ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI SLASKIEJ

Seria: ENERGETYKA z. 94

Nr kol. 880

Zbigniew BILICKI i Jarosław MIKIELEWICZ Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk, Gdańsk

MODEL JEDNORODNY I POSLIZGOWY MIESZANINY PAROWO-WODNEJ W ZASTOSOWANIU DO OBLICZEN OBIEGU NATURALNEGO KOTŁA WODNO-RURKOWEGO

Streszczenie. Porównano dwie metody obliczania cyrkulacji w kotle wodnorurkowym. Pierwsza metoda wykorzystuje model jednorodny a druga poślizgowy dla przepływu dwufazowego. Model poślizgowy uwzględnia zmianę poslizgu przy różnych strukturach przepływu. Obie metody zastosowano do obliczenia cyrkulacji w pomocniczym kotle okrętowym.

#### 1. Wstep

Ważnym wskaźnikiem poprawności projektu kotła o obiegu naturalnym są: odpowiednia wielokrotność cyrkulacji i związane z tym odpowiednie prędkości w rurach opadowych i wznoszących. Obliczenia tych wskaźników prowadzi się w oparciu o modele przepływu dwufazowego mieszaniny pary i wody, które stanowią podstawę wyznaczenia charakterystyk hydraulicznych. W pracy porównano obliczenia wykonane «g dwóch różnych modeli jednorodnego i poślizgowego.

### 2. Model jednorodny

Jednorodny model stacjonarnego przepływu dwufazowego zastosowany do ogrzewanych rur wznoszących lub opadowych jest opisany układem równań zachowania 1 dm

mass

$$\frac{dz}{dz} = 0, \qquad (1/2)$$

$$\frac{m^{2}}{A^{2} \rho^{3}} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{h} \frac{dP}{dz} + \left[ 1 - \frac{m^{2}}{A^{2} \rho^{3}} \left( \frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_{p} \right] \frac{dh}{dz} = q - \varepsilon g \quad (3)$$

Edzie kierunek osi Z jest zgodny z kierunkiem przepływu a f przyjmuje wartości 2 = 7, Edy przepływ odbywa się ku górze i 2 =-7 gdy do dołu. Układ równań /1 + 3/ uzupełniony jest równaniem stanu

$$\varphi = \varphi(h, P) , \qquad /4/$$

w postaci

$$\frac{1}{9} = v'(P) - \frac{h - h'(P)}{h''(P)} v''(P) , \qquad 151$$

Ostatnim równaniem zamykającym układ dla modelu jednorodnego jest równanie konstytutywne

161

171

/8/

$$\tau = \frac{2f}{D} \quad \frac{\dot{m}^2}{\rho A^2} \quad \frac{1-x}{1-\rho^2 x} \quad \cdot$$

Charakterystyki hydrauliczne wykonujemy przy kolejno zmiennych wartościach m stąd układ /1 - 3/ redukuje się do dwóch równań /2 i 3/, które można zapisać w zwartej formie macierzowej

 $\mathbb{A} \quad \frac{dX}{dz} = B$ 

gdzie

$$a_{11} = \left[ 1 - \frac{\dot{m}^2}{A^2 \rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_h \right] \qquad a_{21} = -\frac{\dot{m}^2}{A^2 \rho^3} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_h$$

$$a_{12} = \left[ -\frac{\dot{m}^2}{A^2 \rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_p \right] \qquad a_{22} = 1 - \frac{\dot{m}^2}{A^2 \rho^3} \left( \frac{\upsilon \rho}{\upsilon h} \right)_p ,$$

$$b_1 = -\tau - \varepsilon \rho g$$
,  $b_2 = q - \varepsilon g$ ,  $x_1 = P$ ,  $x_2 = h$ .

Podstawowe twierdzenia z algebry liniowej pozwalają /7/ przedstawić w postaci

$$\frac{1}{z} = A^{-1}B \qquad det \ A \neq 0$$

gdzie /A jest macierzą odwrotną.

Równanie /8/ jest w ogólnym przypadku nieliniowym równaniem zwyczajnym, którego rozwiązania nie można podać w postaci analitycznej. Możemy natemiast wykorzystać dowelną metodę numeryczną, np.Ruge'go Kutty i dla kolejno przyjmowanych m wyznaczyć  $\Delta p = f(m)$  dla każdej rury traktując ją raz jako wznoszącą i drugi raz jako opadową.

#### 3. Model poślizgowy

w propencwanym modelu poślizgowym przyjęte, że faza gazewa i faza ciekła peruszają się z różnymi prędkościami W" i W' . Fakt ten mie przeszkadza jednak rozważać przepływu dwufazewego jako płymu poruszającego się z prędkością barycentryczną

$$W = \frac{1}{9} \left[ W' p' (1 - \phi) + W'' p'' \phi \right] , \qquad 191$$

gdzie średnia gęstość mieszaniny dwufazowej

$$g = g'(1-\phi) + g''\phi$$
, /10/

W' i W" są prędkościami odpowiednio fazy ciekłej i parowej  $\phi$  jest stopniem zapełnienia  $\rho'$  i  $\rho''$  są gęstościami odpowiednio cieczy i pary. Model poślizgowy stacjonarny opisują równanie zachowanie

masy 
$$\frac{d\dot{m}}{dz} = 0$$
 (11)

pędu

$$\frac{d}{dz} \left\{ \frac{\dot{m}^2}{A \rho'} \left[ \frac{(1-y)^2}{1-\phi} + \frac{y^2}{\phi} \frac{\rho'}{\rho''} \right] \right\} + A \frac{dP}{dz} = -A\mathcal{T} - g\rho A \qquad (12)$$

Model jednorodny i poślizgowy ....

energii

$$\frac{d}{dz} \left\{ m \left[ h'(1-y) + h'y \right] + \frac{m^3}{2A^2 \rho'^2} \left[ \frac{(1-y)^3}{(1-\phi)^2} + \frac{y^3}{\phi^2} \left( \frac{\rho'}{\rho''} \right)^2 \right] \right\} = -mg + q ,$$

$$y = \frac{m^3}{m} .$$
(15)

Układ równań dla modelu poślizgowego jest uzupełniony równaniem stanu /4/ i /5/ oraz równaniem na obliczanie naprężeń stycznych na ściance kanału wg propozycji Patricka [2]

$$T = \frac{2f}{D} \frac{m^2}{A^2 \rho'} \left(\frac{1-\gamma}{1-\rho}\right)^2.$$
 (14)

Stosowanie zależności /14/ wiąże się z koniecznością wyznaczenia związku między y i  $\phi$  . W tym celu wykorzystano metodę określenia tego związku w zależności od różnych struktur przepływu dwufazowego. Korzystając z pojęcia prędkości poślizgu

$$W_{e} = W'' - W'$$
 /15/

dostajemy związek pomiędzy  $\phi$  i y poprzez  $W_5$ 

$$V_{\rm g} = \frac{\dot{m}}{A} \left[ \frac{y}{\varphi'' \phi} - \frac{1 - y}{\varphi'(1 - \phi)} \right] \,. \tag{16}$$

Z kolei prędkość poślizgu  $W_S$  może być określona w różny sposób w zależności od rodzaju struktury przepływu dwufazowego [3]. Dla przepływu pęcherzykowego  $W_S$  wyznaczono w oparciu o równanie bilansu pędu odpowiadające modelowi poślizbowemu [3 str 120] i wynosi ona

$$W_{\rm s}^{2} = \frac{4}{3} \frac{d_{\rm s}}{\rho' C_{\rm p}} \left[ \sin \Theta g (1 - \phi) (\rho' - \rho'') + (1 + \phi) \tau_{\rm c}'' \right], \qquad /17/$$

gdzie:  $d_s$  jest średnicą pęcherzyków parowych, g przyspieszeniem ziemskim,  $C_D$  współczynnikiem oporu pojedynczego pęcherzyka,  $\Theta$  kątem między poziomem i kierunkiem przepływu. wielkość  $\tau_c'$  jest średnim naprężeniem cieczy na ściankach rury /14/. Liczba oporu f występująca w /14/ dla płaskich rur wg Blasiusa wynosi

gazie

$$Re = \frac{Dm(1-\gamma)}{\gamma'(1-\phi)\rho'A} \cdot (19/1)$$

współczynnik oporu pojedynczego pęcherzyka  $C_D$  można przyjąć za Ishii i Zuberem [4] dla obszaru opływu lepkiego, w którym

$$C_{D} = \frac{24}{Re_{m}} \left( 1 + 0.1 \ Re_{m}^{0.75} \right) , \qquad (20)$$

6dzie

$$Re_{m} = \frac{d_{s} q' W_{s}}{\mu_{m}}$$
 /21/

natomiast lepkość µ dana jest zależnością

Edzie  $\mu'$  i  $\mu''$  jest lepkością odpowiednio cieczy i pary,  $\phi_{max} = 0,785$  i odpowieda maksymalnemu teoretycznemu stopniowi zapełnienia. W oparciu o

251

poprzednią pracę [3] przyjęto, że przepływ o strukturze pęcherzykowej będzie miał miejsce w zakresie  $\phi = 0 \div 0.5$ . Dla  $\phi = 0.5 \div 0.6$  przepływ dwufazowy przybiere formę struktury korkowej, dla której [3 str 136]

$$W'' = \frac{12}{W_0' + W_0''} + C_1 \sqrt{gD\left(-\frac{\rho' - \rho''}{\rho'}\right)}.$$
<sup>(23)</sup>

Po przekształceniu /23/ i uwzględnieniu, że  $w'_{o} = \frac{m}{A\rho'}$  i  $w'_{o} = \frac{m}{A\rho'}$  otrzymano

$$y = \frac{1.2 \, \varrho'' \, \phi}{\varrho'(1-\phi) + \varrho'' \phi} + \frac{C_* A \, \varrho'' \, \phi}{ni} \sqrt{g \, D \, \frac{\varrho' - \varrho''}{\varrho'}} , \quad /24/$$

gdzie  $C_{4} = 0,35$ .

Dla stopnia zapeżnienia  $\phi > 0,6$  przyjęto w obliczeniach, że  $W_5=0$  co odpowiada jednorodnemu modelowi przepływu dwufazowego.

Stopień zapełnienia  $\phi$  w odległości Z od przekroju, w którym nastąpiło wrzenie wyraża się poprzez zależność [3]

$$\phi = \frac{\rho' q C z}{\Delta \rho q C z + h_{q} m \rho''}, \qquad (25)$$

gdzie q stała gęstość strumienia ciepła, C obwód rury.

# 4. Obliczenia porównawcze

Opisane wyżej metody zastosowano do obliczenia wielokrotności cyrkulacji i prędkości w rurach opadowych i wznoszących. Przykładem obliczeniowym był okrętowy wodnorurkowy dwuwalczakowy bocznociągowy kocioł typu D z przegrzewem konwekcyjnym o wydajności 37000 kg/h i cisnieniu pary przegrzanej 1,8 MPa. Obliczenia cyrkulacji wykonano wg załączonego poniżej schematu działań.

## Objaśnienia do sieci działań

- 1. Utworzenie zbioru rur i grup rur.
- Zbiór rur i grup rur porządkujemy wg wzrastającego strumienia ciepła jaki wnika do nich od strony spalin. Pierwszym elementem α, uporządkowanego zbioru A jest grupa rur opadowych zewnętrznych dla których q = 0.
- ). Każdej rurze lub grupie rur, o tych samych wartościach q i tej samej średnicy wewnętrznej, przypisujemy dwie charakterystyki opadową  $\Delta P_o$  i wznoszącą  $\Delta P_w$ .
- 4. Tworzymy zbiór B, którego każdy wyraz składa się z trzech elementów  $a_i(q), \Delta P_o \ i \ \Delta P_w$ .
- 5. Zbiór B dzielimy ne dwa podzbiory: O, do którego będą zaliczane wszystkie rury lub grupy rur, które mogą być w czasie pracy kotła opadowymi i W, do którego zaliczamy rury wznoszące.
- 6. Dla wyznaczenia pierwszego wstępnego punktu pracy rury nieogrzewane zaliczamy do opadowych a pozostałe do wznoszących.



# Siec działań do obliczeń cyrkulacji kołła

- 7. Punkt przecięcia się charakterystyk  $\sum (\Delta P_0) = f_1(m)$ i  $\sum (\Delta P_w) = f_2(m)$  wyznacza wartość  $\Delta P|_{SK}$  odpowiadającą różnicy ciśnień między dolnym i górnym walczakiem.
- 3. Sprawdzamy, kolejno rurę lub grupę rur o najniższej wartości q spośród rur wznoszących czy maksymalna wartość jej charakterystyki opadowej jest większa od <u>AP</u><sub>SK</sub>. Jeżeli tak, to rura ta będzie rurą opacowa.
- 9. Thorzymy nowe zbiory rur opadowych i wznoszących. Do rur opadowych zaliczamy testowaną poprzednio rurę wznoszącą. Następnie szukamy w pętli kolejnego punktu  $S_{\rm K}$  tak długo aż warunek 8 nie będzie spełniony.
- 10. Drukujemy wyniki obliczeń.

Szczegółowe obliczenia pozwoliły wyznaczyć wielokrotność cyrkulacji wg dwóch różnych modeli dla tego samego kotła. Cyrkulacja obliczona wg modelu jednorodnego wynosi C ≅ 110, a wg modelu poślizgowego wynosiC ≅ 92.

#### 5. Wnioski

Różnica w obliczeniu globalnego wskaźnika cyrkulacji jakim jest wielokrotność cyrkulacji wg dwóch różnych metod kształtuje się ne poziomie ok. 15 %. Niemniej jednak rozkłady prędkości w rurach i strefa między rurami opadowymi i wznoszącymi znacznie się różnią przy liczeniu różnymi modelami. Wydaje się, że model poślizgowy powinien być bliższy rzeczywistości, co potwierdzają badanie eksperymentalne wykonywane dla pojedynczych grzanych rur.

Spis ważniejszych oznaczeń i symboli

Α	-	przekrój rury	$\phi$ - stopień zapełnienia
С		obwód rury	$\mu$ - lepsość dynamiczna
D	-	średnica rury	9 - gęstość strumienia ciepła
d,	_	średnica pęcherzy	ρ - gęstość
f	-	liczba oporu	T - naprężenie
g	-	grawitacja	v - objętość właściwa
h	-	entalpia	Re - liczba Reynoldsa
m	-	strumień masy	indeksy górne dotyczą:
Ρ	-	ciśnienie	prim - cieczy
W	-	prędkość	biss - pary
Y	-	dynamiczny stopień suchości	

Z - długość kanału

LITERATURA

 Bilicki Z.: 1983, Analiza Uproszczeń w Równaniach Jednowymiarowych dla Przepływów Dwufazowych w Kanałach, Zeszyty Naukowe IMP PAN, 168/1067/83

#### Model jednorodny i poślizgowy ....

- [2] Petrick M.: 1958, Argonne National Laboratory Rep. 5787
- Bilicki Z.: 1985, Granice Struktur przepływu dwufazowego, Zeszyty Naukowe IMP PAN /praca przyjęta do druku/
- [4] Ishii M.; Zuber N.: 1979, Drag coefficiant and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows, AJCHE Journal, Vol.25, No 5, str.843 - 855.

ГОМОГЕННАЯ И РАЗДЕЛЬНАЯ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ ПАРО-ВОДЯНОЙ СМЕСИ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В РАСЧЕТАХ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОДНО-ТРУБЧАТОГО КОТЛА

#### Реарме

Для расчетов гидравлических характеристик подъемных труб использовано две разные одномерные модели двухфазного течения пара и воды: модель гомогенную и раздельную. Для каждой модели течения принято равновесие фаз. Это значит, что для замыкания системы уравнений сохранения нужно принять уравнение состояния

$$g = g(p,h),$$

где *с* обозначает плотность, р давление, b энтальшию. Вторым замыкающни уравнением есть зависимость определяющая касательное напряжение на стенке труб.

Для гомогенной модели принято

$$z_{\rm w} = \frac{2f}{D} \frac{{\rm m}^2}{\rho_{\rm A} 2} \frac{1-{\rm x}}{1-\frac{\rho}{D^{\rm w}}} {\rm x},$$

где 1 - коэффициент сопротивления, D - диаметр канала, m - массовый поток течения двухфазной смеси, g и g" плотность двухфазной смеси и газовой фазы, соответственно, х - разновеская степень сухости, A - площадь поперечного сечения канала.

Для раздельной модели предлагается зависимость

$$\tilde{z}_{w} = \frac{2f}{D} \frac{m^{2}}{p'_{\lambda}^{2}} \left(\frac{1-y}{1-\varphi}\right)^{2},$$

где  $\rho'$  - плотность жидкой фазы, у - динамическая степень сухости, у = -, m'' - массовый поток газовой фазы,  $\phi$  - истинное объемное паросодержание Величины  $\phi$  и у связаны зависимостью, вид которой зависит от структуры двухфазного течения. В предлагаемой раздельной модели принято, что пузырковая структура выступает при  $\phi$  = 0-0,3, пробковая при  $\phi$  = 0,3 - 0,6. Для  $\tilde{\phi} > 0,6$  принято что двухфазное течение ведет себе как гомогенное. Зависимости связывающие  $\phi$  и у взято из литературы.

Для обоих моделей двухфазного потока проведены расчеты циркуляции вспомагательного судового котла тица D употреблая известный метод Легинегга. Разницы в расчетах кротности циркуляции небольшие для обоих моделей и достигают 16%.

HOMOGENOUS AND TWO-FLUID MODELS OF STEAM-WATER FLOW MIXTURES APPLIED FOR CALCULATIONS OF NATURAL CIRCULATION IN WATER-TUBE BOILER

# Summery

Two different one-dimensional models of steam-water two-phase flow: homogenous and two-fluid have been applied in calculations of hydralic characteristics of risers in a water-tube boiler. Thermodynamic equilibrium between phases has been assumed for both models in use. It means that the one of closure equations, for system of conservation equations describing flow within a pipe, is a equation of state

$$g = g(p,h),$$

where  $\rho$  is density, p pressure and h enthelpy. The system of equations is closed by adding a second closure equation for shearing stress  $\varepsilon_w$ .

For homogenous model equation for 2 takes form

$$t_{\rm w} = \frac{2f}{D} \frac{{\rm m}^2}{P_A 2} \frac{1-{\rm x}}{1-\frac{\rho}{2m}} {\rm x}^2,$$

where f friction coefficient, D pipe dimeter, m total mass flow rate,  $\rho$  and  $\rho$ " density of two-phase flow mixture and vapor respectively, x equilibrium dryness fraction, A cross-sectional area of pipe. For two-fluid model second closure equation is written in the form

$$\tilde{z}_{w} = \frac{2f}{D} \frac{\dot{m}^{2}}{\rho'_{A}2} \left(\frac{1-y}{1-\rho}\right)^{2},$$

where  $\rho'$  denotes density of liquid, y dynamic dryness fraction  $y = \frac{1}{2}$ , m" vapor mass flow rate,  $\phi$  void fraction. Relation between y and  $\phi$ is expressed in terms of two-phase flow patterns. In two-fluid model applied here it has been assumed that the bubble flow occurs for  $\phi = 0-0.3$ and after this range the slug flow appears when  $\phi = 0.3-0.6$ . Above  $\phi = 0.6$ 

# Model jednorodny i poślizgowy ....

two-phase flow is assumed to be a homogenous one. Relations between y and  $\phi$  for bubble and slug flow are available in the fliterature of two-phase flow.

For two different two-phase flow models the Calculations of natural circulation have been performed by means of Ledinegg method. A circulation ratio as a mesure of natural circulation has been made up for suxillary ship boiler of water tube and two drums (type D). The circulation ratios calculated with the aid of two different models differ from each other but not greater than 16%.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tedeusz Chmielnisk

Wpłynężo do Redskcji w marcu 1986 r.