

Karol MAJEWSKI¹
Sławomir GRĄDZIEL²

WYZNACZANIE SPADKU CIŚNIENIA W PAROWNIKU KOTŁA Z NATURALNYM OBIEGIEM WODY

W wielu procesach przemysłowych występują dwie fazy przepływu. W przemyśle energetycznym faza zmiany procesu (wrzenie, kondensacja) zachodzi najczęściej w parowniku i kondensatorze. Na dwie fazy przepływu wpływa wiele zjawisk, takich jak różna struktura przepływu, określony kształt bąbli i kropli itd. Można zatem stosować różne podejścia do określania spadku ciśnienia dla przepływu dwufazowego. Podczas modelowania zjawiska przepływu dwufazowego muszą być rozważane trzy zjawiska charakteryzujące spadek ciśnienia: spadek ciśnienia statycznego, pędu oraz spadek ciśnienia związany z tarciami. W artykule porównano następujące modele tarcowego spadku ciśnienia: homogeniczny model przepływu, modele Lockharta-Martinello, Friedela, Chisholma oraz graficzną metodę Martinello-Nelsona. Przedstawionych modeli matematycznych użyto do obliczenia spadku ciśnienia w parowniku kotła OP-210. Na podstawie pomiarów obliczono dla tych modeli strumień ciepła. Stwierdzono, że spadek ciśnienia tarcowego otrzymany na podstawie przedstawionych modeli ma zbliżoną wartość. Udział strat tarcia w całkowitym spadku ciśnienia jest niewielki. Można to wytłumaczyć niską jakością pary (poniżej 0,1), podczas gdy przepływ dwufazowy występuje w pionowych rurach parownika.

Słowa kluczowe: spadek ciśnienia, przepływ dwufazowy, parownik, kocioł energetyczny

1. Wstęp

Przepływy dwufazowe występują w wielu procesach przemysłowych. W energetyce zmiana stanu skupienia zachodzi przede wszystkim w parowniku kotła energetycznego oraz w skraplaczu. W związku z pojawieniem się mieszaniny parowo-wodnej zmieniają się własności przepływowo-ciepłne. Bardzo duża zmiana warunków przepływowo-ciepłnych ma miejsce w parowniku kotła, gdzie udział pary w mieszaninie zmienia się wraz z doprowadzaniem ciepła na drodze przepływu czynnika. Powstanie mieszaniny parowo-wodnej powoduje pojawie-

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Karol Majewski, Politechnika Krakowska, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, tel.: (12) 6283740, e-mail: kmajewski@mech.pk.edu.pl

² Sławomir Grądziel, Politechnika Krakowska, e-mail: gradziel@mech.pk.edu.pl

nie się zjawisk niespotykanych przy przepływach jednofazowych. Przy wyznaczeniu spadku ciśnienia należy uwzględnić siły międzyfazowe, kształt i rozmiar pęcherzy, prędkość poszczególnych faz i wiele innych czynników [1, 3, 4]. Spadek ciśnienia można obliczyć za pomocą wielu modeli matematycznych. W literaturze spotykane jest traktowanie mieszaniny parowo-wodnej jako mieszaniny jednorodnej oraz jako przepływu faz rozdzielonych. Istnieją również modele wykorzystujące graficzne zależności służące do określenia spadku ciśnienia. W pracy zostały przedstawione wyniki spadku ciśnienia w parowniku kotła OP-210, które określono za pomocą modelu homogenicznego, modeli faz rozdzielonych (Lockhart-Martinelli, Friedel, Chisholm) oraz graficznej metody Martinello-Nelsona [1, 3, 4, 9, 10].

2. Struktury przepływów dwufazowych

Parowniki większości kotłów energetycznych w Polsce są zbudowane z rur gładkich. Większość zainstalowanych jednostek to kotły z naturalnym obiegiem wody. Dla tych kotłów suchość pary x na wylocie z rur wznoszących nie może przekraczać 0,2. W związku z tym krotność cyrkulacji k nie może być mniejsza niż 5:

$$x = \frac{1}{k} \quad (1)$$

W parowniku kotła zachodzi wrzenie przechłodzone oraz rozwinięte wrzenie pęcherzykowe. Struktury przepływów mieszaniny parowo-wodnej w kanałach pionowych pokazano na rys. 1. W związku ze skomplikowaną strukturą przepływów wykorzystywanych jest wiele modeli opisujących przepływy wielofazowe.

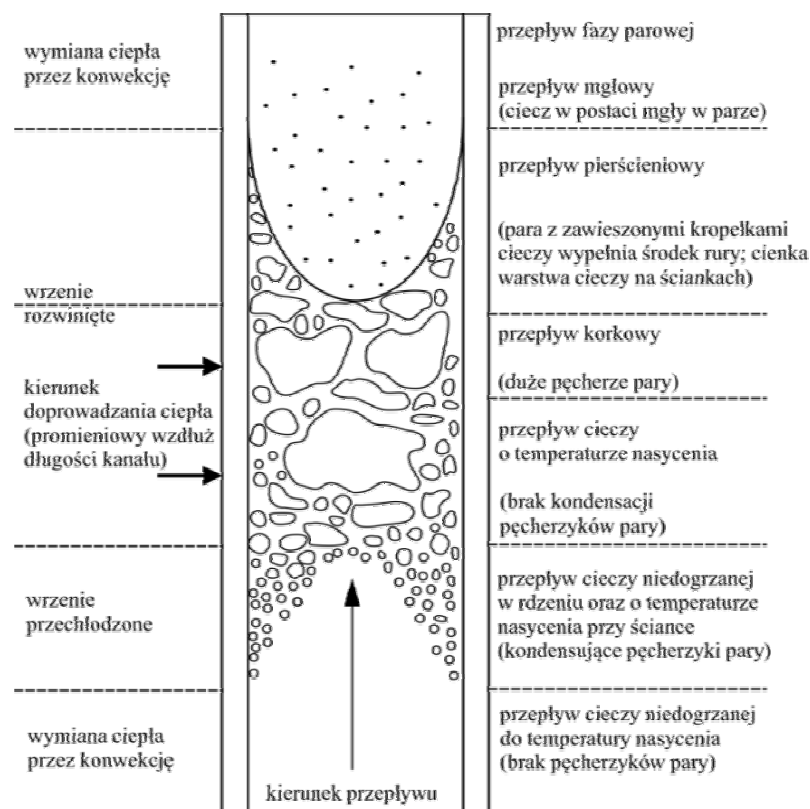
3. Modele służące do wyznaczenia spadków ciśnienia

3.1. Wprowadzenie

W ogólnym wypadku całkowity spadek ciśnienia jest określany z zależności [1-7]:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{dp_f}{dz} + \frac{dp_a}{dz} + \frac{dp_h}{dz} \quad (2)$$

gdzie: $\frac{dp_f}{dz}$ – straty wywołane tarciem, $\frac{dp_a}{dz}$ – zmiana pędu mieszaniny, $\frac{dp_h}{dz}$ – zmiana energii potencjalnej.



Rys. 1. Struktury przepływów dwufazowych w kanałach pionowych mieszanej woda–para wodna przy doprowadzaniu ciepła

Fig. 1. Two-phase flow patterns for water–steam mixture in heated vertical channels

W równaniu (2) straty ciśnienia związane ze zmianą pędu oraz zmianą energii potencjalnej wyznacza się z zależności:

$$\frac{dp_a}{dz} = \dot{G}^2 \frac{d}{dz} \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L(1-\varepsilon)} + \frac{x^2}{\rho_L\rho_G} \right] \quad (3)$$

$$\frac{dp_h}{dz} = g [\rho_G \varepsilon - \rho_L (1-\varepsilon)] \sin \alpha \quad (4)$$

gdzie: \dot{G} – prędkość masowa, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, x – stopień suchości pary, ε – stopień zapełnienia, ρ_L, ρ_G – gęstość fazy ciekłej, gazowej, kg/m^3 , α – kąt nachylenia kanału.

Określenie spadków ciśnienia spowodowanych tarciem jest zagadnieniem bardzo złożonym. W związku z tym opracowano wiele modeli matematycznych służących do wyznaczenia składowej związanej z tarciem. Przepływ mieszaniny może być traktowany jako przepływ mieszaniny jednorodnej (model homogeniczny) lub jako przepływ faz rozdzielonych. Wykorzystanie modeli faz rozdzielonych jest związane z obliczeniem mnożnika przepływu dwufazowego, dzięki któremu można wyznaczyć spadek ciśnienia wywołany tarciem.

3.2. Model homogeniczny

Zastosowanie homogenicznego modelu przepływu wiąże się ze spełnieniem założenia, że własności płynu zostają uśrednione dla całej mieszaniny, a prędkość fazy ciekłej i prędkość fazy gazowej są sobie równe. Przyrównanie prędkości faz oznacza, że nie występuje pomiędzy nimi poślizg międzyfazowy. Dla modelu homogenicznego spadek ciśnienia związany z tarciem określa się z zależności Darcy-Weisbacha [1, 10]:

$$\frac{dp_f}{dz} = f_{TP} \frac{\dot{G}^2}{2D\rho_H} \quad (5)$$

gdzie: f_{TP} – współczynnik strat przy przepływie mieszaniny jednorodnej, \dot{G} – gęstość strumienia masy, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, D – wymiar charakterystyczny kanału, m, ρ_H – gęstość homogeniczna, kg/m^3 .

Współczynnik liniowych strat tarcia jest wyznaczany z klasycznych równań (np. równania Blasiusa), na podstawie liczby Reynoldsa określanej dla uśrednionych własności mieszaniny [1, 3, 4, 10]:

$$\text{Re}_{TP} = \frac{\dot{G}D}{\eta_{TP}} \quad (6)$$

gdzie:

$$\frac{1}{\eta_{TP}} = \frac{x}{\eta_G} + \frac{1-x}{\eta_L} \quad (7)$$

przy czym: $\eta_{TP}, \eta_G, \eta_L$ – lepkość dynamiczna mieszaniny jednorodnej, fazy gazowej, fazy ciekłej.

Gęstość mieszaniny dwufazowej oblicza się, korzystając ze wzoru:

$$\rho_H = \frac{\rho_L \rho_G}{x\rho_L + (1-x)\rho_G} \quad (8)$$

3.3. Model Lockharta-Martinello

Model Lockharta-Martinello opiera się na wyznaczeniu mnożników dwufazowych (mnożniki Lockharta-Martinello), na podstawie których można określić gradient ciśnienia związany ze stratami tarcia w przepływie mieszaniny [1-4, 9-11]:

$$\frac{dp_{TP}}{dz} = \varphi_L^2 \frac{dp_L}{dz} \quad (9)$$

Wykorzystany w równaniu (9) mnożnik dwufazowy

$$\varphi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (10)$$

W równaniu (10) pojawia się parametr Martinello:

$$X = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,5} \left(\frac{\eta_L}{\eta_G} \right)^{0,1} \quad (11)$$

Wyznaczenie mnożnika Lockharta-Martinello jest związane z określeniem charakteru przepływu poszczególnych faz. W zależności od laminarnego lub turbulentnego charakteru przepływu faz dobiera się parametr C (tab. 1.).

Tabela 1. Wartości parametru C (na podstawie [1, 3, 4, 10])

Table 1. Values of C parameter (on the basis of [1, 3, 4, 10])

Faza ciekła	Faza gazowa	C
turbulentny	turbulentny	20
laminarny	turbulentny	12
turbulentny	laminarny	10
laminarny	laminarny	5

3.4. Model Friedela

Model Friedela został opracowany na podstawie 25 tys. punktów pomiarowych. Wykorzystuje się go dla przepływów dwufazowych w rurach pionowych i poziomych. Mnożnik dwufazowy wyznacza się na podstawie równania [1, 3-7, 10]:

$$\varphi_{Lo}^2 = E + \frac{3,24FH}{Fr^{0,045} We^{0,035}} \quad (12)$$

Mnożnik dwufazowy φ_{LO}^2 odnosi się do przepływu mieszaniny o parametrach fazy ciekłej. Współczynniki E , F , H oraz liczby kryterialne Froude'a Fr i Webera We wykorzystane w równaniu (12) opisano w pracach [1, 3-7, 10]. Model Friedela jest zalecany, gdy stosunek lepkości dynamicznej fazy ciekłej do gazowej $(\eta_L/\eta_G) \leq 1000$. Gdy ten warunek jest spełniony, wtedy równanie (12) można stosować w pełnym zakresie stopnia suchości pary.

3.5. Model Chisholma

Model Chisholma jest metodą empiryczną, którą można stosować w szerokim zakresie ciśnień oraz stopnia suchości pary. Mnożnik przepływu dwufazowego wyznacza się ze wzoru [1, 3, 10]:

$$\varphi_{LO}^2 = 1 + (Y^2 - 1) \left[Bx^{0,5(2-n)} (1-x)^{0,5(2-n)} + x^{2-n} \right] \quad (13)$$

gdzie: Y^2 – iloraz gradientów ciśnień w przepływach jednofazowych fazy gazowej do ciekłej, B – współczynnik zależny od prędkości masowej, n – wykładnik opisujący współczynnik oporów przepływu; dla równania Blasiusa $n = 0,25$.

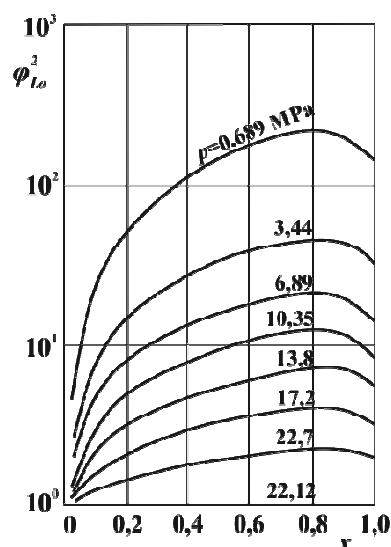
Metody wyznaczenia parametrów Y^2 i B zostały opisane w pracach [1, 3, 10].

3.6. Graficzna metoda Martinello-Nelsona

Większość procesów przemysłowych wiąże się z ciągłą zmianą udziału faz w mieszaninie. W związku z tym wyznaczenie spadku ciśnienia przy przepływie takiej mieszaniny jest procesem skomplikowanym. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod wyznaczenia spadku ciśnienia jest graficzna metoda Martinello-Nelsona. Została ona opracowana na przykładzie przepływów w poziomych kanałach mieszaniny parowo-wodnej w zakresie ciśnień 0,689-20,700 MPa. Mnożnik dwufazowy do wyznaczenia strat tarcia odczytuje się za pomocą wykresu opracowanego na podstawie różnych ciśnień oraz stopnia suchości pary x (rys. 2.). Gdy ciśnienie przekracza punkt krytyczny dla wody, wtedy mnożnik przyjmuje wartość $\varphi_{LO}^2 \approx 1$ [1, 4]. Odczytany mnożnik dwufazowy pozwala wyznaczyć spadek ciśnienia związany z tarcie, zgodnie ze wzorem:

$$\frac{dp_f}{dz} = \varphi_{LO}^2 \frac{dp_{f,LO}}{dz} \quad (14)$$

gdzie $\frac{dp_{f,LO}}{dz}$ – straty związane z tarcie odniesione do własności fazy ciekłej.



Rys. 2. Korelacja Martinello-Nelsona (na podstawie [1])

Fig. 2. Martinelli-Nelson's correlation (on the basis of [1])

4. Porównanie spadku ciśnienia w parowniku kotła OP-210 wyznaczonego różnymi modelami

Kocioł OP-210 jest kotłem jednowalczakowym z naturalną cyrkulacją wody. Jest przeznaczony do wytwarzania pary przegrzanej o ciśnieniu 9,8 MPa oraz temperaturze 540°C. Wydajność znamionowa kotła wynosi 210 Mg/h. W opisanym kotle został wyznaczony spadek ciśnienia w parowniku za pomocą metodyki opisanej w pracach [2, 8, 11]. Rozpatrywany kontur cyrkulacyjny kotła OP-210 składa się z 5 rur doprowadzających wodę do rury opadowej, 3 rur łączących rurę opadową z kolektorem dolnym, a następnie 30 szt. rur ekranowych. Rury ekranowe połączone z kolektorem zbiorczym przechodzą w 12 rur doprowadzających mieszaninę parowo-wodną do walczaka [2, 11]. Obliczenia prędkości przepływu czynnika oraz stopnia odparowania w konturze cyrkulacyjnym kotła OP-210 wykonano dla rzeczywistych strumieni ciepła. Metodyka pomiarów oraz uzyskane rezultaty zostały zaprezentowane w pracach [2, 11].

Dogrzanie do parametrów nasycenia, a następnie częściowe odparowanie wody kotłowej, odbywa się w rurach ekranowych. Metodyka obliczeniowa opiera się na podziale parownika na kilka stref [2, 8, 11]. Odparowanie zachodzi w dwóch strefach, tak że na wyjściu z pierwszej strefy odparowania stopień suchości pary $x_1 = 0,01$, a na zakończeniu drugiego odcinka odparowania stopień suchości pary $x_2 = 0,07$. W związku ze wzrostem stopnia suchości pary zwiększeniu ulegają straty ciśnienia wywołane tarciem. Porównanie wartości oporów uzyskanych za pomocą metodyki CKTI [2, 8, 11] modelu homogenicznego oraz modeli rozdzielonych faz przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Porównanie uzyskanych wyników

Table 2. Comparison of obtained results

Odcinek	Zmiana pędu, Pa/m	Zmiana energii potencjalnej, Pa/m	Straty tarcia, Pa/m					
			1	2	3	4	5	6
I	1546	6019	142	174	318	211	194	110
II	2399	3879	208	260	968	375	348	396
1 – na podstawie pracy [8], 2 – model homogeniczny, 3 – model Lockharta-Martinellogo, 4 – model Friedela, 5 – model Chisholma, 6 – model Martinello-Nelsona								

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że spadki ciśnienia wywołane tarciami przyjmują zbliżone wartości dla większości modeli. Odstępstwa występują w przypadku metody Lockharta-Martinellogo, która została opracowana na podstawie pomiarów przepływu mieszaniny powietrze-woda oraz powietrze-olej.

Uzyskane wyniki pokazują, że udział strat tarcia w całkowitym spadku ciśnienia jest niewielki. Ma na to wpływ niska wartość stopnia suchości pary x oraz pionowa budowa parownika kotłów energetycznych. W związku z tym dominujący udział w całkowitym spadku ciśnienia mają straty związane ze zmianą energii potencjalnej oraz zmianą pędu mieszaniny.

5. Wnioski

Z wykonanych obliczeń wynika, że wzrost udziału fazy gazowej w przepływającej mieszaninie powoduje zwiększenie oporów przepływu spowodowanych tarciami. Wśród wykorzystanych modeli występują rozbieżności związane z odmiennym podejściem do wyznaczenia mnożników przepływu dwufazowego. W przypadku rozpatrywanego przepływu udział fazy gazowej w mieszaninie jest niewielki, co powoduje, że rozbieżności występujące między poszczególnymi modelami są znaczne. Wyznaczone spadki ciśnienia związane z tarciami mają stosunkowo niewielki udział w całkowitym spadku ciśnienia. W związku z tym wybór modelu do wyznaczenia strat ciśnienia wskutek tarcia nie ma większego wpływu na całkowity spadek ciśnienia w konturze cyrkulacyjnym kotłów z naturalną cyrkulacją. Dominujący udział w całkowitym spadku ciśnienia ma zmiana energii potencjalnej oraz zmiana pędu mieszaniny.

Literatura

- [1] Dziubiński M., Prywer J.: Mechanika płynów dwufazowych, WNT, Warszawa 2009.
- [2] Grądział S.: Modelowanie zjawisk przeplywowo-ciepłnych zachodzących w parowniku kotła z naturalną cyrkulacją, Wydawn. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012.
- [3] Hetsroni G. (red.): Handbook of Multiphase System, McGraw-Hill Book Company, New York 1982.

- [4] Hewitt G., Shires G., Bott T.: Process heat transfer, CRC Press, Begell House, New York 1994.
- [5] Oćłoń P., Nowak M., Łopata S.: Simplified numerical study of evaporation processes inside vertical tubes, *J. Thermal Sci.*, 23 (2014), 177-186.
- [6] Oćłoń P., Nowak M., Majewski K.: Numerical simulation of water evaporation inside vertical circular tubes, *AIP Conf. Proc.*, 1558 (2013), 2419-2422.
- [7] Oćłoń P., Nowak M., Węglowski B., Nabagło T., Cisek P., Jaremkiewicz M., Majewski K.: Determination of the temperature fields in a fluid and a solid domain during the water evaporation processes in vertical tubes, *J. Appl. Comp. Sci.*, 22 (2014), 111-135.
- [8] Orłowski P.: Kotle parowe. Konstrukcja i obliczenia, WNT, Warszawa 1979.
- [9] Taler J. (red.): Procesy cieplne i przepływowe w dużych kotłach energetycznych. Modelowanie i monitoring, PWN, Warszawa 2011.
- [10] Thome J.: Wolverine Tube Engineering Data Book III, Wolverine Tube, 2004-2010.
- [11] Zima W., Grądziel S.: Simulation of transient processes in heating surfaces of power boilers, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013

DETERMINATION OF PRESSURE DROP IN EVAPORATOR OF NATURAL CIRCULATION POWER BOILERS

Summary

Two-phase flow occurs in many industrial processes. In power engineering equipment, the phase change process (boiling, condensation) takes place mostly in power boilers evaporator and a condenser. Two-phase flow is affected by many phenomena, like different flow patterns, specific shape of bubbles and droplets, interphase slip, etc. Therefore different approaches in determining the pressure drop for two-phase flow can be applied. The three methods for determining pressure drop must be considered when modelling the two-phase flow phenomena: the static, the momentum and the frictional pressure drops. This paper compares the following models of frictional pressure drop: homogeneous flow model, Lockhart-Martinelli, Friedel and Chisholm models, and Martinelli-Nelson graphical method. Presented mathematical models are used to calculate pressure drop in the evaporator of OP-210 power boiler for which the heat flux was evaluated from measurements. The comparison shows, that the frictional pressure drop obtained from the presented models gives almost the same values. The share of the frictional pressure drop in the total pressure drop is slight. It can be explained by the low steam quality (lower than 0.1), when the two-phase flow occurs in the vertical tubes of evaporator.

Keywords: pressure drop, two-phase flow, evaporator, power boiler

DOI: 10.7862/rm.2015.5

Otrzymano/received: 14.09.2014 r.

Zaakceptowano/accepted: 20.12.2014 r.