ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 5(77)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

OBSŁUGIWANIE MASZYN I URZĄDZEŃ OKRĘTOWYCH
O M i U O 2 0 0 5

Cezary Behrendt

Wpływ temperatury wody zasilającej na eksploatację okrętowych kotłów pomocniczych

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia gazowe i temperatura wody, korozja, wydajność parowa kotłów, badania symulacyjne

W artykule przedstawiono wpływ zanieczyszczeń wody tlenem i dwutlenkiem węgla na procesy korozyjne pomocniczych kotłów okrętowych. Przeanalizowano wpływ temperatury wody zasilającej na proces jej odgazowania i wzrost wydajności parowej kotłów. Zaproponowano system utrzymania stałej, zadanej wartości temperatury w zbiorniku wody zasilającej.

Feed Water Temperature Influence on Ship's Auxiliary Boilers Operation

Key words: gaseous contamination and feed water temperature, corrosion, boiler steam capacity, simulation research

The paper demonstrates the influence of oxygen and carbon dioxide on corrosion processes in ship's auxiliary boilers. The influence of feed water temperature on degassing and on increase of boilers steam output were analysed. A constant feed water temperature system was proposed.

Wstęp

Okrętowe pomocnicze kotły parowe, zarówno opalane, jak i utylizacyjne, stanowią ważne urządzenie wyposażenia siłowni okrętowej. Zapewniają dostarczenie energii cieplnej niezbędnej do prawidłowego funkcjonowania okrętowego systemu energetycznego. Uszkodzenie kotłów i przerwanie wytwarzania energii cieplnej w większości przypadków oznacza również przerwanie pracy całego okrętowego systemu energetycznego.

Jednym z czynników wpływających na bezawaryjną pracę kotłów jest jakość wody zasilającej. Pod pojęciem jakości wody zasilającej rozumiana jest zawartość w niej zanieczyszczeń takich jak: mechaniczne (organiczne i nieorganiczne), koloidalne (organiczne najczęściej humusowe i nieorganiczne najczęściej mineralne), cząsteczkowe (sole: wapniowe, sodowe, potasowe, magnezowe, żelazowe, manganowe; węglany sodowe; chlorek wapnia; krzemiany sodu i potasu).

Do zanieczyszczeń cząsteczkowych zalicza się również zanieczyszczenia gazowe. Gazy występują w wodzie w postaci roztworów lub tworzą z nią mniej lub bardziej trwałe związki chemiczne. Głównymi zanieczyszczeniami gazowymi są tlen, azot i dwutlenek węgla. Azot, jako gaz obojętny, pomijany jest przy ocenie szkodliwości zanieczyszczeń w kotłach pomocniczych pracujących przy niskich ciśnieniach roboczych. Tlen i dwutlenek węgla natomiast są składnikami wysoce szkodliwymi dla materiałów, z jakich wykonane są kotły i ich armatura.

W artykule przeanalizowano wpływ zanieczyszczeń gazowych na procesy zużycia materiałów kotłowych. Dokonano również analizy wpływu temperatury wody zasilającej kotły na proces jej odgazowania oraz wzrost wydajności parowej kotła. Zaproponowano również rozwiązanie techniczne systemu grzewczego zapewniającego utrzymanie w skrzyni cieplnej zadanej temperatury wody zasilającej.

1. Wpływ zawartości gazów w wodzie zasilającej na procesy zużycia materiałów kotłowych

Rozpuszczone w wodzie gazy – tlen i dwutlenek węgla – przyczyniają się do rozwoju różnych rodzajów korozji. W wyniku uwalniania się tlenu z wody dostarczonej do kotła dochodzi do korozji chemicznej czyli utleniania się stalowych powierzchni. Powstała warstwa tlenków żelaza pokrywa powierzchnię wewnątrz kotła, tworząc warstwę ochronną powstrzymującą dalszy postęp korozji. Naruszenie tej warstwy, spowodowane odkształceniami termicznymi, przepływem wody i mieszaniny parowo-wodnej, decyduje o dalszym postępie i szybkości procesu korozji chemicznej.

Najgroźniejsza jest korozja elektrochemiczna przebiegająca w obecności tlenu. Niejednorodność powierzchni metalu, zależna między innymi od struktury stopu, powstałych osadów metalicznych i tlenków metali, powoduje powstanie lokalnych ogniw. W wyniku reakcji elektrochemicznej jony żelaza przechodzą do roztworu, a w miejscu uszkodzenia powstaje wżer. Jony żelaza hydrolizują wodę, tworząc rozpuszczalne wodorotlenki żelaza. W miarę nasycenia się wody kotłowej wodorotlenkami działanie ogniw słabnie, a w stanie nasycenia zachodzi ich całkowita polaryzacja. Miejsce wżeru pokrywa się warstwą tlenków i postęp korozji zastaje zwolniony. Obecny w wodzie rozpuszczony tlen powoduje, że rozpuszczalne wodorotlenki żelaza zostają utlenione do nierozpuszczalnych wodorotlenków żelazowych, wytrącających się w postaci osadów. Uniemożliwia to uzyskanie stanu nasycenia, wskutek czego ogniwo zostaje aktywne, a postęp korozji nie zostaje zahamowany.

Dwutlenek węgla znajduje się w wodzie w stanie związanym (na przykład w węglanach), w stanie półzwiązanym (w wodorowęglanach) oraz w stanie wolnym. Największy wpływ na zawartość dwutlenku węgla w wodzie ma zawartość wodorowęglanów. Ich rozpad powoduje uwolnienie dodatkowej ilości dwutlenku węgla.

Dwutlenek węgla nadaje wodzie odczyn kwaśny (współczynnik pH może spaść nawet poniżej 5) [6, 7, 10]. Działanie silnie kwaśnej wody na żelazo jest trawiące, w rezultacie następuje zmniejszenie grubości ścian blach i rur kotłowych, co doprowadza do ich pęknięć. Dwutlenek węgla w obecności tlenu i chlorków może powodować korozję elektrochemiczną mosiądzu polegającą na odcynkowaniu stopu. Proces ten dotyczy armatury kotłowej.

Efektem obecności tlenu i dwutlenku węgla w wodzie kotłowej są przyśpieszone procesy zużycia materiału kotła. Szczególnie niebezpieczna jest korozja elektrochemiczna, której efektem są głębokie wżery korozyjne prowadzące do przebić materiału.

Jak wykazała analiza źródeł literaturowych [1, 3, 4, 7, 9] 30% uszkodzeń okrętowych pomocniczych kotłów parowych spowodowanych jest procesami korozyjnymi.

2. Odgazowanie wody w okrętowych systemach parowych

Odgazowanie wody zasilającej, a szczególnie usunięcie z niej tlenu i dwutlenku węgla, znacznie zmniejszy procesy korozji kotłów.

Może ono być realizowane za pomocą metod fizycznych lub chemicznych. Najczęściej stosowaną metodą fizyczną odgazowania wody jest jej obróbka termiczna. Metody chemiczne działają selektywnie i polegają na dawkowaniu do wody związków chemicznych wiążących składniki gazowe.

W okrętownictwie do odgazowania wody stosuje się głównie metodę termiczną, za pomocą której można usunąć z niej wszystkie rozpuszczone gazy, i to do ilości śladowych [1, 6, 7]. Metoda chemiczna może spowodować dodatkowe zasolenie wody substancjami chemicznymi stosowanymi do wiązania gazów.

W systemach turboparowych (napęd statku od turbiny parowej) można spotkać połączenie obydwu metod odgazowania wody. Odgazowanie termiczne ma miejsce w odgazowywaczu umieszczonym nad zbiornikiem wody zasilającej kotły. Para odprowadzana z upustu turbiny kierowana jest do odgazowywacza, gdzie wskutek wymiany ciepła między parą a wodą następuje jej podgrzanie do temperatury wrzenia. Wydzielone gazy wraz z parą wodną przepływają przez chłodnicę oparów, skąd kondensat spływa do zbiornika wody zasilającej, a gazy odprowadzane są do atmosfery. Również woda w zbiorniku wody zasilającej jest podgrzewana w celu uniknięcia procesu wtórnego rozpuszczania się gazów w wodzie. Metoda ta zapewnia usunięcie tlenu z wody do zawartości 0,1 – 0,05 g/m^3 [7, 10, 11].

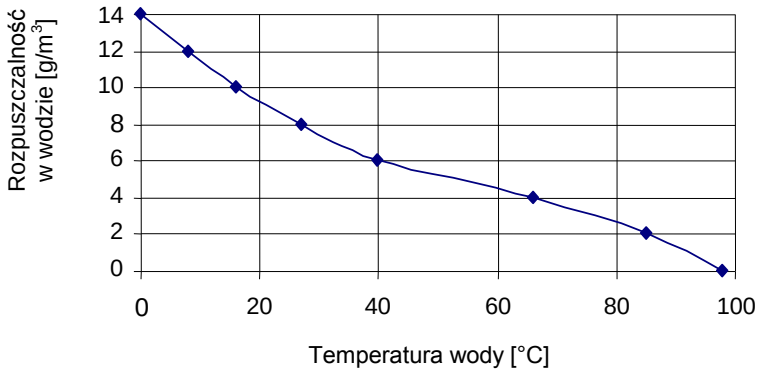
W przypadku zastosowania na statkach kotłów wysokociśnieniowych, wymagających zasilania wodą bez zawartości tlenu, jako końcową metodę odgazowania wody stosuje się jej obróbkę chemiczną. Najczęściej stosowanym do tego celu związkiem chemicznym jest hydrazyna, która nie powoduje zwiększenia zawartości chlorków w wodzie.

W systemach parowo-wodnych kotłów pomocniczych wytwarzających parę do celów grzewczych, odgazowywacze wody są nieczęsto spotykane i tylko w przypadku kotłów o dużej wydajności parowej (powyżej 20 t/h) [3, 11]. Tak więc dla większości kotłów pomocniczych istnieje realne niebezpieczeństwo zasilania ich wodą z rozpuszczonymi gazami.

Parametrem decydującym o rozpuszczalności gazów w wodzie jest temperatura. Wraz ze wzrostem temperatury obniżają się ciśnienia cząstkowe rozpuszczonych w wodzie gazów. W temperaturze wrzenia wody ciśnienia te spadają do zera. Na rysunku 1, na podstawie zebranych danych literaturowych [5, 6, 10], przedstawiono rozpuszczalność tlenu w wodzie w zależności od temperatury, przy ciśnieniu atmosferycznym. Wybrano ciśnienie atmosferyczne (1013 hPa) ze względu na to, że większość zbiorników wody zasilającej jest zbiornikami otwartymi, w których panuje takie właśnie ciśnienie. Temperatura w zbiorniku wody zasilającej może się zmieniać w zakresie od temperatury otoczenia do temperatury wrzenia (100°C). Duże spadki temperatury wody wystąpią przy uzupełnianiu wody w systemie.

Temperatura wody uzupełniającej w zbiorniku jest równa temperaturze otoczenia i w warunkach zimowych będzie niewiele wyższa od 0°C. Również warunki eksploatacji (stan obciążenia kotła) mają wpływ na temperaturę wody w zbiorniku wody zasilającej. Przy małych wydajnościach parowych temperatu-

ra wody zasilającej jest niska (40 – 60°C), a przy wydajnościach nominalnych osiąga temperaturę wrzenia.



Rys. 1. Rozpuszczalność tlenu w wodzie w zależności od temperatury
Fig. 1. Oxygen content in water as function of temperature

Osiągnięcie temperatury wrzenia oznacza konieczność schładzania skroplin, aby zapobiec silnemu zaparowaniu siłowni. Temperatura schłodzenia powinna wynosić 85°C w przypadku krótkich rurociągów odpowietrzających zbiornik wody zasilającej i 95°C w przypadku długich odpowietrzeń wyprowadzonych do komina.

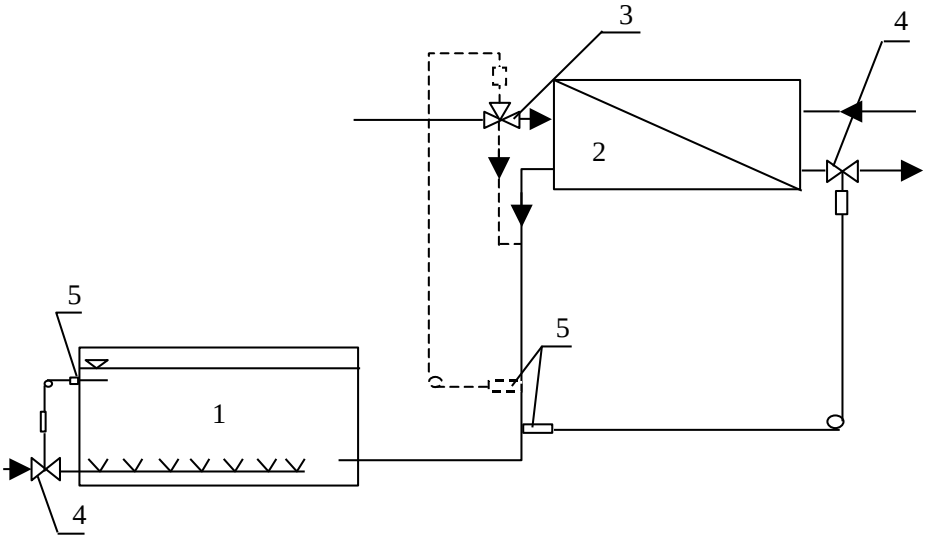
Tak więc w warunkach eksploatacyjnych należy się liczyć z dostarczaniem do kotła wody z zawartością tlenu od 1 do 6 g/m^3 (rys. 1).

W systemach parowo-wodnych spotykane są parowe, mieszankowe wymienniki ciepła mające na celu utrzymanie zadanej temperatury w zbiorniku wody zasilającej.

W przypadku wrzenia wody i intensywnego jej parowania, załoga reaguje uruchamiając chłodnicę skroplin dopływających do zbiornika, a temperaturę schłodzenia ustala ręcznie poprzez dławienie zaworem odlotu wody chłodzącej z chłodnicy. Mając na uwadze powyższe niedogodności, autor zaproponował nowe rozwiązanie systemu chłodzenia i podgrzewania wody zapewniające utrzymanie stałej, zadanej wartości temperatury w zbiorniku wody zasilającej. Schemat systemu przedstawia rysunek 2.

Opracowane rozwiązanie jest proste z punktu widzenia rozwiązań technicznych systemów regulacji temperatury. Zastosowano zawór dławiący i trójdrożny oraz cieczowe regulatory temperatury.

W przypadku spadku temperatury wody w zbiorniku (*1*) poniżej wartości nastawionej na regulatorze (*5*), oddziałuje on, zwiększając podniesienie grzybka zaworu dławiącego (*4*). Para wprowadzona bezpośrednio do wody w zbiorniku (*1*) podnosi jej temperaturę do wartości zadanej.



Rys. 2. Proponowany system utrzymania temperatury w zbiorniku wody zasilającej: *1* – zbiornik wody zasilającej, *2* – chłodnica skroplin, *3* – zawór trójdrożny, *4* – zawór dławiący, *5* – cieczowy regulator temperatury

Fig. 2. Proposed constant feed water temperature system: 1 – hot well, 2 – condensate cooler, 3 – three-way valve, 4 – throttling valve, 5 – fluid temperature controller

W przypadku przekroczenia zadanej wartości temperatury wody na umieszczonym na rurociągu dolotowym skroplin do zbiornika (*1*) regulatorze (*5*), oddziałuje on na zawór dławiący (*4*) na odlocie wody chłodzącej z chłodnicy (*2*). Rosnące masowe natężenie przepływu wody chłodzącej zintensyfikuje wymianę ciepła i spadek, do wartości zadanej, temperatury skroplin płynących do zbiornika (*1*). Drugim wariantem, zaznaczonym na rysunku 2 linią przerywaną, jest oddziaływanie regulatora temperatury na zawór trójdrożny (*3*) umiejscowiony na dolocie skroplin do chłodnicy (*2*). Wówczas, przy stałym masowym natężeniu przepływu wody chłodzącej, zbyt wysoka temperatura skroplin spowoduje zmianę ustawienia grzybka zaworu (*3*). Zwiększone masowe natężenie przepływu skroplin przez chłodnicę spowoduje ich schłodzenie.

Zastosowanie w proponowanym systemie regulatorów cieczowych spowoduje dużą bezwładność systemu regulacji temperatury, jednakże zmiany temperatury wody w zbiorniku (*1*) nie mają charakteru dynamicznego. Proponowany układ jest prosty, koszty jego instalacji są niewielkie. Możliwa jest również modernizacja istniejących układów parowo-wodnych nie posiadających systemów regulacji temperatury wody w zbiornikach wody zasilającej.

3. Wpływ temperatury wody zasilającej na wydajność parową kotłów

Proces wytwarzania pary w kotle produkującym parę nasyconą jest procesem dwuetapowym. W etapie pierwszym dostarczane ciepło jest niezbędne do podgrzania wody od temperatury jaką ma woda zasilająca, do temperatury nasycenia dla danego ciśnienia pary. W drugim etapie dostarczone ciepło jest niezbędne do realizacji izobaryczno-izotermicznego procesu odparowania.

Wzrost temperatury wody zasilającej spowoduje spadek ilości ciepła niezbędnego w procesie podgrzewania wody, dzięki czemu wzrośnie ilość ciepła wykorzystywanego w procesie odparowania. W efekcie wzrośnie wydajność parowa kotła.

Wykorzystując literaturowe zależności opisujące procesy wymiany ciepła w kotłach [8, 11] oraz model matematyczny i program komputerowy opracowany w Instytucie Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie [2], autor prześledził wpływ temperatury wody zasilającej na wydajność parową kotła.

Do analizy wybrano kocioł utylizacyjny o wydajności nominalnej D_n = 2000 kg/h pary przy mocy nominalnej silnika. Ciśnienie robocze pary wynosiło 0,7 MPa. Silnikiem napędu głównego był wolnoobrotowy silnik typu 6 S 70 MC o mocy nominalnej 15 500 kW.

Po wprowadzeniu danych konstrukcyjnych kotła i danych silnika, umożliwiających obliczanie parametrów ilościowych i jakościowych spalin, wykonano obliczenia mające na celu wyznaczenie względnych zmian wydajności parowych kotła w zależności od względnego obciążenia silnika i temperatury wody zasilającej.

Wyniki obliczeń, w formie graficznej w trójwymiarowym układzie współrzędnych, przedstawiono na rysunku 3.

Powierzchnię przedstawioną na rysunku 3 opisuje równanie:

$$D_w = 0{,}798 + 0{,}00195 \cdot t_{wz} + 0{,}3495 \cdot N_w^3 \quad [-] \tag{1}$$

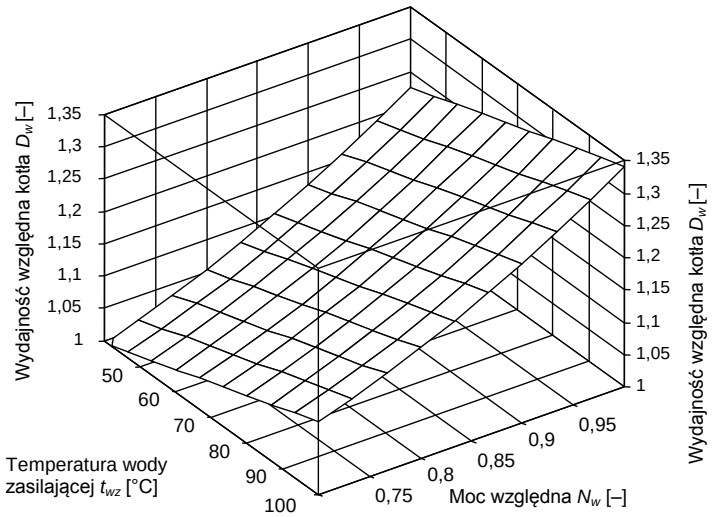
Wzór (1) jest ważny dla:

$$0{,}7\ N_e \le N_w \le 1{,}0\ N_e \qquad 40°\mathrm{C} \le t_{wz} \le 100°\mathrm{C}\ .$$

Kwadrat współczynnika korelacji równania (1) jest równy 0,998.

Jako wielkość bazową do porównań czyli D_w = 1,0 przyjęto wydajność parową kotła przy obciążeniu silnika mocą N_w = 0,7 N_e i temperaturze wody zasilającej t_{wz} = 40°C. Dla tych warunków wydajność parowa kotła wynosi 1540 kg/h. Zakładaną wydajność parową nominalną D_n = 2000 kg/h kocioł uzyskał przy obciążeniu silnika mocą eksploatacyjną N_e i temperaturze wody zasilającej

t_{wz} = 70°C. Wynik ten uzyskano przy wykorzystaniu wzoru (1). Warunki projektowe zakładały temperaturę wody zasilającej t_{wz} = 60°C. Dla tej temperatury t_{wz} obliczona wydajność parowa kotła wynosi 1950 kg/h.



Rys. 3. Wpływ obciążenia silnika i temperatury wody zasilającej na względną wydajność parową kotła

Fig. 3. Influence of engine load and feed water temperature on exhaust gas boiler capacity

Wnioski

1. Zaproponowany system utrzymania stałej, zadanej temperatury wody w zbiorniku wody zasilającej kocioł zapewni zminimalizowanie ilości tlenu wprowadzonego do kotła wraz z wodą zasilającą.
2. Ilość rozpuszczonego w wodzie tlenu, przy jej dopuszczalnej temperaturze zmieniającej się od 85°C do 95°C, będzie zmieniała się w granicach 2,0 – 0,5 g/m^3. Wartość dopuszczalnej, maksymalnej temperatury wody zależy od długości przewodu odpowietrzającego zbiornik.
3. Przy stałej mocy silnika lub stałej ilości paliwa spalanego w kotle opalanym należy spodziewać się wzrostu wydajności parowej kotła o 2% na każde 10 K przyrostu temperatury wody. Tak więc przyrost temperatury od 40°C do 90°C spowoduje wzrost wydajności parowej kotła o 10%.
4. Podgrzanie wody zasilającej spowoduje: zmniejszenie intensywności procesów korozyjnych, zwiększenie wydajności parowej kotłów, zmniejszenie kosztów remontowych, wydłużenie czasu eksploatacji kotłów.

Literatura

1. Behrendt C., *Analiza uszkodzeń okrętowych pomocniczych kotłów opalanych*, Zeszyty Naukowe WSM nr 68, Szczecin 2003, s. 29 – 39.
2. Behrendt C., *Matematiczeskije modieli funkcjonirowanija sudowego energieticzeskowo komplieksa s głubokoj utilizaciej tepłoty*, Rozprawa habilitacyjna, Kaliningrad (Rosja) 2004.
3. *Correct boiler water treatment ensures a long service life for your boiler*, Wydawnictwo firmy Aalborg Industries, Aalborg 2003.
4. *Corrosion and sludge from boiler*, Wydawnictwo firmy Aalborg Industries, Aalborg 2004.
5. *Keep your feedwater steaming hot*, Wydawnictwo firmy Aalborg Industries, Aalborg 2001.
6. Kowal A.L., *Odnowa wody*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
7. Piotrowski W., *Okrętowe kotły parowe*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1985.
8. Rokicki A., *Kotły parowe. Przykłady obliczeniowe*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
9. *Scaling in boiler/feedwater systems*, Wydawnictwo firmy Aalborg Industries, Aalborg 2004.
10. Stańda J., *Woda dla kotłów parowych i obiegów chłodzących siłowni cieplnych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
11. Winkler A., *Design of modern marine boilers*, International Babock Raport 1992.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2005 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Mariusz Chalamoński, prof. ATR
dr hab. inż. Jerzy Listewnik, prof. AM

Adres Autora

dr hab. inż. Cezary Behrendt
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych
ul. Wały Chrobrego 1/2, 70-500 Szczecin
e-mail: cebehr@am.szczecin.pl