ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: ENERGETYKA z. 113 Nr kol. 1101

Zbigniew BILICKI
Dariusz KARDAŚ

Politechnika Gdańska
i Instytut Maszyn Przepływowych
PAN, Gdańsk

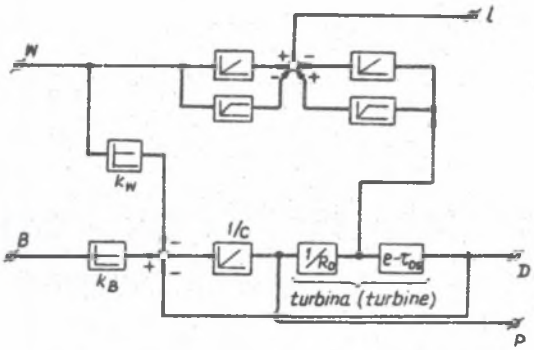
DYNAMICZNE WŁASNOŚCI KOTŁA JAKO OBIEKTU REGULACJI POZIOMU WODY

Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny opisujący dynamiczne własności poziomu wody. Walczak kotła opisano modelem o parametrach skupionych. Rury wznoszące zamodelowano jednowymiarowymi równaniami zachowania masy, pędu i energii, opisującymi przepływ dwufazowy pary i wody. Do rozwiązania zagadnienia zastosowano schemat, częściowo jawny, różnic skończonych.

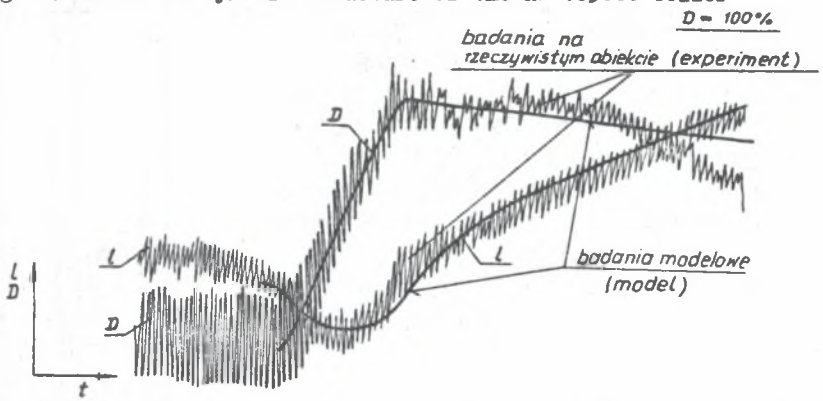
1. WPROWADZENIE

Od kilku lat, co pewien czas, pojawia się praktyczny problem określenia warunków pracy głównych kotłów okrętowych wodnorurkowych, walczakowych typu KW, dostarczających parę do turbopomp ładunkowych, oraz ich systemów regulacji zasilania wodą i opalania. Szczególne trudności regulacyjne ujawniają się przy pracy równoległej dwóch kotłów typu KW, o stosunkowo niedużej pojemności wodnej. Według wymagań kontraktowych kotły te powinny pracować w sposób ciągły nawet w warunkach skokowych zmian poboru pary o około 25%. Najtrudniej w takich przypadkach utrzymać poziom wody w dopuszczalnym stosunkowo niewielkim zakresie zmian. Konieczność dobrania optymalnego systemu regulacji opalania i zasilania oraz określenia dopuszczalnych zmian obciążenia kotła, wynikających z jego własności dynamicznych właściwych dla danej konstrukcji i typu, skłoniła wcześniej jednego z autorów do zbadania zastępczej struktury kotła KW 16 300, traktowanego jako obiekt regulacji ciśnienia i poziomu wody [1]. Wyniki tej analizy w postaci struktury kotła przedstawiono na rys. 1. Na podstawie tamtych badań wykonano model analogowy. Uzyskane z modelu analogowego przebiegi dynamiczne porównano z badaniami eksperymentalnymi. Eksperyment w pierwszym rzędzie posłużył jako źródło potrzebnych wielkości charakterystycznych do modelu teoretycznego [2]. Stopień zgodności modelu z rzeczywistym obiektem zilustrowano dla przykładu na rys. 2. Uznając prace nad modelowaniem strukturalnym za wstępny etap badań, podjęto próbę opracowania modelu matematycznego, w którym najistotniejszą część, obieg cyrkulacyjny, opisano równaniami nieliniowymi o parametrach rozłożonych.

W literaturze przedmiotu spotyka się rozwiązania prezentowanego problemu oparte na modelach o parametrach skupionych [3, 4]. Celem tej pracy jest przedstawienie metody i sposobu rozwiązania zagadnienia prowadzącego do określenia własności dynamicznych kotła jako obiektu regulacji poziomu wody w zakresie zmian, które nie mogą być opisane modelem o parametrach skupionych.



Rys. 1. Schemat strukturalny dynamiki kotła KW 16 300
Fig. 1. Scheme of dynamic structure of the KW 163000 boiler



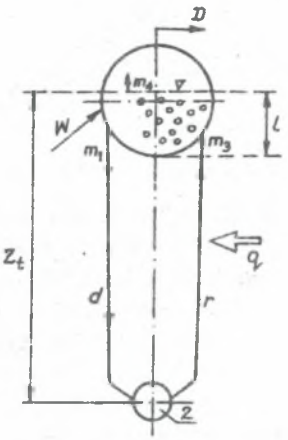
Rys. 2. Przebiegi dynamiczne poziomu wody l, obciążenia kotła D przy skokowych zmianach opalania B ⎍⎍ przy stałym zasilaniu W = const.

Fig. 2. Dynamic responses of water level l, steam output D after step changes of fuel supply B ⎍⎍, with unchanged feed water rate W = const.

2. MODEL MATEMATYCZNY ZMIAN POZIOMU WODY

Do analizy przyjęto uproszczony model konturu cyrkulacyjnego składającego się z górnego i dolnego walczaka połączonych rurami opadowymi

nieogrzewanymi d i rurami ogrzewanymi wznoszącymi r jak na rys. 3. Model matematyczny górnego walczaka składa się z równań bilansu masy i energii. Całkowitą objętość walczaka V_w można podzielić na dwie części: górną o objętości V_p, wypełnioną parą oraz dolną, w której znajduje się woda z pęcherzykami parowymi.



Rys. 3. Kontur cyrkulacji kotła KW z oznaczeniami stosowanymi w modelu

Fig. 3. Contour of circulation of the KW type boiler with notation used in the model

Bilans masy i energii dla górnego walczaka kotła przedstawia się w następujący sposób. Dla części objętości V poniżej poziomu wody bilans masy przyjmuje postać:

$$\frac{d(V\varrho)}{dt} = W + m_3 - m_1 - m_4 , \tag{1}$$

a bilans energii:

$$\frac{d(h\varrho V)}{dt} = Wh_w + m_3 h_3 - m_1 h_1 - m_4 h + V\frac{dP}{dt} . \tag{2}$$

Dla części powyżej lustra wody możemy napisać równanie bilansu masy w postaci:

$$\frac{d[(V_w - V)\varrho_p]}{dt} = m_4 - D , \tag{3}$$

oraz bilans energii

$$\frac{d[n_p \varrho_p (V_w - V)]}{dt} = (m_4 - D)h_p + (V_w - V)\frac{dP}{dt} , \tag{4}$$

gdzie ϱ , ϱ_p są gęstościami odpowiednio mieszaniny dwufazowej i pary, V_w jest objętością walczaka, P – ciśnieniem w całym walczaku, h i m są entalpiami i strumieniami masy z indeksami odpowiadającymi oznaczeniom na rys. 3. Układ równań (1 ÷ 4) uzupełniono równaniami stanu

przy założeniu, że w walczaku zachodzą procesy równowagowe:

$$\rho = \rho(P, h) , \tag{5}$$

$$\rho_p = \rho''(P) , \tag{6}$$

$$h_1 = h'(P) , \tag{7}$$

$$h_p = h''(P) . \tag{8}$$

Przyjmując z kolei, że przy niewielkich zmianach poziomu wody w walczaku można przyjąć $l \sim V_r$, równania (1 ÷ 8) stanowią zaproponowane sformułowanie problemu dynamicznych własności kotła jako obiektu regulacji poziomu wody. Układ (1 ÷ 8) jest układem niezamkniętym. Przy zadanych zakłóceniach W i D wymagane są trzy dodatkowe równania zamknięcia. W ramach tego modelu ograniczono się do analizy wpływu cyrkulacji, m_1 i m_2, na dynamiczne zmiany poziomu wody.

Rury opadowe, do których wpływa strumień cieczy nieściśliwej m_1, są opisane równaniem bilansu pędu i zachowania masy, które w sumie dają rozwiązanie dla dolnego walczaka:

$$P_2 = P_1 + \rho g z_t - \frac{\tau C z_t}{A} , \tag{9}$$

gdzie $P_1 = P$ odpowiada jednorodnemu ciśnieniu w walczaku, $\rho = \rho'(P)$, naprężenia na ściance kanału wynoszą:

$$\tau = \frac{f}{2} \frac{m_1^2}{\rho A^2} , \tag{10}$$

gdzie f jest współczynnikiem tarcia (przyjęto $f = 0.008$), A-polem przekroju wewnętrznego poprzecznego rur, C obwodem, Z_t wysokością rur. Po rozpatrzeniu rur opadowych możemy przejść do rur wznoszących. Przepływ w rurach wznoszących jest przepływem dwufazowym, który niesie szereg problemów właściwych tej dziedzinie.

3. PRZEPŁYW DWUFAZOWY W RURACH WZNOSZĄCYCH

Przepływ dwufazowy w rurach wznoszących opisano modelem jednowymiarowym, jednorodnym przy zastosowaniu

równania zachowania masy,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (A \rho w) = 0 , \tag{11}$$

równania bilansu pędu,

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{2}\rho \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} = -\tau - \rho g \,, \tag{12}$$

równania bilansu energii wewnętrznej $u = h + P/\rho$,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{1}{A}\frac{\partial(A\rho w u)}{\partial z} = -\frac{P}{A}\frac{\partial(wA)}{\partial z} + w\tau + Q \,, \tag{13}$$

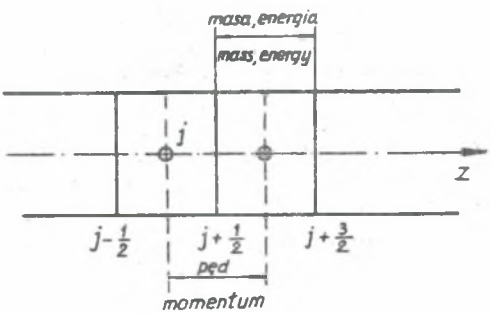
gdzie Q jest strumieniem ciepła dostarczanego do kotła i $\tau = \varepsilon \frac{C}{A}$.

Przyjęto założenie, że układ znajduje się w równowadze termodynamicznej, co wyraża równanie stanu

$$\rho = \rho(P, u) \,. \tag{14}$$

3.1. Rozwiązanie numeryczne

Przy wyborze metody rozwiązania układu (11 - 14) kierowano się zachowaniem stabilności i prostotą rozwiązania. Zastosowano metodę różnic skończonych, powszechnie używaną w przepływach dwufazowych [5], opartą na schemacie o "przesuwnych" węzłach siatki, (rys. 4). Uzyskanie stabilnego rozwiązania jest niemożliwe przy zastosowaniu jawnego schematu numerycznego. Całkowicie niejawny schemat numeryczny jest oczywiście stabilny, ale wymaga rozwiązania nieliniowego układu równań różnicowych. Z tych powodów zastosowano schemat częściowo jawny i liniowy względem chwili $n+1$. Taka metoda ma tę zaletę, że pozwala zredukować układ równań różniczkowych cząstkowych (11 ÷ 13) po odpowiednich przekształceniach do jednego równania algebraicznego.



Rys. 4. Schemat przestrzennej siatki równania różnicowego
Fig. 4. Difference equation nodalization schematic

Wielkości skalarne, czyli ρ, P, u oblicza się w środku komórki, do nich odnosi się całkowity indeks j. Wektor prędkości w obliczany jest na brzegach komórki i odpowiada mu indeks będący nieparzystą wielokrotnością 1/2, czyli np. $j - {}^1/_2$, $j + \frac{1}{2}$, $j + {}^3/_2$. Równanie różnicowe będące odpowiednikiem równania (11) ma następującą postać:

$$\frac{\rho_j^{n+1} - \rho_j^n}{\Delta t} + \frac{1}{A_j} \frac{A_{j+\frac{1}{2}} \dot{\rho}^n_{j+\frac{1}{2}} w^{n+1}_{j+\frac{1}{2}} - A_{j+\frac{1}{2}} \dot{\rho}^n_{j+\frac{1}{2}} w^{n+1}_{j-\frac{1}{2}}}{\Delta z} = 0. \tag{15}$$

Powstało ono przez scałkowanie równania (11) w obszarze między $j + {}^1/_2$ i $j - \frac{1}{2}$. Występujące tu wielkości $\dot{\rho}_{j-\frac{1}{2}}$, $\dot{\rho}_{j+\frac{1}{2}}$ są definiowane jako:

$$\dot{\rho}_{j-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(\rho_{j-1} + \rho_j) + \frac{1}{2} \frac{|w_{j-\frac{1}{2}}|}{w_{j-\frac{1}{2}}} (\rho_{j-1} - \rho_j), \tag{16}$$

$$\dot{\rho}_{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(\rho_j + \rho_{j+1}) + \frac{1}{2} \frac{|w_{j+\frac{1}{2}}|}{w_{j+\frac{1}{2}}} (\rho_j - \rho_{j+1}). \tag{17}$$

Równanie bilansu energii, tak jak bilansu masy, całkuje się w obszarze $j + \frac{1}{2}$, $j - \frac{1}{2}$, i otrzymuje się:

$$\frac{(\rho u)_j^{n+1} - (\rho u)_j^n}{\Delta t} + \frac{1}{A_j} \frac{A_{j+\frac{1}{2}} \dot{\rho}^n_{j+\frac{1}{2}} \dot{u}^n_{j+\frac{1}{2}} w^{n+1}_{j+\frac{1}{2}} - A_{j-\frac{1}{2}} \dot{\rho}^n_{j-\frac{1}{2}} \dot{u}^n_{j-\frac{1}{2}} w^{n+1}_{j-\frac{1}{2}}}{\Delta z} =$$
$$- \frac{P_j^n}{A_j} \cdot \frac{A_{j+\frac{1}{2}} w^n_{j+\frac{1}{2}} - A_{j-\frac{1}{2}} w^n_{j-\frac{1}{2}}}{\Delta z} + Q_j^n + \varepsilon_j^n w_j^n, \tag{18}$$

gdzie $\dot{u}_{j-\frac{1}{2}}$ i $\dot{u}_{j+\frac{1}{2}}$ mają podobną postać do (16) i (17)

$$\dot{u}_{j-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(u_{j-1} + u_j) + \frac{1}{2} \frac{|w_{j-\frac{1}{2}}|}{w_{j-\frac{1}{2}}} (u_{j-1} - u_j), \tag{19}$$

$$\dot{u}_{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(u_j + u_{j+1}) + \frac{1}{2} \frac{|w_{j+\frac{1}{2}}|}{w_{j+\frac{1}{2}}} (u_j - u_{j+1}). \tag{20}$$

W przypadku równania bilansu pędu obszar całkowania przesunięty jest o ${}^1/_2$, jego granice stanowią j+1, j, co prowadzi do równania różnicowego

$$\frac{w^{n+1}_{j+\frac{1}{2}} - w^n_{j+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{1}{2} \frac{(w^n_{j+1})^2 - (w^n_j)^2}{\Delta z} + \frac{1}{\rho^n_{j+\frac{1}{2}}} \frac{P^{n+1}_{j+1} - P^{n+1}_j}{\Delta z} = - \frac{T^n_{j+\frac{1}{2}} w^{n+1}_{j+\frac{1}{2}}}{\rho^n_{j+\frac{1}{2}}} - g_{j+\frac{1}{2}}, \tag{21}$$

gdzie

$$T^n_{j+\frac{1}{2}} = \frac{C_{j+\frac{1}{2}} |w^n_{j+\frac{1}{2}}|}{2 D_H}, \tag{22}$$

gdzie $C_{j+\frac{1}{2}}$ jest współczynnikiem tarcia, a D_H średnicą hydrauliczną.

Tak dobrane schematy różnicowe pozwalają na przekształcenie równań (15), (18), (21) w jedno równanie:

$$a^n P^{n+1}_{j-1} + b^n P^{n+1}_j + c^n P^{n+1}_{j+1} = d^n, \tag{23}$$

gdzie a^n, b^n, c^n, d^n są funkcjami wektora stanu w chwili czasowej "n", na odpowiednich węzłach siatki.
Równanie (23) napisane dla wszystkich węzłów daje liniowy trójprzekątniowy układ równań. Rozwiązaniem takiego układu są wartości p^{n+1} we wszystkich $< 0, Max >$ węzłach siatki, co z kolei umożliwia obliczenie ρ^{n+1} u^{n+1}, w^{n+1}.

4. ZAKOŃCZENIE

Zaproponowany sposób rozwiązania problemu dynamicznych własności kotła, pomimo zastosowania najprostszego modelu o parametrach rozłożonych, jest stosunkowo trudny do wykonania. Dalsze jego rozwijanie będzie polegało na wprowadzeniu stanów nierównowagi termodynamicznej w przepływach dwufazowych występujących w rurach wznoszących.

LITERATURA

[1] Z. Bilicki i N. Bieniek: Opracowanie i analiza struktury kotłów typu KW - Przygotowanie teoretyczne badań kotłów typu KW, Opracowanie wewn. Centrum Techniki Okrętowej RW-76/R-054, Gdańsk 1976.

[2] Z. Bilicki i N. Bieniek: Sprawozdanie z badań dynamicznych kotła KW 16300 na statku B 525/1, Opracowanie wewn. Centrum Techniki Okrętowej RW-76/T-055, Gdańsk 1976.

[3] R. Daležal i L. Varcop:Process Dynamics,Automatic Control of Steam Generation Plant, Elsevier Publishing Company, Amsterdam 1970.

[4] J. Taler: Symulacja dynamiki kotłów z obiegiem naturalnym uwzględniająca naprężenia termiczne, Zeszyt Naukowy Politechniki Krakowskiej Nr 1, 1987.

[5] V.H. Ranson, R.I Wagner, and I.A Trapp: The RELAP 5 two-phase fluid model and numerical scheme for economic LWR system simulation, Transient Two-Phase Flow,eds. M.S. Plesset et al. Hemisphere Publishing, Washington 1983.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОТЛА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ

Р е з ю м е

В работе представлена математическая модель динамики уровня воды в верхним барабане водотрубчатого котла отопляемого маслом. Барабан описан моделью со совокупленными параметрами. Принято, что опускные трубы заполнены несжимаемой жидкостью, а восходные трубы заполнены двухфазной смесью. Двухфазный поток замоделирован системой одномерных, нестационарных, однородных уравнений для условий термодинамического равновесия. Для системы трёх уравнений сохранения массы, импульса и энергии использован нумерический метод конечных разностей, который опирается на частично явной схеме линейного шага момента времени n + 1. Нумерический метод обладает том преимуществом, что позволяет сократить систему трёх дифференциальных уравнений в одно алгебраическое уравнение.

DYNAMIC BEHAVIOUR OF THE WATER-LEVEL IN A FIRE TUBE BOILER

S u m m a r y

Paper presents mathematical model describing dynamic response of water level in the higher drum of the watertube boiler equipped with oil burner. Boiler drum is modelled as a system of lumped parameters. It is assumed that adiabatic downcomer tubes are filled with the incompressible water on the contrary the riser tubes with two-phase steam-water mixture. Two-phase flow is described by one-dimensional non-stationary system of homogeneous equations in thermodynamic equilibrium. The numerical method of finite differences based on scheme using a fixed, but staggered special noding is applied to solve the system of equations consisting of balances of mass, momentum and energy. Semi-explicit method used here leads to linear equation with respect to time n + 1. The advantage of this method is that the system of three conservation differential equations can be reduced to one algebraic equation.