

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Tomasz Tuński

**Symulacja pracy kotła utylizacyjnego
z wykorzystaniem jego statycznego modelu**

Słowa kluczowe: kocioł utylizacyjny, wydajność parowa, symulacja

Przedstawiono wyniki symulacji pracy jednociśnieniowych kotłów utylizacyjnych. W tym celu wykorzystano statyczny model wymiany ciepła w kotle. Otrzymane wyniki zweryfikowano na podstawie pomiarów, przeprowadzonych na statkach podczas prób morskich.

**Simulation of Exhaust Gas Boiler
Using Its Statical Mathematical Model**

Key words: exhaust gas boiler, steam capacity, simulation

The article presents results of one-pressure exhaust gas boilers simulation based on the static mathematical model of heat exchange. The results were verified with parameters registered during ships' sea trials.

Wstęp

Kotły utylizacyjne są urządzeniami przede wszystkim wytwarzającymi parę wodną, wykorzystując energię odpadową zawartą w spalinach wylotowych. W cyklu eksploatacyjnym siłowni okrętowych, kotły te są włączane do pracy po zakończeniu rozpędzania silników do prędkości eksploatacyjnej (*LOAD PROGRAM*). Praktycznie oznacza to, że produkcja pary na poziomie zaspokajającym potrzeby siłowni w tego typu wymiennikach ciepła odbywa się po osiągnięciu przez źródło energii zasilającej stabilności w zakresie ilości oraz temperatury dostarczanych spalin. Z tego względu symulacje zmian podstawowych, a zarazem najistotniejszych parametrów kotła utylizacyjnego autor zdecydował się przeprowadzić na podstawie statycznego modelu wyznaczania wydajności parowej oraz temperatury spalin opuszczających kocioł utylizacyjny.

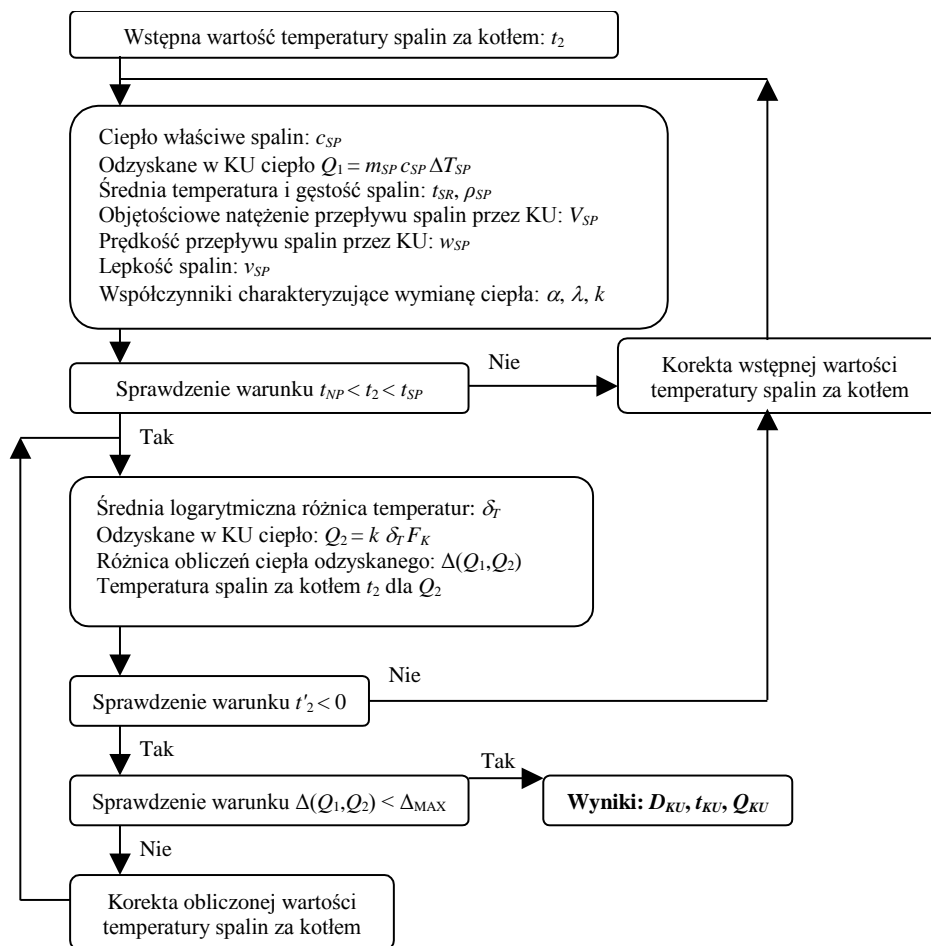
1. Model

Podstawowym warunkiem wymaganym do określenia wydajności parowej kotła utylizacyjnego jest znajomość następujących wielkości:

- ilości spalin zasilających kocioł utylizacyjny;
- temperatury owych spalin przed oraz za kotłem;
- parametrów konstrukcyjnych kotła, które będą zależne od jego typu.

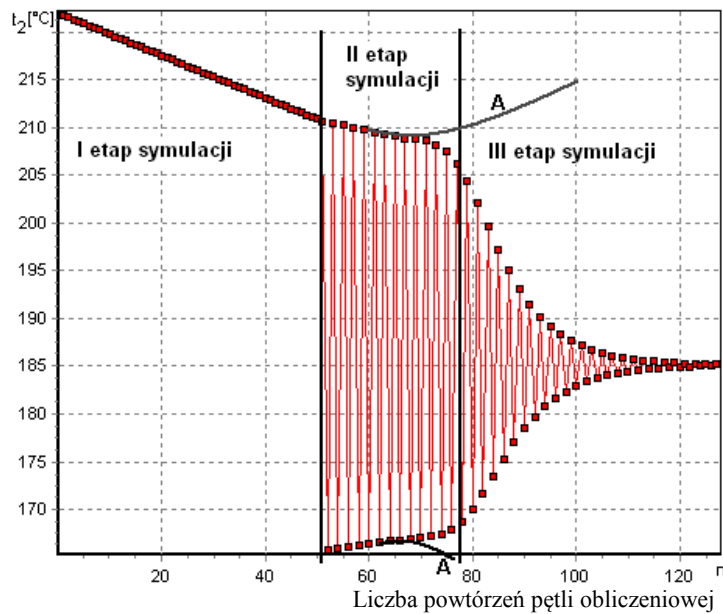
Informacje o wyżej wymienionych parametrach są zawarte w dokumentacji technicznej silników spalinowych oraz kotłów. Wyjątkiem w tej grupie jest temperatura spalin za kotłem, której wartość będzie zależała od wszystkich pozostałych, wyżej wymienionych parametrów. Z tego względu, aby móc wyznaczyć ową temperaturę, co finalnie pozwoli określić ilość ciepła odzyskiwanego ze spalin oraz wydajność parową kotła, autor przyjął model, którego cykl obliczeń opierał się na minimalizacji błędu wyznaczanego na bieżąco dla ilości odzyskiwanego w kotle ciepła. Natomiast w celu wyznaczenia współczynników charakteryzujących proces wymiany ciepła (α , λ , k), wykorzystano zależności publikowane w literaturze [1, 3, 4, 7]. Niestety, tak określony model ma tendencje do powstania nieprzerwanej pętli obliczeń. Sytuacja taka może mieć miejsce podczas symulacji działania kotłów zasilanych spalinami o wysokiej temperaturze (powyżej 300°C). Wprowadzenie do modelu ograniczeń wynikających z zakresu granic określonych temperaturą nasycenia produkowanej pary oraz temperaturą spalin w miejscu dolotu do kotła, doprowadziło do usunięcia powyższej usterki. Jednakże dla kotłów o dużych powierzchniach wymiany ciepła, model mimo wcześniej wprowadzonych poprawek miał tendencje do „rozbiega-

nia się” po osiągnięciu wstępnej stabilizacji. Prowadziło to do otrzymywania nieprawdziwych wartości wydajności parowej symulowanego kotła utylizacyjnego, lub powstawanie nieprzerwanych pętli obliczeń. Wprowadzenie do proponowanego modelu filtra odrzucającego częściowe wyniki, które nie mieszczą się w granicach błędu wyznaczanego na bieżąco, spowodowało powstanie stabilnego modelu (rys. 1), pozwalającego na dokładne określenie temperatury spalin za kotłem utylizacyjnym, ilości odzyskiwanego ze spalin ciepła oraz wydajności parowej kotła utylizacyjnego.



Rys. 1. Stabilny model obliczeń parametrów kotła utylizacyjnego
 Fig. 1. A stable calculation model of exhaust gas boiler parameters

Model ten jest prawdziwy dla kotłów jednociśnieniowych produkujących parę nasyconą suchą. Dla tak sformułowanego modelu obliczeń, symulacja pracy kotła przebiega w trzech etapach. Przykładowy przebieg wyznaczania temperatury spalin za kotłem przedstawia rysunek 2.



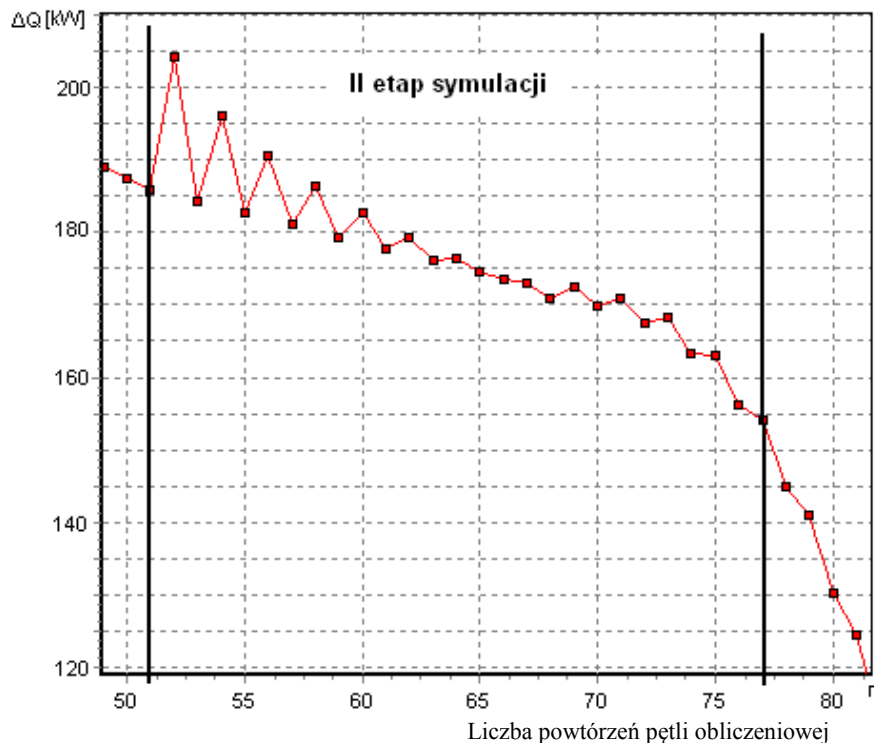
Rys. 2. Etapy wyznaczania temperatury spalin za kotłem utylizacyjnym
 Fig. 2. Stages of boiler exhaust gas temperature calculation

I etap symulacji – zadziałanie ograniczenia wykonywania nieskończonych pętli. Brak tego ograniczenia spowodowałby nieskończone obliczenia przeprowadzane dla temperatur nie mieszczących się w przedziale, określonym temperaturą wody zasilającej kocioł i temperaturą spalin silnika głównego.

II etap symulacji – zadziałanie filtra odrzucającego częściowe wyniki, przy wzrastających błędach obliczeń. Brak tego filtra spowodowałby prowadzenie obliczeń według dolnej oraz górnej linii „A”, z coraz większym błędem.

III etap symulacji – asymptotyczne dochodzenie do szukanej temperatury spalin za kotłem utylizacyjnym.

Dla tej samej symulacji przedstawiono wykres (rys. 3) ukazujący obszar najsilniejszego działania wspomnianego filtra. Na rysunku 3 zauważalny jest nagły wzrost błędu określonej wartości ciepła odzyskiwanego w kotle utylizacyjnym od spalin (początek II etapu symulacji) oraz jego stopniowe stabilizowanie aż do osiągnięcia wyraźnej tendencji spadkowej (koniec II etapu symulacji).



Rys. 3. Obszar najsilniejszego tłumienia
Fig. 3. The area of the strongest smothering

2. Eksperyment numeryczny i weryfikacja

Podczas badań prowadzonych na statkach wybudowanych w stoczni w Szczecinie, skompletowano obszerny zestaw danych parametrów pracy układu silnik główny – kocioł utylizacyjny. Poniżej, autor przedstawił wyniki symulacji pracy kotła utylizacyjnego zasilanego spalinami z silnika głównego. Symulacje owe przeprowadzono przyjmując jako dane wejściowe wymagane przez przedstawiony model, parametry zgodne z parametrami rzeczywistych, wcześniej badanych układów silnik główny – kocioł utylizacyjny. Taki właśnie dobór danych umożliwił weryfikację otrzymanych wyników opartą na zebranych danych pomiarowych. Dodatkowo autor wykorzystał wyniki analizy spalin silnika (zbierane podczas badań) jako wymagane dane w celu wyznaczenia ilości spalin produkowanych przez silnik. Wszystkie obliczenia wykonano wykorzystując oprogramowanie komputerowe, zbudowane za pomocą pakietu DELPHI 6 firmy BORLAND.

Symulacja 1

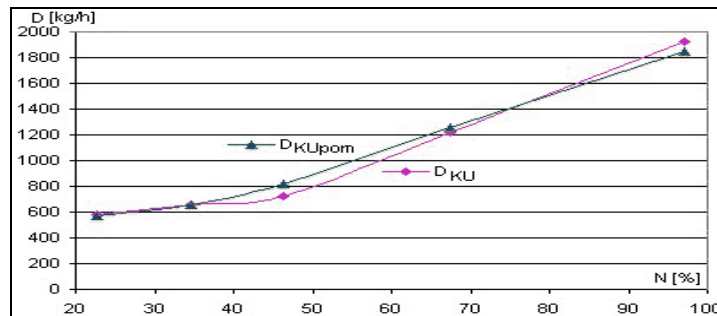
Układ napędowy statku jest oparty na średnioobrotowym silniku MAN-B&W 7L58/64, $N_n = 9730$ kW, $n_n = 428$ [obr/min]. Kocioł utylizacyjny – wodnorurkowy typu LA715D-162 o powierzchni wymiany ciepła $f_K = 100$ m².

Dla tak określonego układu silnik główny – kocioł utylizacyjny otrzymano wyniki symulacji przedstawione w tabeli 1. Jednocześnie w tabeli tej zamieszczono wartości zmierzone podczas eksploatacji rzeczywistego układu silnik główny – kocioł utylizacyjny. Interpretację graficzną otrzymanych wyników zaprezentowano na rysunku 4.

Tabela 1

Obliczone (symulacja 1) i zmierzone wydajności parowe kotła utylizacyjnego
Calculated (Simulation 1) and measured steam capacities of exhaust gas boiler

| | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| N [%] | 22,6 | 34,6 | 46,2 | 67,4 | 97 |
| D_{KU} [kg/h] symulacja | 585 | 653 | 727 | 1221 | 1924 |
| $D_{KU_{pom}}$ [kg/h] pomiar | 569 | 653 | 820 | 1261 | 1843 |



Rys. 4. Obliczone (symulacja 1) i zmierzone wydajności parowe kotła utylizacyjnego
Fig. 4. Calculated (simulation 1) and measured steam capacities of exhaust gas boiler

W celu przeprowadzenia pełniejszej weryfikacji opracowanego modelu, autor wykonał kolejną symulację dla całkowicie odmiennego od wyżej przedstawionego układu silnik – kocioł utylizacyjny. Otrzymane wyniki podano w cyklu Symulacja 2.

Symulacja 2

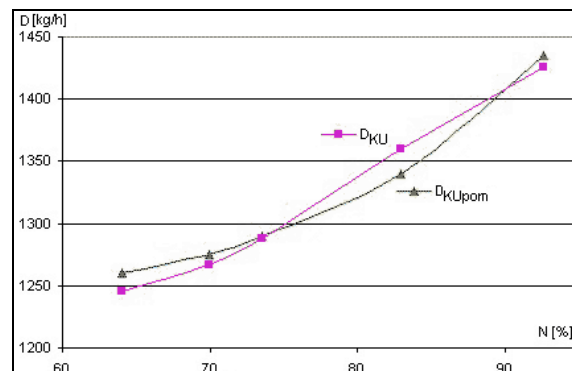
Układ napędowy statku jest oparty na wolnoobrotowym silniku NSD 6RTA62U $N_n = 13320$ kW, $n_n = 113$ [obr/min]. Kocioł utylizacyjny – wodnorurkowy typu AQ7 o powierzchni wymiany ciepła $f_K = 218$ m².

Podczas prób zdawczych statku, na którym prowadzono badania, stwierdzono znaczne niedobory pary podczas załączania do eksploatacji kotła utylizacyjnego. Inspekcja kotła wykazała znaczne jego zanieczyszczenie, którego przyczyną były czynniki nie związane z eksploatacją statku. Po odpowiednim przygotowaniu kotła do pracy, parametry produkowanej pary mieściły się w granicach określonych przez producenta (AALBORG). Jakkolwiek, eksploatacja zanieczyszczonego kotła jest niewskazana a w wielu sytuacjach wręcz niebezpieczna, zebrane dane pomiarowe wykorzystano w celu weryfikacji wpływu zmian współczynnika oporów cieplnych na obliczaną wydajność parową kotła. Dla kotłów, których rury są czyste, przyjmuje się wartość owego współczynnika $R = 0,005 \text{ m}^2\text{K/W}$ [2, 6, 7]. W literaturze dotyczącej obliczeń kotłów parowych [5, 6] publikowano sposoby pozwalające określić przybliżoną wartość. Dla przeprowadzonych obliczeń wielkość współczynnika oporów cieplnych przyjęto na poziomie $R = 0,015 \text{ m}^2\text{K/W}$. Równocześnie ze względu na przybliżone określenie jego wartości, autor przeprowadził zestaw symulacji dla $R = R \pm 0,005$ z krokiem równym 0,001. Zamieszczone poniżej wyniki (tabela 2, rys. 5) uzyskano dla wartości $R = 0,014 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Tabela 2

Obliczone (symulacja 2) i zmierzone wydajności parowe kotła utylizacyjnego
Calculated (simulation 2) and measured steam capacities of exhaust gas boiler

| | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
| N [%] | 64 | 69,9 | 73,5 | 82,9 | 92,6 |
| D_{KU} [kg/h] symulacja | 1246 | 1267 | 1288 | 1360 | 1426 |
| $D_{KU\text{pom}}$ [kg/h] pomiar | 1260 | 1275 | 1290 | 1340 | 1435 |



Rys. 5. Obliczone (symulacja 2) i zmierzone wydajności parowe kotła utylizacyjnego
Fig. 5. Calculated (simulation 2) and measured steam capacities of exhaust gas boiler

Wnioski

Opierając się na porównaniu wyników przeprowadzonych symulacji oraz pomiarów wykonanych na statkach, można stwierdzić ich wysoką zbieżność. Wykorzystanie statycznego modelu wymiany ciepła w kotle utylizacyjnym nie wpłynęło na powstanie znacznych odchyłek otrzymanych wyników. Prostota zastosowanego modelu obliczeniowego, możliwego do wykorzystania na dowolnej platformie programistycznej, umożliwia dalszy rozwój tego rozwiązania.

Jednocześnie należy wskazać na możliwość połączenia dowolnego modelu silnika spalinowego określającego parametry spalin z wyżej przedstawionym modelem kotła utylizacyjnego. Połączenie takie umożliwiłoby przeprowadzenie symulacji pracy układu silnik spalinowy – kocioł utylizacyjny w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

Literatura

1. Duda P., Taler J., *Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
2. Enin B.J., *Sudovye kotlennye ustanovki*, Moskwa 1993.
3. Hobler T., *Ruch ciepła i wymienniki*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
4. Kalinowski E., *Przekazywanie ciepła i wymienniki*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1995.
5. Rokicki H., *Urządzenia kotłowe, przykłady obliczeń*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1996.
6. Tarnowska-Tierling A., *Kotły parowe – przykłady obliczeń*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1987.
7. Wiśniewski S., Wiśniewski T., *Wymiana ciepła*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler
prof. dr hab. inż. Stefan Żmudzki

Adres Autora

mgr inż. Tomasz Tuński, of. mech. okr. II kl.
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych
ul. Wały Chrobrego 1/2, 70-500 Szczecin