

Roman DYGA, Stanisław WITCZAK

e-mail: r.dyga@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Wpływ wypełnienia porowatego na wymianę ciepła oraz hydrodynamikę przepływu gaz – ciecz przez metale komórkowe

Wstęp

W ostatnich latach notuje się wzrost zainteresowania metalami komórkowymi o strukturze otwartej. Materiały te, nazywane pianami, coraz częściej traktowane są jako alternatywa dla klasycznych wypełnień porowatych oraz strukturalnych, zabudowywanych w różnego typu kompaktowych wymiennikach ciepła, regeneratorach ciepła, reaktorach katalitycznych czy aparatach kolumnowych. W aparatach przepływowych szczególnego znaczenia nabierają parametry geometryczne pian metalowych. Ponad 90% porowatości i całkowicie otwarte komórki pozwalają na znaczne obniżenie oporów przepływu płynu przetłaczanego przez wypełnienie. Stosunkowo duże komórki w znacznie mniejszym stopniu, niż w przypadku wypełnień ziarnistych, laminaryzują przepływ, co sprzyja intensyfikacji wymiany ciepła oraz masy.

Prowadzone intensywnie od końca lat 90. ubiegłego wieku badania procesów cieplnych i hydrodynamicznych towarzyszących przepływowi płynów przez piany metalowe pozwoliły stosunkowo dobrze poznać te zagadnienia w zakresie przepływów jednofazowych. W literaturze nadal trudno znaleźć informacje dotyczące przepływów dwufazowych gaz-ciecz przez piany metalowe.

Przykładem nielicznych prac w tym zakresie mogą być artykuły [Pangarkar i in., 2010; Stemmet i in., 2005; Stemmet i in., 2007]. Brak wyników badań podstawowych poważnie utrudnia projektowanie i budowę aparatury wypełnionej metalami komórkowymi. Szczególnie dotkliwy jest brak informacji dotyczących procesów nieadiabadyznych. Sytuację dodatkowo komplikuje fakt, że w zależności od technologii produkcji oraz stopu bazowego, metale komórkowe mogą cechować się dość zróżnicowaną strukturą geometryczną.

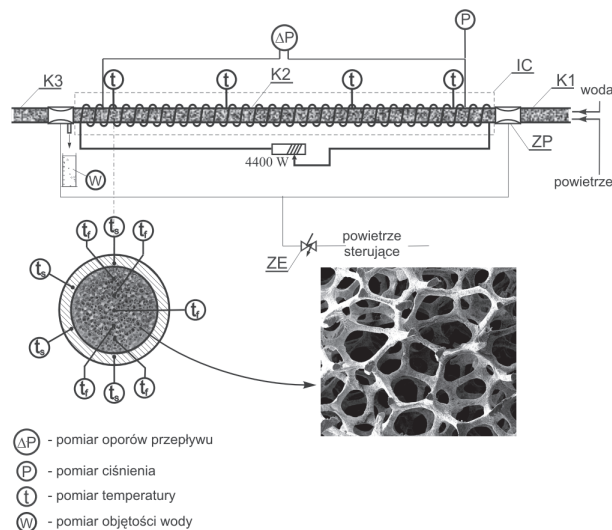
Badania doświadczalne

W ramach prac własnych przeprowadzono badania wymiany ciepła i hydrodynamiki przepływu mieszaniny powietrza i wody przy ich przetłaczaniu przez pianę ze stopu aluminium.

W opisywanych badaniach wykorzystano pianę o gęstości upakowania porów 40 PPI (por na cal) oraz porowatości $\varepsilon = 0,929$. Piana ta cechuje się całkowicie *otwartą* strukturą komórkową. Poszczególne komórki połączone są dużymi *oknami* a szkielec komórkowy zbudowany jest z powiązanych ze sobą cienkich włókien (Rys. 1).

Pianę, w postaci cylindrycznych wkładów, umieszczono wewnątrz poziomego kanału o przekroju kołowym i średnicy wewnętrznej $d = 0,02$ m. Na całkowitą długość kanału doświadczalnego składały się trzy odcinki. Sekcja pomiarowa K2 o długości 1,27 m, poprzedzający ją odcinek formowania się struktur przepływu K1 (0,92 m) oraz umieszczony za sekcją pomiarową odcinek wylotowy K3 o długości 0,42 m. Sekcja pomiarowa połączona była z pozostałymi odcinkami kanału sterowanymi pneumatycznie zaworami membranowymi ZP, które umożliwiały odcięcie płynu zawartego w sekcji pomiarowej. Pomiar objętości wody (po jej wytlóczeniu z kanału) umożliwiał obliczenie rzeczywistych udziałów objętościowych faz w mieszaninie. Odcinek wylotowy kanału wykonany był z bezbarwnego pleksiglasu, co pozwalało na obserwację kształtujących się w danych warunkach struktur przepływu.

Kanał w części pomiarowej ogrzewany był od zewnątrz elektryczną grzałką zwojową i zaizolowany cieplnie IC. Moc grzewczą ustalano przez zmianę napięcia zasilającego grzałkę. W ramach badań cieplnych rejestrowano temperaturę płynu i ścianki. Temperaturę mierzono w 36



Rys. 1. Schemat kanału pomiarowego

punktach termoparami typu K i rejestrowano wykorzystując wielokanałowy moduł pomiarowy zaopatrzonego w układ korygujący temperaturę odniesienia.

Opory przepływu mierzono za pomocą elektronicznych czujników różnicy ciśnień. Ze względu na duże straty ciśnienia, konieczne było rejestrowanie ciśnienia bezwzględnego w kanale, co umożliwiło określenie zmian gęstości powietrza.

Poza tym, za pomocą elektronicznych przepływomierzy, mierzono strumienie wody V_w i powietrza V_p .

Badania prowadzono przy prędkości pozornej (liczonej przy samodzielnym przepływie faz) powietrza zakresie $w_p = 0,07 \div 2,64$ m/s oraz wody $w_w = 0,006 \div 0,067$ m/s:

$$w_{p(w)} = \frac{4V_{p(w)}}{\varepsilon \pi d^2} \quad (1)$$

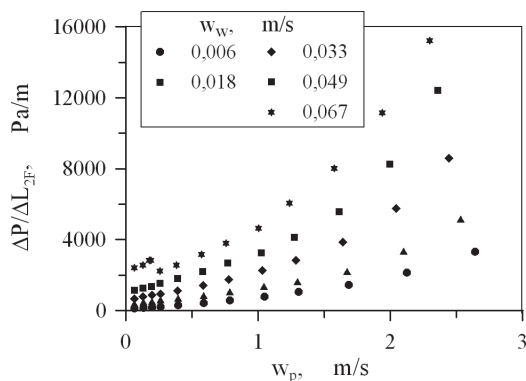
Przeprowadzono pięć serii pomiarowych, w których do stałego strumienia wody wprowadzano coraz większą ilość powietrza.

Analiza wyników

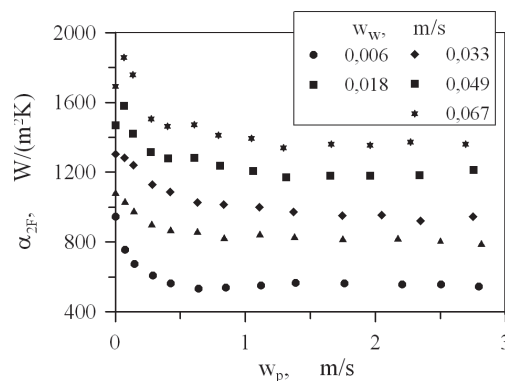
Z prac własnych dotyczących przepływów jednofazowych [Dyga, 2010] wynika, że płyn przetłaczany przez metal komórkowy płynie w sposób laminarny lub przejściowy w stosunkowo szerokim zakresie zmian prędkości. Przepływ nabiera charakteru burzliwego dopiero przy prędkości wyraźnie wykraczającej poza warunki w jakich realizuje się w praktyce przepływ dwufazowy. Laminarny charakter przepływu, znajduje odzwierciedlenie w wynikach badań przepływu powietrze-woda.

Opory przepływu mieszaniny dwufazowej zwiększają się wyraźnie wraz ze wzrostem prędkości faz (Rys. 2). Przy niewielkich strumieniach powietrza opory przepływu zmieniają się prawie liniowo, a dopiero kiedy prędkość powietrza przekracza 1 m/s, linia trendu zmian oporów przepływu nabiera charakteru funkcji potęgowej.

Praktycznie w całym zakresie badań rejestrowano monotoniczny wzrost oporów. Jedyne odstępstwo można zauważyć przy przepływie z prędkością wody 0,067 m/s kiedy to, zmiana prędkości powietrza z 0,18 do 0,26 m/s wywołuje efekt redukcji oporów przepływu dwufazowego. Zjawisko to związane jest z występującą w tych warunkach



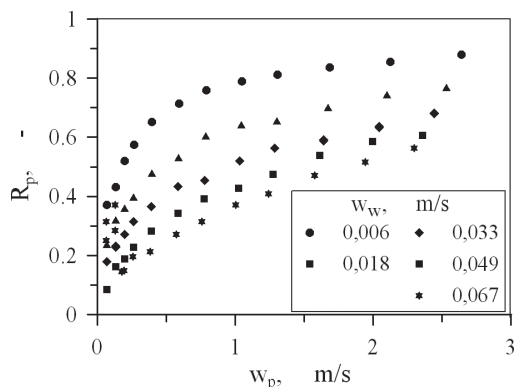
Rys. 2. Wpływ prędkości faz na opory przepływu dwufazowego



Rys. 4. Współczynnik wnikańia ciepła przy przepływie powietrze – woda

zmianą struktury przepływu – z przepływu korkowego w przepływ rozwarstwiony.

Zmianę struktury wyraźnie widać również w przebiegu zmian rzeczywistego udziału objętościowego powietrza R_p (Rys. 3). W przypadku przepływu korkowego powietrze *zamknięte* jest w wodzie w postaci różnej wielkości pęcherzy i korków, co powoduje że zajmuje stosunkowo dużą część przestrzeni kanału. Zwiększanie strumienia a co za tym idzie prędkości powietrza powoduje, że gaz *przebija się* przez wodę i płynie jako faza ciągła górną częścią kanału, a jego udział (w warunkach przejścia w przepływ rozwarstwiony) gwałtownie się zmniejsza. Ze względu na małą lepkość powietrza, faza ta może płynąć przez wypełnienie ze znacznie większą prędkością niż woda, stąd też rzeczywisty udział powietrza w mieszaninie jest znacznie mniejszy (nawet pięciokrotnie) niż wynika to z relacji strumieni obu na wlocie kanału.



Rys. 3. Rzeczywisty udział powietrza w mieszaninie dwufazowej

Jeszcze większy poślizg międzyfazowy obserwowano w pracach własnych dotyczących przepływu gaz – ciecz przez pianę ze stali stopowej FEC [Placzek *i in.*, 2012]. Piana ta ze względu na specyficzną bardziej zamkniętą budowę szkieletu komórkowego cechuje się znacznie większym oporem hydraulicznym. Bardziej złożony, niż w przypadku pian aluminiowych, jest również charakter zmian udziałów objętościowych.

Pomiary zmian temperatury pozwoliły wyznaczyć wartość współczynnika wnikańia ciepła α_{2F} od ogrzewanej ścianki kanału do płynu dwufazowego (Rys. 4):

$$\alpha_{2F} = \frac{q_{2F}}{t_s - t_f} \quad (2)$$

gdzie: t_s i t_f są średnimi temperaturami ścianki i płynu liczonymi na podstawie wszystkich punktów pomiaru temperatury.

Gęstość strumienia ciepła q_{2F} jest sumą gęstości strumieni ciepła zaabsorbowanego przez wodę q_w oraz powietrze q_p :

$$q_{p(w)} = m_{p(w)} (i_{p(w)}^k - i_{p(w)}^p) \quad (3)$$

Entalpię płynów obliczono na podstawie temperatury mieszaniny dwufazowej na początku (i^p) i końcu (i^k) ogrzewanego odcinka kanału.

Woda pobiera od ścianki kanału wielokrotnie większą ilość ciepła niż powietrze. Współczynnik wnikańia ciepła do mieszaniny dwufazowej zależy zatem w dużej mierze od strumienia wody i rośnie wraz ze wzrostem prędkości tej fazy. Wprowadzenie do kanału powietrza skutkuje zmniejszeniem intensywności wnikańia ciepła wraz ze wzrostem prędkości powietrza. Fakt ten można tłumaczyć ograniczeniem kontaktu cieczy ze ścianką grzewczą. Z drugiej strony przy rosnącym udziale powietrza następuje przyspieszenie cieczy, a współczynnik wnikańia ciepła stabilizuje się na stałym poziomie.

Wnioski

W przepływie mieszaniny dwufazowej przez pianę aluminiową dominującą rolę odgrywa ciecz – zarówno z punktu widzenia wymiany ciepła jak i hydrodynamiki przepływu. Wpływ powietrza widoczny jest przede wszystkim w przepływie z niewielką ilością tej fazy, kiedy to nawet niewielka zmiana strumienia gazu powoduje wyraźne zmiany rzeczywistych udziałów faz w mieszaninie oraz intensywności wnikańia ciepła.

Współczynnik wnikańia ciepła w przepływie gaz – ciecz jest mniejszy niż w przypadku przepływu jednofazowego samej cieczy.

Wykorzystana w badaniach piana aluminiowa, mimo prawie 93% porowatości, jest przyczyną dużych oporów przepływu oraz bardzo wyraźnego poślizgu międzyfazowego. Straty ciśnienia oraz rzeczywisty udział objętościowy powietrza zmieniają się monotonicznie wraz ze zmianami prędkości faz. Pewne odstępstwa widocznie są jedynie w warunkach zamiany struktury przepływu.

Zwraca uwagę fakt, że obecność piany aluminiowej nie powoduje rozproszenia płynów, a kształtujące się struktury przepływu odpowiadają strukturom w kanałach niewypełnionych.

LITERATURA

- Dyga R., 2010. Parametry przepływowe wypełnienia porowatego ze spienionej stali. *Inż. Ap. Chem.*, 49, nr 2, 33-34
- Pangarkar K., Schildhauer T.J., van Ommen J.R., Nijenhuis J., Moulijn J.A., Kapteijn F., 2010. Heat transport in structured packings with co-current downflow of gas and liquid. *Chem. Eng. Sci.*, nr 65, 420-426. DOI:10.1016/j.ces.2009.08.018
- Placzek M., Dyga R., Witczak S., 2012. Experimental investigation of void fraction in gas-liquid flow through FeCrALY foam. *Procedia Engineering*, nr 42, 755-768. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.462
- Stemmet C.P., Jongmans J.N., van der Schaaf J., Kuster B.F.M., Schouten J.C., 2005. Hydrodynamics of gas-liquid counter-current flowing solid foam packings. *Chem. Eng. Sci.*, nr 60, 6422-6429. DOI:10.1016/j.ces.2005.03.027
- Stemmet C.P., Meeuwse M., van der Schaaf J., Kuster B.F.M., Schouten J.C., 2007. Gas-liquid mass transfer and axial dispersion in solid foam packings. *Chem. Eng. Sci.*, nr 62, 5444-5450. DOI:10.1016/j.ces.2007.02.016

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego nr 3145/B/T02/2010/38 finansowanego ze środków na naukę w latach 2010–2013.