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, Anatoly Motorny

Wpływ osadów sadzy na opory przepływu spalin i wydajność parową kotła utylizacyjnego

Słowa kluczowe: kocioł utylizacyjny, wydajność parowa, opory przepływu, badania eksperymentalne, symulacja

Przedstawiono wpływ zanieczyszczenia osadami sadzy powierzchni wymiany ciepła wybranego kotła utylizacyjnego na jego wydajność parową i opory przepływu spalin. Otrzymane wyniki obliczeń symulacyjnych porównano z wynikami badań eksperymentalnych.

Influence of Soot Deposits on Flow Resistance and Steam Capacity of an Exhaust Gas Boiler

Key words: exhaust gas boiler, steam capacity, gas flow resistance, experimental research, simulation.

The paper demonstrates the influence of soot deposits on the heating surfaces of chosen exhaust gas boilers on the exhaust flow resistance and boiler capacity. The results of computer simulation were compared with experimental results.

Wprowadzenie

Rosnące zapotrzebowanie na energię cieplną do celów grzewczych współczesnych statków powoduje wzrost zainteresowania wykorzystaniem do jej uzyskania zasobów ciepła odpadowego silników napędu głównego.

Kocioł utylizacyjny wykorzystujący ciepło odpadowe spalin do produkcji pary grzewczej jest urządzeniem stosowanym na większości statków morskich. Wydajność parowa okrętowych kotłów utylizacyjnych jest zależna od powierzchni wymiany ciepła, temperatury wody zasilającej, ciśnienia pary wytwarzanej w kotle oraz zasobów ciepła odpadowego zawartego w spalinach.

Silnik napędu głównego współpracujący z kotłem utylizacyjnym dysponuje stałymi zasobami ciepła odpadowego zawartego w spalinach, zależnymi od typu silnika, jego obciążenia mocą i warunków otoczenia.

Tak więc wydajność parowa kotła utylizacyjnego będzie zależała głównie od powierzchni wymiany ciepła. Ograniczeniami są opory przepływu spalin przez powierzchnię wymiany ciepła kotła utylizacyjnego oraz temperatura spalin opuszczających kocioł. Temperatura spalin opuszczających kocioł ma wpływ na korozję niskotemperaturową. Punkt korozji niskotemperaturowej, zależny od zawartości siarki w paliwie, dla współcześnie stosowanych w siłowniach okrętowych paliw mieści się w granicach od 170°C do 180°C [5, 6].

Opory przepływu spalin przez powierzchnię wymiany ciepła wodnorurkowego kotła utylizacyjnego nie mogą przekraczać 15 hPa [6], aby nie powodować pogorszenia procesu wymiany ładunku w cylindrze i w efekcie zmniejszenia mocy silnika. W trakcie eksploatacji kotłów utylizacyjnych na ich powierzchniach wymiany ciepła dochodzi do gromadzenia się osadów sadzy, co w efekcie powoduje wzrost oporów przepływu i pogorszenie procesu wymiany ciepła.

Dążenie do stosowania kotłów wytwarzających maksymalną ilość pary powoduje, że kotły te są projektowane jako urządzenia o największej dopuszczalnej, z punktu widzenia oporów przepływu, powierzchni wymiany ciepła. Dopuszczalna wartość oporów przepływu wynosząca 15 hPa jest osiągana przy przepływie ilości spalin wytwarzanych przez silnik obciążony mocą eksploatacyjną.

W artykule przeanalizowano wpływ grubości osadów sadzy na wzrost wartości oporów przepływu spalin przez kocioł utylizacyjny oraz zmniejszenie wydajności parowej kotła utylizacyjnego.

Analizę wykonano z wykorzystaniem wyników obliczeń uzyskanych po realizacji programu komputerowego opracowanego w Instytucie Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie. Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów uzyskanych podczas badań eksperymentalnych.

1. Badania eksperymentalne

Podczas prób morskich nowego statku przeprowadzono badania mające na celu wyznaczenie wydajności parowej kotła utylizacyjnego.

Układ energetyczny silnik główny – kocioł utylizacyjny składał się z następujących elementów:

Silnik główny:	Kocioł utylizacyjny:
Typ – Sulzer 6 RTA 58TB	Typ – LA-718
Moc eksploatacyjna N_e = 10 500 kW	Wydajność parowa D = 1800 kg/h
	Średnica opłomek ϕ = 32 mm

Założenia projektowe dla kotła współpracującego z silnikiem głównym obciążonym mocą eksploatacyjną w warunkach ISO [3] są następujące:

- temperatura spalin — dolot do kotła t_1 = 254°C, wylot z kotła t_2 = 198°C,
- opory przepływu spalin — R = 13,9 hPa,
- wydajność parowa — D = 1800 kg/h.

Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń dla badanych obiektów przedstawiono w tabeli 1. Szczegółowe metodyki badań i obliczeń oraz ich wyniki przedstawiono w [2].

Tabela 1

Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń
Experimental and calculation results

Moc silnika		Wydajność parowa kotła	Opory przepływu spalin	Temperatura spalin	
				przed KU	za KU
N_{SG}		D	Δp	t_1	t_2
kW	$\frac{N_{SG}}{N_e}$	kg/h	hPa	°C	°C
7570	0,721	1440	9,85	259	201
8536	0,813	1535	11,15	252	197
9555	0,910	1650	12,37	258	198
10227	0,974	1765	13,08	266	205

Jak można zauważyć, analizując założenia projektowe i wyniki badań eksperymentalnych, kocioł osiągnął bliską do założonej wydajność parową. Podczas prób morskich nie obciążono silnika mocą eksploatacyjną. Przy osiągniętym obciążeniu silnika N_{SG} = 0,974 N_e wydajność parowa kotła wyniosła D = 1765 kg/h przy oporach przepływu R = 13,48 hPa. Założone i pomierzone

opory przepływu były mniejsze od oporów dopuszczalnych wynoszących 15 hPa. Również założone i pomierzone wartości temperatury spalin opuszczających kocioł nie osiągnęły wartości temperatury punktu rosy. Oznacza to, że na statku można zastosować kocioł o większej powierzchni wymiany ciepła, stawiający większe opory przepływu i o większej wydajności parowej.

W trakcie eksploatacji statku, wskutek gromadzenia się osadów sadzy na powierzchniach wymiany ciepła, wzrastać będą opory przepływu spalin i zmniejszać się będzie wydajność parowa kotła. Procesy te prześledzono na podstawie wyników badań symulacyjnych.

2. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne oparto na wynikach obliczeń uzyskanych w wyniku realizacji programu komputerowego obliczeń kotłów utylizacyjnych opracowanego w Instytucie Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie.

Program opracowano z uwzględnieniem: wzorów opisujących wymianę ciepła w tego rodzaju wymiennikach, wpływu zmian prędkości spalin dla różnego rodzaju ich masowych natężeń przepływu oraz zmian pola powierzchni przepływu spalin w wyniku narastania osadów sadzy. Zmiany prędkości przepływu spalin mają wpływ na wartość współczynnika wnikania ciepła [1, 4, 7, 8].

Jako dane wejściowe do programu należy wprowadzić dane techniczne kotła takie jak: średnica opłomek, ich długość i rozstaw pionowy i poziomy, ilość rur w warstwie oraz ilość warstw rur, temperaturę wody zasilającej kocioł, ciśnienie wytwarzanej pary nasyconej oraz parametry spalin zasilających kocioł.

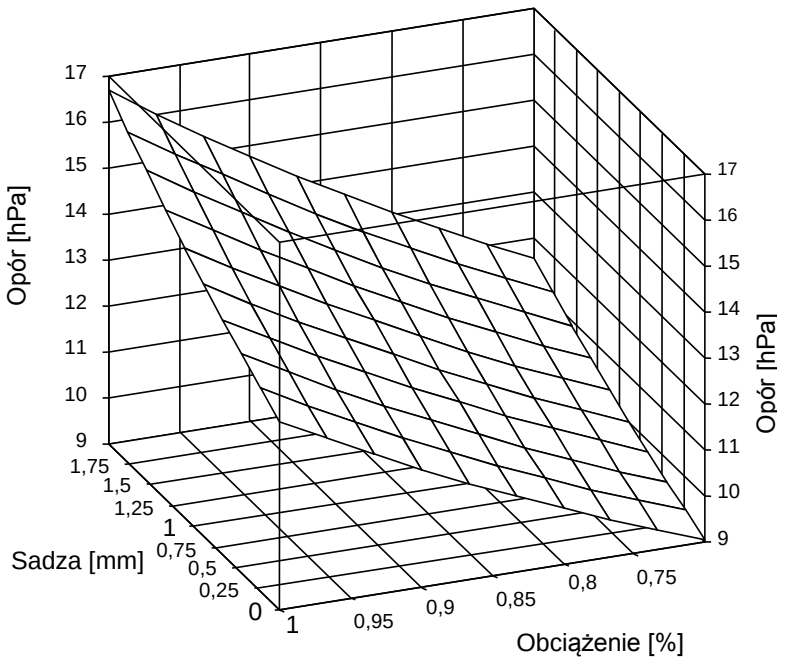
2.1. Zmiany oporu przepływu spalin

Wykorzystując możliwości programu komputerowego obliczeń kotłów utylizacyjnych przeprowadzono symulację zmian oporu przepływu spalin przez badany kocioł utylizacyjny dla zakresu zmian mocy silnika od 0,7 N_e do 1,0 N_e.

Zmiany ilości spalin dla powyższego zakresu zmian mocy silnika wyznaczono z wykorzystaniem opracowanych programów komputerowych obliczeń parametrów spalin [1]. Obliczenia dotyczyły eksploatacji zastosowanego silnika zgodnie z wymogami normy ISO.

Grubość osadów sadzy symulowano przez zwiększenie średnicy opłomek.

Wyniki obliczeń umożliwiły sporządzenie rysunku 1 obrazującego w trójwymiarowym układzie współrzędnych zmiany oporu R przepływu spalin przez kocioł utylizacyjny w zależności od grubości d osadów sadzy i mocy silnika.



Rys. 1. Wpływ grubości osadów i obciążenia silnika na opory przepływu spalin przez kocioł utylizacyjny

Fig. 1. Influence of soot deposits and engine power on exhaust gas flow resistance in an exhaust gas boiler

Powierzchnię przedstawioną na rysunku 1 opisuje wzór:

$$R = \left(-6{,}0 - 9{,}5 \cdot d + 228 \cdot e^{-N_{SG}}\right)^{-1} \cdot 10^3 \quad \text{[hPa]} \tag{1}$$

Wzór (1) obowiązuje dla:

$$0 \text{ mm} \le d \le 2 \text{ mm}$$

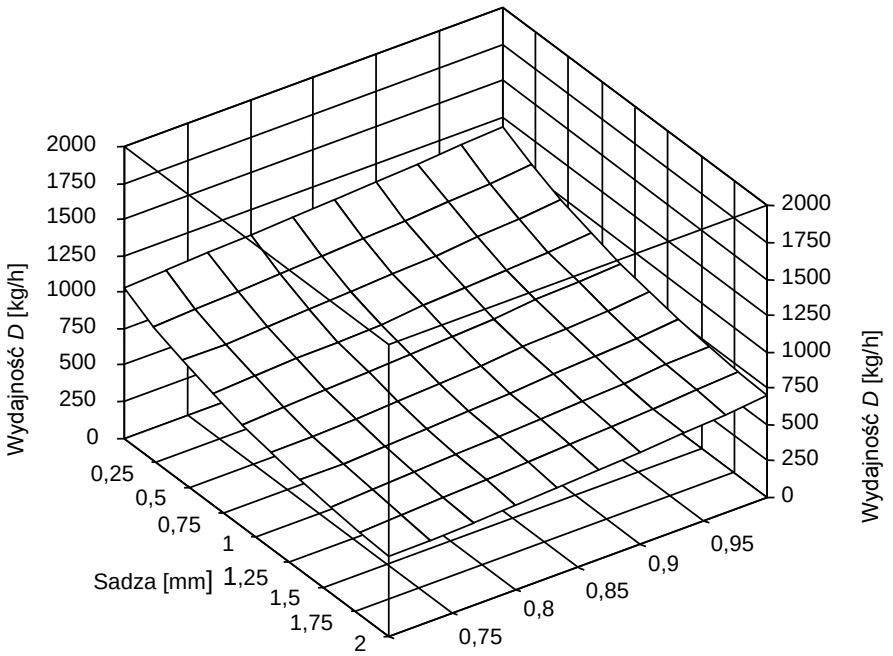
$$0{,}7\, N_e \le N_{SG} \le 1{,}0\, N_e$$

Wykorzystując uzyskaną zależność matematyczną 1 można wykazać, że warstwa sadzy o grubości $d = 2$ mm spowoduje wzrost oporów przepływu spalin o 30% w porównaniu z oporami przepływu przez kocioł bez osadów i silnika obciążonego mocą eksploatacyjną. W danych literaturowych [5, 6] dla takich samych warunków wykazano wzrost oporów przepływu o 34%.

2.2. Zmiany wydajności parowej kotła

W wyniku realizacji obliczeń otrzymano dane dotyczące zmian wydajności parowej D kotła utylizacyjnego w zależności od przyjętego w rozdziale 2.1 zakresu zmian grubości d sadzy i mocy silnika N_{SG}. W równiach opisujących procesy wymiany ciepła przyjęto wartość współczynnika przewodzenia sadzy równą 0,09 W/mK jako średnią z danych podawanych w źródłach literaturowych [6] (λ_S = 0,06 – 0,12 W/mK).

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2 w trójwymiarowym układzie współrzędnych.



Rys. 2. Wpływ grubości osadów sadzy i obciążenia silnika na wydajność parową kotła utylizacyjnego

Fig. 2. Influence of soot deposits and engine power on the exhaust gas boiler steam capacity

Powierzchnię przedstawioną na rysunku 2 opisuje zależność:

$$D = (7{,}88 + 2{,}6 \cdot d - 2{,}45 \cdot N_{SG}^{2,5})^{-1} \cdot 10^4 \quad \text{[kg/h]} \tag{2}$$

Wzór (2) obowiązuje dla zakresu zmian d i N_{SG} jak dla wzoru (1).

Wyniki analizy przeprowadzonej z wykorzystaniem uzyskanej zależności (2) wykazały, że w rozpatrywanym kotle osady sadzy o grubości 2 mm i przy obciążeniu silnika mocą eksploatacyjną, spowodują spadek wydajności parowej kotła o 49%.

Wnioski

1. Analizując wyniki obliczeń uzyskanych z wykorzystaniem wzorów 1 i 2 wykazano, że podczas badań eksperymentalnych grubość osadów sadzy na powierzchni wymiany ciepła wynosił d = 0,06 mm.
2. Dla pomierzonych wartości wydajności parowej kotła D i oporów przepływu R (tab. 1) oraz uzyskanej w wyniku analizy grubości osadów d = 0,06 mm uzyskano najmniejszą różnicę pomiędzy wartościami pomierzonymi i obliczonymi z wykorzystaniem uzyskanych zależności 1 i 2.
3. Maksymalny błąd pomiędzy pomierzoną i obliczoną wartością wydajności parowej kotła wynosił 1,4%, a oporów przepływu 4,3%.
4. Obliczone wartości błędów pomiędzy wartościami pomierzonymi i obliczonymi wykazały wysoką wiarygodność opracowanych modeli matematycznych zastosowanych w programach komputerowych.
5. Uzyskane wzory matematyczne 1 i 2 nie są zależnościami uniwersalnymi. Jako dane wejściowe do programów komputerowych należy wprowadzić dane dotyczące parametrów spalin zależnych od typu silnika oraz dane techniczno-konstrukcyjne kotła utylizacyjnego takie jak średnica opłomek, podziałki ich rozmieszczenia, długość opłomek, ilość opłomek w warstwie i ilość warstw.
6. Uzyskane zależności na określenie wydajności parowej kotła i oporów przepływu spalin będą obowiązywały dla zastosowanego na statku silnika typu 6 RTA 58 TB i kotła utylizacyjnego LA-718.
7. Opracowane i zastosowane w programach komputerowych modele matematyczne umożliwiają uzyskanie zależności $D = f(d, N_{SG})$ i $R = f(d, N_{SG})$ dla dowolnego typu silnika i kotła utylizacyjnego. Mogą znaleźć również zastosowanie w fazie projektowania w celu doboru optymalnego kotła utylizacyjnego.
8. Dla obydwu wzorów uzyskano wysokie wartości kwadratu współczynnika korelacji (wzór 1: r^2 = 0,991, wzór 2: r^2 = 0,905).
9. Wyniki obliczeń uzyskane w wyniku realizacji opracowanych programów komputerowych były weryfikowane przez pracowników KGTU – Kaliningrad.

Literatura

1. Behrendt C., *Matematiczeskije modieli funkcjonirowanija sudowogo energieticzeskowo komplieksa s głubokoj utilizaciej tepłoty*, Rozprawa habilitacyjna, Kaliningrad (Rosja) 2004.
2. Behrendt C., Rybak W., *Testing Exhaust Gas Boiler LA 718 D-162 Fitted on the Vessel B-188/I/1*, Raport z badań, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, 1995.
3. *Dokumentacja techniczna jednostki B-188*, Stocznia Szczecińska S.A., Szczecin 1994.
4. Hobler T., *Ruch ciepła i wymienniki*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
5. Jensen H., *Prevention of soot fires*, Aalborg Solutions, No. 1, Kopenhaga 2001.
6. *Soot deposits and fired in exhaust gas boiler*, Wydawnictwo firmy MAN-B&W, Kopenhaga 2001.
7. Tuński T., *Symulacja pracy kotła utylizacyjnego z wykorzystaniem jego modelu statycznego*, Zeszyty Naukowe nr 73, Akademia Morska w Szczecinie, str. 509 – 516, Szczecin 2004.
8. Wiśniewski S., Wiśniewski T., *Wymiana ciepła*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 200.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2005 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Mariusz Chalamoński, prof. ATR
dr hab. inż. Piotr Bielawski, prof. AM

Adresy Autorów

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

doc. dr inż. Anatoly Motorny
KPI, Instytut Dyscyplin Ogólnotechnicznych
ul. Emelyanowa 203, 236000 Kaliningrad, Rosja