## ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Serie: ENERGETYKA z. 94

Nr kol. 880

1986

Jan TALER

Instytut Aparatury Przenysłowej i Energetyki Politechniki Krakowskiej

DYNAMIKA KOTŁA WALCZAKOWEGO PRZY ZMIANACH CIŚNIENIA W PAROWNIKU

Streszczenie. Opracowano nieliniowy model matematyczny z parametrami rozłożonymi walczakowego kotła parowego z obiegiem naturalnym i zastosowano go do symulacji nieustalonej pracy kotła przy zmianach ciśnienia w parowniku. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu obliczeniowego napisanego w języku FORTRAN 77 na komputerze CRAY-1M. Otrzymane wyniki porównano z wynikami badań eksperymentalnych.

## 1. Wstep

Zmiany ciśnienia w parowniku występują w czasie rozruchu i wyłączania z ruchu kotła oraz przy zmianach obciążenia bloku. Wraz ze zmianą ciśnienia zmienia się również temperatura czynnika roboczego, co wywołuje dodatkowe naprężenia cieplne, które w przypadku walczaka lub innych elementów grubościennych mogą być wysokie i ograniczać szybkość zmiany ciśnienia. Zmienia się również masowe natężenie pary wytwarzanej w walczaku a także parametry pary przegrzanej. W celu przebadania zjawisk zachodzących w kotle przy zmianach ciśnienia w paw rowniku i czynników ograniczających szybkość tych zmian a także nowych rozwiązań technicznych dla polepszenia własności dynamicznych kotłów walczakowych zbudowano nieliniowy model matematyczny kotła z parametrami rozłożonymi.

### 2. Charakterystyka badanego kotła

Schemat badanego kotła walczakowego z obiegiem naturalnym o wydajności 17,8 kg/s i ciśnieniu pary świeżej 7,36 MPa przedstawiono na rysunku 1. Temperatura wody zasilającej wynosi 120 °C a temperatura pary przegrzanej 525 °C. Kocioł opalany jest olejem. Kocioł posiada dwie centralne rury opadowe, z których prawa połączona jest z ekranami ściany tylnej i prawej a lewa z ekranami ściany przedniej i lewej.

### 3. Model matematyczny

Punktem wyjściowym przy budowie modelu matematycznego kotła są równania :

- zachowania ilości substancji

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -\frac{\partial (\rho w)}{\partial \tau}$$



Rys. 1. Schemat badanego kotła Fig. 1. Schematic diagram of the investigated boiler unit

340

- bilansu pędu

$$g\left(\frac{\partial w}{\partial t} + w\frac{\partial w}{\partial L}\right) = -pg\sin p - \frac{\partial e}{\partial L} - \left(\frac{\partial e}{\partial L}\right)_{t}$$
 121

- bilansu energii

$$p\left(\frac{\partial h}{\partial T} + w \frac{\partial h}{\partial L}\right) = \frac{q \cdot U}{A} + \frac{\partial p}{\partial t} + w \frac{\partial p}{\partial L} + w \left(\frac{\partial p}{\partial L}\right)_{t}$$

$$(31)$$

- bilansu energii dla ścianki

$$c_{p}\frac{\partial t}{\partial t} = \frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left(\gamma_{x}\frac{\partial t}{\partial x}\right)$$

$$(4)$$

gdzie :  $\int -g$ ęstość,  $\langle I - czas, w - prędkość, l - współrzędna przestrzenna, g - przyspieszenie ziemskie, <math>\beta$  - kąt nachylenia osi kanału do poziomu, p - ciśnienie, $(2\rho/\partial \lambda)$  - straty ciśnienia przy przepływie wskutek tarcia, h - entalpia, d - gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez czynnik liczona w odniesieniu do powierzchni U-1 m, U - obwód, A - pole przekroju poprzecznego kanału, c - ciepło właściwe, t - temperatura, r - promień,  $\lambda$  - przewodność cieplna.

Równania /1-3/ wykorzystywano przy obliczaniu wymiany ciepła przy przepływie czynnika roboczego, zarówno dla przepływu jednofazowego jak i dwufazowego oraz przy przepływie spalin z wyjątkiem komory paleniskowej, gdzie wymianę ciepła przez promieniowanie obliczano metodą strefową. Schemat drogi przepływu spalin oraz przepływu czynnika roboczego przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2 i 3. Równania /1-4/ rozwiązano semianalityczną metodą Doleżala [1]. przy

czym drogę przepływu czynnika roboczego podzielono na 500 a drogę przepływu spalin na 9 elementów.

Wymianę ciepła i poziom wody w walczaku obliczono z uwzględnieniem różnych współczynników przejmowania ciepła w strefie wodnej i parowej. Natężenie przepływu wody cyrkulującej w parowniku M<sub>FA</sub> /rys.4/ obliczono traktując parownik jako złożony kontur cyrkulacyjny składający się z trzech ścian.

Naprężenia w walczaku na brzegu otworów pod rury opadowe i na brzegach otworów w komorach zbiorczych obliczono z uwzględnieniem rzeczywistych czasowych zmian temperatury czynnika roboczego [2] bez stosowania hipotezy o kwazistacjonarnym polu temperatury.

Do opisu dynamiki ścian oddzielających spaliny od czynnika roboczego stosowano model przedstawiony w pracy  $\lceil 3 \rceil$  .



Rys. 2. Schemat drogi przepływu spalin Fig. 2. Flow diagram of the flue gas

342



Rys. 3. Schemat drogi przepływu czynnika roboczego Fig. 3. Schematic diagram of the water/steam circuit Wielkościami brzegowymi przy symulacji kotła, zadanymi w oparciu o wyniki pomiarów eksperymentalnych są temperatura, ciśnienie i natężenie przepływu : wody zasilającej, oleju opałowego, powietrza i wody wtryskowej do regulatorów temperatury pary przegrzanej. W wyniku obliczeń otrzymuje się rozkład ciśnień, temperatur i masowych natężeń przepływu czynnika roboczego i spalin w czasie. Dla parownika wyznaczane są udziały pary i położenie początku wrzenia w pószczególnych ekranach.

Z uwagi na uwzględnienie nieliniowego charakteru równań bilansowych model matematyczny jest odpowiedni do badań kotła nawet przy bardzo dużych zmianach stanu, np. mogą być badane zakłócenia w pracy parownika przy bardzo dużych zmianach ciśnienia w czasie w walczaku kotła.



Rys. 4. Schemat parownika kotła Fig. 4. Schematic diagram of the boiler evaporator

### 4. Porównanie obliczeń z badaniani eksperymentalnymi

Symulację pracy kotła przeprowadzono za pomocą programu DYNAMICS składającego się z ok. 6000 linijek /kart perforowanych/, napisanego w języku FORTRAN 77 na maszynie cyfrowej CRAY-1M. Stosunek czasu obliczeniowego do czasu trwania symulowanego procesu wynosi : 1 : 1,5. Szczególnie dużo czasu pochłania obliczanie poszczególnych ścian parownika, gdyż natężenia przepływu w poszczególnych ekranach wyznaczane są na drodze iteracyjnej.

W charakterze przykładu zastosowania opracowanego modelu matematycznego przedstawiono niektóre wyniki symulacji wzrostu ciśnienia w parowniku kotła i porównano je z danymi eksperymentalnymi. Zaczernione okręgi na rysunkach : 5, 7 i 8 oznaczają wartości uzyskane z pomiarów, przy czym na rysunku 5 jest to ciśnienie w walczaku, na rysunku 7 natężenie pary wytwarzanej w kotle i na rysunku 8 natężenie przepływu na początku rury opadowej M<sub>RA</sub>.

Ciśnienie wody zasilającej na rysunku 5, natężenie przepływu wody zasilającej na rysunku 7 i natężenia przepływu wody wtryskowej do regulatorów temperatury pary przegrzanej, na rysunku 6 przedstawione są za pomocą funkcji otrzymanych poprzez interpolację punktów pomiarowych. Pozostałe krzywe na rysunkach 5-9 stanowią wyniki obliczeń.



Rys. 5. Zmiany ciśnienia w kotle ; 1-ciśnienie wody zasilającej, 2-ciśnienie w walczaku, 3 i 4-odpowiednio ciśnienie na włocie i wyłocie przegrzewacza U3

Fig. 5. Pressure distribution in the boiler ; 1-feed water pressure, 2-drum pressure, 3, 4-respectively inlet and outlet pressure at superheater U3



Rys. 6. Natężenie przepływu wody M<sub>E1</sub> i M<sub>E2</sub> w wtryskowych regulatorach temperatury nej E1 i E2

Fig. 6. Water mass flow rates  $M_{E1}$  and  $M_{E2}$  in attemperators



Rys. 7. Natężenie przepływu wody zasilającej  ${\rm M}_{\rm W}$ i pary świeżej  ${\rm M}_{\rm D}$ 

Fig. 7. Mass flow rate of water  $M_{W}$  and main steam  $M_{D}$ 



Rys. 8. Masowe natężenia przepływu wody w parowniku Fig. 8. Water mass flow rate in the boiler evaporator



- Rys. 9. Naprężenia na wewnętrznej powierzchni komory wlotowej przegrzewacza U3; 5p - naprężenia obwodowe od ciśnienia, 5t - obwodowe naprężenia cięplne, 50 - naprężenia zredukowane na brzegu otworu
- Fig. 9. Stresses on the inner surface of the inlet header of the steam superheater U3;  $G_p$  tangential pressure stress,  $G_4$  tangential thermal stress,  $G_0$  equivalent stress on the hole edge

Z analizy rysunku 9 wynika, że nagłe zadziałanie regulatora wtryskowego 52 /rys. 1 i 6/ wywołuje gwałtowne zmiany naprężeń cieplnych i zredukowanych na brzegach otworów komory wlotowej przegrzewacza pary U3, która jest położona bezpośrednio za regulatorem E2.

### 5. Uwari końcowa

Z przedstawionego porównania wyników obliczeń i badań wynika, że model matematyczny w pełni odzwierciedła procesy zachodzące w kotle. Przeprowadzając symulację pracy kotła przy dużych zmianach stanu można wyznaczyć węzły krytyczne, ograniczające szybkość tych zmian. Przy zastosowaniu szybkich komputerów model może znależć również zastosowanie w układach automatycznej regulacji kotłów z tzw. obserwatorem.

Omówiony w referacie model zastosowano z powodzeniem, po pewnych modyfikacjach, do badania nowych rozwiązań mających na celu polepszenie własności dynamicznych kotłów z obiegiem naturalnym, jak np. do badania regulacji temperatury pary przegrzanej za pomocą wtrysku pary nasyconej.

# 6. LITERATURA

[1] Doležal R. : Iterationsfreies Verfahren für die Simulation grosser Zustandsänderungen bei komplexen nichtlinearen Systemen mit verteilten Parametern, wie mehrstufiger Überhitzer. BWK 1976, Nr 1

Taler J. : Optimierung des Aufheiz - und Abkühlungsvorgangs bei dickwandigen Bauteilen von Dampferzeugern. Wärme 1985, Nr 3



2

Taler J. : Dynamisches Verhalten der dickwandigen Bauteilen von Dampferzeugern. BWK 1986, Nr 1

Uwaga : Praca wykonana została w ramach stypendium im. Aleksandra von Humboldta na Uniwersytecie w Stuttgarcie.

### Dynamika kotła walczakowego ...

ДИНАМИКА БАРАБАННОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ ДАВЛЕНИЯ В ИСПАРИТЕЛЕ

#### Резюме

Разработана математическая нелинейная модель барабанного парогенератора с. естественной циркуляцией. Нелинейные, сопряженные уравнения в частных производных описывающие динамику парогенератора решены распиренным семианалитическим методом. Характерной чертой модели является расчёт естественной циркуляции в испарителе состоящим из нескольких испарительных экранов.

В модели барабана учтено разделение барабана на паровую и водяную части. Особенное внимание уделено также расчёту напряжений в толстостенных элементах парогенератора.

Составлена программа DYNAMICS для скорых ЭЙВМ позволящая производить расчё чёт переходных режимов котлов.

Экспериментальная проверка модели осуществлена на парогенераторе мощностью 50 МВт. Результаты расчётов сравнены с опытными данными полеченными при подъеме давления в испарителе.

Результаты экспериментального исследования хорошо согласуются с расчётными данными, что свидетельствует о правильности модели. Математическое моделирование дает при этом возможность более точно изучить внутренни процессы в парогенераторе.

# TRANSIENT RESPONSE OF THE DRUM-TYPE STEAM GENERATOR DUE TO CHANGE OF EVAPORATOR PRESSURE

#### Summery

A nonlinear mathematical model of the drum-type steam generator with natural circulation has been developed. The nonlinear coupled partial differential equations discribing the transient response of the steam generator have been solved using an extension of the semi-analytic technique.

The essential feature of the model is the accurate calculation of the natural circulation in the multi-tube natural circulation in the multitube evaporator. The steam drum has been repersented by a two-region model with the drum divided into steam and water spaces. Special emphasis has been also placed on accurate modelling of stresses in thick-walled parts of the steam generator. A computer program, DYNAMICS, has been developed for simulation the transist response of the steam generator on a large scale computer (CRAY-1M).

The model has been verified by experiments on 50 MW, oilfired steam generator.

Program predictions has been compared with data recorded during pressure rising in the evaporator.

Simulation results indicated good agreement with data obtained from steem generator measurements taken during a series of experiments and demonstrated the validity of the model.

In addition, new insight into the physical phenomena occuring in the generator has been gained.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Cwynar

Wpłynężo do Redskoji w marcu 1986 r.