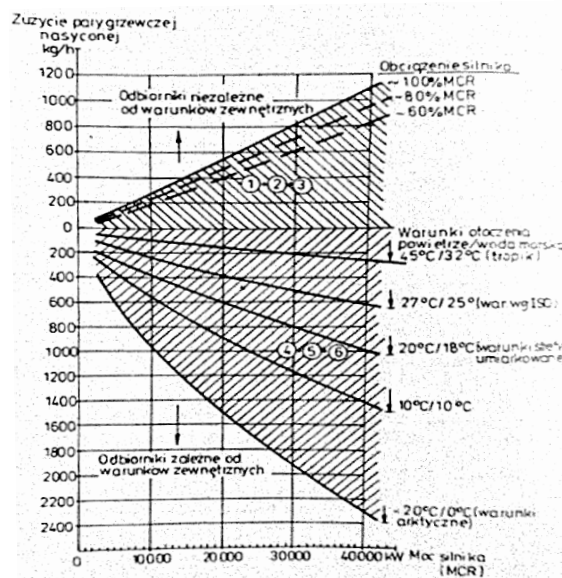
Innym sposobem określenia zapotrzebowania na ciepło na wstępnych etapach projektowania jest wykorzystanie charakterystyk w postaci wykresów podanych przez producentów silników. Na rysunku 3 pokazany jest wykres, służący do odczytania zapotrzebowania na parę grzewczą na statkach z wolnoobrotowym silnikiem MAN-B&W zasilanym paliwem ciężkim, w funkcji mocy tego silnika. Wykres podzielono na dwa rodzaje odbiorników:

Odbiorniki niezależne od warunków zewnętrznych:

- 1- podgrzewacz paliwa silnika głównego;
- 2- podgrzewacz przed wirówkami oleju smarowego;
- 3- podgrzewacz przed wirówkami paliwa

Odbiorniki zależne od warunków zewnętrznych:

- 4- podgrzewanie zbiorników zapasowych paliwa (zbiorniki pełne);
- 5- podgrzewanie zbiorników osadowych i rozchodowych paliwa;
- 6- potrzeby bytowe załogi



Rysunek 3 Wykres pomocniczy silnika MAN B&W służący do określenia zapotrzebowania na parę grzewczą

W przypadku większej liczby odbiorników ciepła należy je dodatkowo uwzględnić. Zmiana kąta nachylenia odpowiednich krzywych jest zależna od obciążenia silnika. [9]. W przypadku częściowego wypełnienia zbiorników paliwa, tangens stycznej do krzywej nr.4 zmniejsza się.

Przy wstępnym określaniu zapotrzebowania na ciepło można posłużyć się także wskaźnikami zapotrzebowania ciepła podanymi w pracy [7]. Mając wiedzę nt. wielkości

zbiorników, pojemności ładowni, liczby osób na pokładzie, można w przybliżony sposób określić zapotrzebowanie na ciepło. Wskaźniki przedstawia tabela 1.

Tabela 1 Wskaźniki zapotrzebowania energii cieplnej

Lp.	Nazwa odbiornika	Wskaźnik zapotrzebowania ciepła
1	Podgrzewanie oleju ciężkiego	1255 ÷ 2929 kJ/(h*1st temp oleju)
2	Podgrzewanie wstępne oleju ciężkiego	314 ÷ 418 kJ/kg oleju
3	Ogrzewanie pomieszczeń	10460 ÷ 14644 kJ/(h*osobę)
4	Ogrzewanie zbiorników ładunkowych	209 ÷ 1046 kJ/(h*1st temp oleju)
5	Czyszczenie zbiorników ładunkowych	837 ÷ 1046 kJ/(h*m <sup>3</sup> poj. Ładowni)
6	Produkcja wody słodkiej	4184 ÷ 20920 kJ/(h*osobę)
7	Para do celów gospodarczych	3138 ÷ 4184 kJ/(h*osobę)

### 3. Bilans cieplny

Na etapie projektu klasyfikacyjnego, gdy dobrane zostały wszystkie wymienniki ciepła, sporządza się bilans cieplny dla odpowiednich stanów. Jest on niezbędnym etapem projektowania, ponieważ, pozwala na weryfikację poprawności wstępnych założeń projektu a przede wszystkim doboru kotłów. Aby prawidłowo sporządzić analizę bilansową niezbędna jest znajomość charakterystyk pracy każdego odbiornika ciepła. Rozróżnia się 3 podstawowe stany statku towarowego: [2]

- pływanie w morzu,
- postój w porcie,
- rozruch silnika.

Ponadto w bilansie cieplnym uwzględnia się dwa skrajne warunki zewnętrzne w jakich znajduje się statek: [2]

- zimowe ( $T_{wody} = -1^{\circ}C$  ;  $T_{powietrza} = -25^{\circ}C$ ),
- letnie ( $T_{wody} = 33^{\circ}C$  ;  $T_{powietrza} = 35^{\circ}C$ )

Podczas postoju w porcie oraz rozruchu silnika używa się kotła pomocniczego opalanego paliwem ciekłym, natomiast podczas pływania w morzu, zapotrzebowanie na czynnik grzewczy zazwyczaj w całości pokrywa kocioł utylizacyjny. Jedynie w przypadkach podwyższonego zapotrzebowania na ciepło m. in. na statkach pasażerskich, trawlerach przetwórczych, zbiornikowcach i promach, może wystąpić sytuacja, w której kocioł utylizacyjny musi być wspomagany kotłem opalonym. Dla takich statków, warto rozważyć zwiększenie wykorzystania ciepła odpadowego z innych źródeł. Zapotrzebowanie na ciepło nie może przekraczać nominalnych wydajności dobranych kotłów. [9]

Przepływ masowy czynnika grzewczego przez każdy z odbiorników definiuje się za pomocą równania (11) które uwzględnia maksymalne zapotrzebowanie na ciepło, obciążenie oraz stopień jednoczesności.

$$\dot{m} = \sum_{i=1}^n \alpha_{pi} \beta_{pi} \dot{m}_{i \max} \quad (11)$$

Gdzie:

$\dot{m}$  – łączne zużycie pary przez odbiorniki, [kg/h];

$\alpha_{pi}$  – współczynnik obciążenia dla danego urządzenia i stanu eksploatacji;

$\beta_{pi}$  – współczynnik jednoczesności;

Oba współczynniki  $\alpha_{pi}$  oraz  $\beta_{pi}$  określone są za pomocą eksploatacyjnych pomiarów statków podobnych. Współczynnik obciążenia jest stosunkiem rzeczywistego zużycia ciepła przez odbiornik w danym stanie eksploatacji do zużycia maksymalnego, a współczynnik jednoczesności określa stopień jednoczesności występowania zapotrzebowania ciepła przez odbiornik lub grupę odbiorników. [2]

Tabela 2 przedstawia fragment przykładowego bilansu cieplnego (instalacja oleju grzewczego) [10]. W lewej kolumnie tabeli przedstawione są odbiorniki ciepła, w następnych kolumnach maksymalna moc grzewcza urządzeń oraz współczynnik obciążenia. Współczynnik jednoczesności został pominięty. Kolumny podzielone są na warunki zimowe i letnie oraz na stany: pływania w morzu i postoju w porcie. Następnie sumuje się iloczyny maksymalnego zużycia oraz współczynników dla odpowiednich stanów statku i sprawdza się czy wydajność dobranych kotłów jest wystarczająca.

Tabela 2 bilans instalacji oleju grzewczego.

1889-PT/501-516-02 B "HEAT BALANCE FOR THERMAL OIL SYSTEM"													
Item	Heat Consumer	pc	Cold Condition (-29 C; -2 C)				Normal Condition				Min. length of heating coils inside tank [m]		
			Max consumption [kW]	At sea		In harbour		Max consumption [kW]	At sea			In harbour	
				LF	Consumption [kW]	LF	Consumption [kW]		LF	Consumption [kW]		LF	Consumption [kW]
ENGINE ROOM EQUIPMENT													
1	HFO preheater on fuel booster module	1	105	1.0	105	0.5	52	105	0.8	53	0.4	42	
2	HFO preheater on fuel booster module (stand-by)	1	105	0	0	0	0	105	0	0	0	0	
3	HFO preheater for purifier	1	32	1.0	32	0.5	16	32	0.8	25	0.4	10	
4	HFO/MDO preheater for purifier	1	32	0	0	0	0	32	0	0	0	0	
5	Lub oil preheater for purifier (genset 1)	1	28	0.5	14	0.5	14	28	0.5	14	0.5	14	
6	Lub oil preheater for purifier (genset 2)	1	28	0.5	14	0.5	14	28	0.5	14	0	0	
7	Cooling water pre-heatre oil fueled engine no 1	for	18	0	0	0	0	18	0	0	0	0	
8	Cooling water pre-heatre oil fueled engine no 2	for	18	0	0	0	0	18	0	0	0	0	
9	Cooling water pre-heatre gas fueled engine no 1	for	18	0	0	0	0	18	0	0		0	
10	Cooling water pre-heatre for gas fueled engine no 2	1	18	0	0	0.8	14.4	18	0.8	14.4	0.8	14.4	
11	Heat tracing for HFO pipes (estimated)	1	40	1	40	1	40	18	1	18	1	18	
	SUM		442		205		136	420		124		84	

Moc grzewczą kotłów dobiera się dla warunków, gdy zapotrzebowanie na parę jest największe, zaś wielkość skraplacza nadmiarowego (12) dla różnicy pomiędzy maksymalną wydajnością kotłów a minimalnym zużyciem pary przez odbiorniki ciepła.

$$(\dot{m}_{pary}^{SN})^{max} = D_{KU}^{max} - \dot{m}_{pary}^{min} \quad (12)$$

Gdzie:

$(\dot{m}_{pary}^{SN})^{max}$  – wydajność skraplacza nadmiarowego

$D_{KU}^{max}$  – maksymalna wydajność kotłów

$\dot{m}_{pary}^{min}$  – minimalna wartość zapotrzebowania urządzeń na parę grzewczą



Chłodnicę skroplin dobiera się tak aby była w stanie schłodzić skropliny powstające przy największej wydajności instalacji parowej. (13)

$$\dot{Q}_{sk} = \frac{\dot{m}_{kp} c_{sk}}{3600} (t'_{sk} - t''_{sk}) \quad (13)$$

$\dot{Q}_{sk}$  – strumień ciepła odprowadzany w chłodnicy [kW]

$\dot{m}_{kp}$  – maksymalny masowy strumień pary grzewczej kotła  $\left[ \frac{kg}{h} \right]$

$t'_{sk}$  – temperatura skroplin na dolocie do chłodnicy [ $^{\circ}C$ ]

$t''_{sk}$  – temperatura skroplin na wylocie z chłodnicy [ $^{\circ}C$ ]

$c_{sk}$  – ciepło właściwe skroplin  $\left[ \frac{kJ}{kgK} \right]$

#### 4. Podsumowanie

Projektowanie okrętowej instalacji grzewczej ma na celu dobór najbardziej racjonalnego rozwiązania instalacji. Metody przedstawione w artykule wykorzystują metody deterministyczne w których przyjmuje się najbardziej niekorzystne warunki eksploatacji. Takie podejście może spowodować zwiększenie kosztów inwestycyjnych. Warto było by podjąć pracę w kierunku zastosowania metod i modeli probabilistycznych uwzględniających rzeczywiste (silnie zmienne) obciążenie układu odbiorników oraz rzeczywiste wydajności kotłów utylizacyjnych i opalanych. Efektem takiej pracy mogła by być metoda projektowania instalacji grzewczych która uwzględniałaby prognozowaną wydajność kotłów oraz zapotrzebowania na ciepło. Dodatkowo mogła by być stosowana na wstępnych etapach projektowania.

#### 5. Bibliografia

- [1] Balcerski, A., *Modele probabilistyczne w teorii projektowania i eksploatacji spalinyowych siłowni okrętowych*, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2007.
- [2] Balcerski, A., *Siłownie okrętowe*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1986.
- [3] Bocheński, D., *Projektowanie wstępne siłowni pogłębiarek z zastosowaniem metod i modeli probabilistycznych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
- [4] Giernalczyk, M., Górski, Z., *Siłownie okrętowe cz. 1 Podstawy napędu i energetyki okrętowej*, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2011.
- [5] Lamb, T., *Ship Design and Construction volume I*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York 2003.
- [6] Paczeński, J., Staszewski J., *Projektowanie Okrętów część I*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1974.
- [7] Urbański, P., *Gospodarka energetyczna na statkach*, Wydawnictwo Morskie, Gdynia 1978.

- [8] Watson, D.G.M., *Practical Ship Design*, Elsevier Science Ltd, Kidlington Oxford 2003.
- [9] Wojnowski, W., *Okrętowe silownie spalinowe cz. II i cz. III*, Gdańsk 1991.
- [10] Dokumentacja techniczna. *Heat balance for thermal oil system*, 1889-PT/501-516-02B. Remontowa S.A. Gdańsk 2007.