

Tomasz Tuński*

Rozwój okrętowych systemów produkcji pary nasyconej zdeterminowany wzrostem wydajności

1. Wstęp

W grupie okrętowych systemów parowych można wyodrębnić systemy (*jednostopniowe, jednocieśnieniowe*), których zadaniem jest produkcja pary wodnej nasyconej wykorzystywanej głównie do ogrzewania okrętowych mediów, takich jak paliwo, woda, olej oraz powietrze. Ze względu na uniwersalność oraz prostotę systemy produkcji pary tego typu stanowią najliczniejszą grupę z obecnie eksploatowanych. Mogą być instalowane na niemalże każdym typie obecnie produkowanych statków wykorzystywanych w transporcie morskim.

Ze względu na sposób dostarczania energii do wytworzenia pary wodnej, okrętowe systemy jej produkcji można podzielić na dwie podstawowe grupy. Pierwszą z nich stanowi grupa układów, w których wytwarzanie pary odbywa się kosztem energii cieplnej uzyskiwanej w wyniku spalania paliwa w komorze paleniskowej kotła (*kotły opalane*). Do drugiej grupy układów produkujących parę zalicza się te, w których do wytworzenia pary kotły wykorzystują energię odpadową, zawartą w gazach spalinowych silników okrętowych (*kotły utylizacyjne*).

Zadaniem kotłów opalanych jest dostarczenie wymaganych ilości pary podczas postoju statków, natomiast zadaniem kotłów utylizacyjnych jest zaspokojenie zapotrzebowania na parę podczas prowadzenia podróży morskich. Jednakże konstrukcja okrętowych systemów okrętowych umożliwia pracę równoległą obydwu kotłów w zależności od warunków otoczenia i eksploatacji statku.

2. Okrętowe systemy parowe

Rozwój okrętowych systemów produkcji pary nasyconej od standardowych systemów rozdzielonych aż do zasilanych wysokotemperaturowo systemów połączonych stał się kluczowym dla wzrostu ich wydajności. Jeszcze w latach 80. poprzedniego stulecia temperatura pary grzewczej kształtowała się na poziomie $t_s = 140 \div 145^\circ\text{C}$. W celu utrzymania takiego poziomu temperatury pary nasyconej wystarczające było stosowanie podczas podróży morskich kotłów utylizacyjnych o niskiej wydajności i ciśnieniu roboczym utrzymywanym na poziomie $p_R = 0,4 \div 0,5 \text{ MPa}$. Na obecnie produkowanych statkach do prowadzenia bezpiecznej, efektywnej i bezawaryjnej eksploatacji siłowni, wymagana jest znacznie wyższa tem-

* Zakład Siłowni Okrętowych, Wydział Mechaniczny, Akademia Morska w Szczecinie

Uproszczony schemat typowego parowego systemu rozdzielonego (*jednostopniowego, jednociśnieniowego*) przedstawiono na rysunku 1.

Jednakże rozwój większości systemów siłowni okrętowych wymusza konieczność dostarczania coraz większych ilości energii grzewczej. Zaowocowało to powstaniem nowego typu wydajniejszych i ekonomiczniejszych tak zwanych systemów połączonych.

2.2. Systemy połączone

Modyfikacja systemów rozdzielonych prowadząca do powstania systemów połączonych polegała na usunięciu oddzielnego separatora pary kotła utylizacyjnego. Jako separator pary wykorzystany został walczak kotła pomocniczego. Wspólną cechą obydwu systemów jest zainstalowanie atmosferycznych skrzyń ciepłych, których odpowietrzenie znajdowało się bezpośrednio w ich górnych pokrywach. Z tego względu temperatura skroplin gromadzonych w skrzyniach ciepłych nie mogła przekraczać 80°C. Jako że wydajność produkcji pary w kotle określa zależność (1), tak więc ograniczenie to poważnie zawężyło możliwości budowania wysokowydajnych systemów.

$$D = \frac{q}{i'' - i_{WZ}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (1)$$

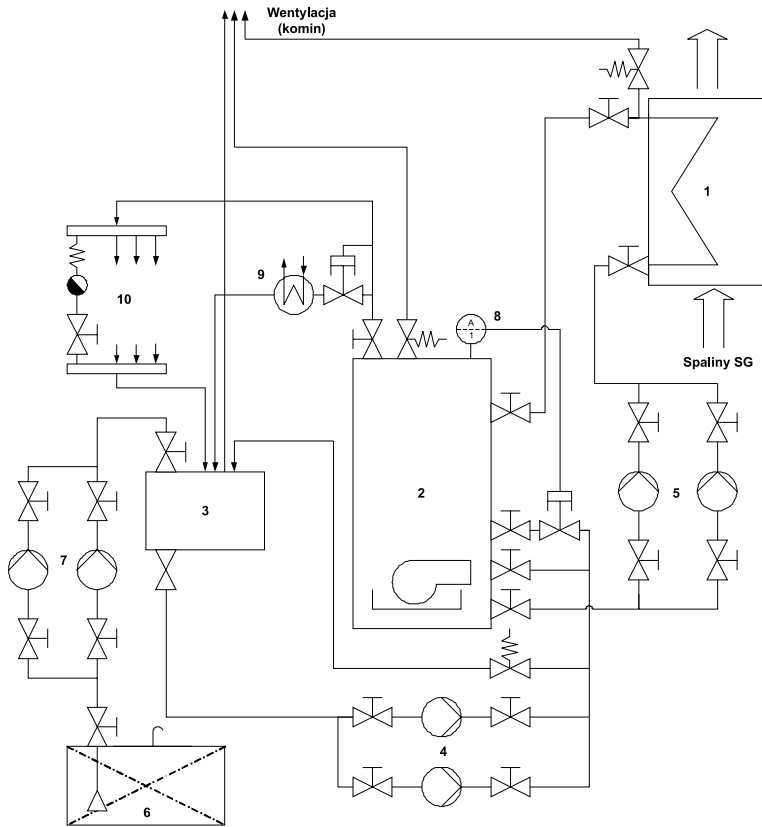
gdzie;

- D – wydajność parowa kotła, [kg/h],
- q – ilość ciepła przejętego w kotle, [kJ/h],
- i'' – entalpia pary nasyconej przy ciśnieniu panującym w kotle, [kJ/kg],
- i_{WZ} – entalpia wody zasilającej, [kJ/kg].

Jednocześnie należy się liczyć ze wzmożoną korozją tlenową, która w znaczny sposób zakłóca pracę okrętowych systemów parowych [1].

Możliwość przekroczenia granicznej temperatury kondensatu powyżej 80°C pojawiła się wraz z wprowadzeniem do eksploatacji wysokotemperaturowych, atmosferycznych skrzyń ciepłych, co pozwoliło na zaprojektowanie systemów parowych, w których temperatura skroplin w skrzyni ciepłej sięga już 90÷95°C. Tak wysoka temperatura kondensatu wymaga jednak ograniczenia silnego parowania wody przy ciśnieniu atmosferycznym. Zmniejszenie znacznych ubytków wody z systemu skroplin rozwiązano konstrukcyjnie poprzez zainstalowanie odpowietrzenia skrzyni ciepłej w postaci kilkunastometrowego, niez izolowanego, metalowego rurociągu poprowadzonego z siłowni do szczytu komina statku. Na tak wydłużonej drodze przepływu dochodzi do skroplenia się niemal całkowitej ilości odparowanej w skrzyni ciepłej wody, która spływając z powrotem do skrzyni ciepłej dodatkowo ochładza wydostającą się tą drogą parę wodną.

Uproszczony schemat typowego parowego systemu połączonego (*jednostopniowego, jednociśnieniowego*) wyposażonego w wysokotemperaturową skrzynię ciepłą przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Połączony system produkcji pary nasyconej. 1 – kocioł utylizacyjny, 2 – kocioł opalany, 3 – skrzynia cieplna, 4 – pompy zasilające kocioł opalany, 5 – pompy zasilające kocioł utylizacyjny, 6 – zbiornik wody kotłowej, 7 – pompy zasilające skrzynię cieplną, 8 – przetwornik poziomu wody w kotle, 9 – skraplacz nadmiarowy, 10 – odbiory pary

Mając na uwadze modyfikacje systemów parowych, należy stwierdzić, że główny rozwój systemów produkcji pary będzie raczej ukierunkowany na podnoszenie temperatury skroplin magazynowanych w skrzyniach cieplnych. Kolejny krok na drodze podnoszenia temperatury kondensatu został uczyniony przez producentów systemów produkcji pary poprzez wprowadzenie ciśnieniowych skrzyń cieplnych, o maksymalnych temperaturach gromadzonych skroplin 115°C . Tak wysoką temperaturę woda osiąga przy ciśnieniu nasycenia $0,12\text{ MPa}$. Z tego względu zastosowanie wysokociśnieniowych skrzyń cieplnych w miejsce atmosferycznych bez daleko idących zmian w konfiguracji systemów parowych oraz ich rozbudowie jest nie możliwe, gdyż skutkować to będzie poważnymi zakłóceniami procesu wymiany ciepła w wymiennikach zasilanych parą. Analizując publikacje firm produkujących kotły (*Aalborg, Senior, Unex*), autor nie znalazł wzmianek o produkcji systemów parowych, w których temperatura skroplin w skrzyniach cieplnych przekraczałaby wspomnianą wartość.

3. Możliwość dalszego rozwoju

Przy zachowaniu stałej wartości ilości ciepła przejętego w kotle i ciśnieniu wytwarzanej pary, podnoszenie temperatury wody zasilającej kotły jest sposobem na zwiększenie ich wydajności parowej bez konieczności zwiększania powierzchni wymiany ciepła.

Zakres temperatur skroplin gromadzonych w skrzyniach cieplnych (80°C–95°C–115°C) stanowi jednocześnie zakres maksymalnych temperatur wody zasilającej kotły. Oznacza to, iż obecnie projektanci statków mają do wyboru albo systemy nie do końca wykorzystujące możliwość podwyższania temperatury wody zasilającej kotły, albo bardziej skomplikowane systemy (*przez co droższe*) z ciśnieniowymi skrzyniami cieplnymi. Rozwiązanie tego zagadnienia wymaga połączenia systemów skroplin o temperaturze poniżej temperatury nasycenia wody (*przy ciśnieniu atmosferycznym*) z wysokotemperaturowymi podgrzewaczami, pozwalającymi podnieść temperaturę wody zasilającej tuż przed kotłem do poziomu określonego zależnością (2).

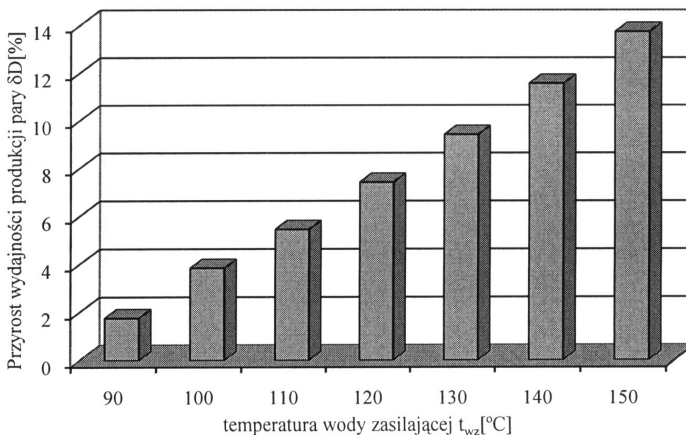
$$t_{wz} = t_s - 5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

gdzie:

t_{wz} – temperatura wody zasilającej kocioł, [°C],

t_s – temperatura pary nasyconej suchej przy ciśnieniu roboczym kotła, [°C].

Wykorzystując statyczne modele matematyczne [4], przeprowadzono serie symulacji współpracy wodnorurkowego kotła utylizacyjnego o powierzchni wymiany ciepła $F_{KU} = 275 \text{ m}^2$ z wolnoobrotowym, długoskokowym silnikiem typu 7S60MC firmy MAN-B&W pod kontem badania wpływu temperatury wody zasilającej kocioł na wzrost wysokości produkcji pary. W oparciu o uzyskane wyniki sporządzono zestawienie przyrostów wydajności produkcji pary w systemie z kotłem utylizacyjnym zasilanym wodą o różnych temperaturach, w porównaniu z wydajnością tego samego kotła zasilanego wodą o temperaturze $t_{wz} = 80^\circ\text{C}$, zgodnie z instrukcją projektanta statku (rys. 3).



Rys. 3. Przyrosty wydajności produkcji pary

Podstawowym problemem w tym systemie, jest konieczność zapewnienia dodatkowej energii grzewczej, której ilość będzie zależna od temperatury oraz masowego natężenia przepływu wody zasilającej przez podgrzewacz. Należy podkreślić, iż wykorzystanie w tym celu podgrzewaczy parowych wymusza zapewnienie dodatkowych zasobów pary grzewczej.

Wykorzystanie spalin silników wolnoobrotowych jako medium grzewczego dla wody zasilającej kotły może być niebezpieczne ze względów eksploatacyjnych, gdyż może dojść do przekroczenia dopuszczalnej temperatury 180°C. Obniżenie temperatury spalin poniżej 180°C wywołuje wykraplanie wody na powierzchniach elementów konstrukcyjnych kotłów oraz kolektorów wylotowych, co zapoczątkowuje korozję siarkową tych elementów. Tak więc, temperatura 180°C, określona jest jako minimalna, dla spalin w kolektorze wylotowym za kotłem utylizacyjnym. Częściowe obciążenia silników głównych w połączeniu z niesprzyjającymi warunkami otoczenia, znacznie podnoszą ryzyko wystąpienia takiej sytuacji. Z tego względu uzasadnione jest rozpatrzenie wykorzystania innych nośników energii w celu podniesienia temperatury wody zasilającej kocioł. Mając na uwadze elementy składowe zewnętrznego bilansu energetycznego nowoczesnych silników okrętowych oraz ich daleko idące zmiany konstrukcyjne, skutkujące znacznym ograniczeniem temperatury gazów wylotowych, należy zwrócić uwagę na znaczny wzrost zasobów energetycznych zawartych w powietrzu doładowującym. Publikowane dane dotyczących projektowanych dotychczas okrętowych systemów produkcji pary nasyconej wykazują, że prowadzone w przeszłości próby budowy systemów odzysku energii zawartej w powietrzu doładowującym nie zostały w pełni rozwinięte. Dlatego też wydaje się celowe przeanalizowanie możliwości szerszego wykorzystania powietrza doładowującego jako źródła energii dla wysokotemperaturowego podgrzewacza wody zasilającej kotły w celu podniesienia ich wydajności.

4. Wnioski

Jednym ze sposobów zwiększenia wydajności produkcji pary nasyconej w okrętowych systemach parowych jest podniesienie temperatury wody zasilającej kotły. W obecnie produkowanych siłowniach okrętowych nadal nie są stosowane systemy w pełni wykorzystujące jej zalety. Ponadto standardowo stosowane sposoby podwyższania wydajności systemów parowych statków eksploatowanych w żegludze transportowej osiągają kres możliwości.

Mając na uwadze, że w nowoczesnym transporcie morskim coraz większe znaczenie zyskują jednostki szybkie, zdolne do prowadzenia żeglugi na każdym akwenie przy dowolnych warunkach otoczenia, oraz że rosnące ilości magazynowanego w zbiornikach bunkrowych paliwa pozostałościowego o coraz niższej jakości generują znaczny wzrost zapotrzebowania na energię do celów grzewczych, niezbędne jest znalezienie dodatkowych źródeł energii wspomagającej produkcję pary na statkach morskich [5]. Wykorzystanie energii tra-

conej w procesie chłodzenia powietrza doładowującego silników okrętowych jako źródła zasilania wysokotemperaturowych podgrzewaczy wody zasilającej kotły przyczyni się do wzrostu wydajności systemów produkcji pary a także znacząco przyczyni się do wzrostu ogólnej sprawności siłowni okrętowej.

Dodatkowo należy zwrócić uwagę na rosnące znaczenie pary nasyconej nie tylko jako nośnik energii grzewczej [2, 3]. Wraz z wprowadzeniem do produkcji najnowszych turbo-generatorów (MITSUBISHI, MAN DIESEL) pojawiła się możliwość wykorzystania pary nasyconej do bezpośredniej produkcji energii elektrycznej.

Literatura

- [1] Górski Z., Perepeczko A., *Okrętowe kotły parowe*. Fundacja Rozwoju WSM w Gdyni, Gdynia 2002.
- [2] MAN B&W Diesel A/S., *Thermo efficiency System for reduction of fuel consumption and CO₂ emission*. Copenhagen, 2005.
- [3] Mitsubishi Heavy Industries Ltd., *Steam Turbine generator*. <http://www.mhi.co.jp>, 2008.
- [4] Tuński T., *Symulacja pracy kotła utylizacyjnego z wykorzystaniem jego statycznego modelu*. III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna EXPLO-SHIP'2004, Zeszyty Naukowe nr 73, AM Szczecin, Szczecin, 2003, 509.
- [5] Tuński T., *Zapotrzebowanie na energię grzewczą w siłowniach okrętowych statków szybkich*. Международный Сборник Научных Трудов, НАДЕЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, КГТУ, Kaliningrad, 2006, 215.