

ROMAN DYGA

Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

# Opór hydrauliczny przy przepływie gaz – ciecz kanałem z wypełnieniem siatkowym

## Wprowadzenie

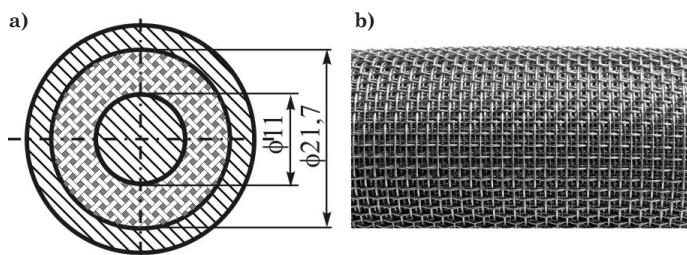
Zabudowanie materiałów porowatych we wnętrzu aparatury umożliwia zwiększenie jej czynnej powierzchni nawet do kilku tysięcy  $m^2$  na każdy  $m^3$  przestrzeni roboczej. Ma to ogromne znaczenie w przypadku procesów wymiany ciepła i masy. Przepływ przez wypełnienie porowate cechuje się wysokimi oporami przepływu, co powoduje wyraźne zmiany właściwości płynu na drodze przepływu. Ze względu na silną ściśliwość gazu, zmiany ciśnienia nabierają szczególnego znaczenia w przypadku przepływów dwufazowych. Wartość oraz przebieg zmian oporów przepływu przez wypełnienie porowate zależy w dużej mierze od struktury wewnętrznej wypełnienia. Szczególnym przypadkiem wypełnienia porowatego, ze względu na jego nieizotropową strukturę, jest wypełnienie siatkowe. Możliwość wykonania siatki o praktycznie dowolnym rozmiarze oczka i średnicy drutu pozwala kształtować wypełnienia o szerokim zakresie zmian porowatości i powierzchni właściwej.

W literaturze niewiele jest informacji dotyczących tego rodzaju wypełnień. Autorzy prac w tym zakresie, np. [1, 2] podają metody wyznaczania oporów przepływu jednofazowego, brak jest natomiast modeli opisujących zmiany oporów przepływu gaz – ciecz przez wypełnienie siatkowe.

W celu określenia wpływu wypełnienia siatkowego na charakter zmian oporów przepływu dwufazowego przeprowadzono własne badania doświadczalne.

## Badania doświadczalne

Badania obejmowały pomiary oporów przepływu jednofazowego powietrza i wody oraz dwufazowego powietrze-woda przez rurę wypełnioną strukturą siatkową. Wypełnienie wykonano z siatki stalowej o rozmiarze oczka 1,3 mm i średnicy drutu 0,25 mm. Zwinięta siatka tworzyła wielowarstwowe wypełnienie porowate o porowatości 76,4%. Ze względu na trudności w wykonaniu jednorodnego wypełnienia w całym przekroju kanału, przestrzeń przy osi rury zaślepieno nieporowatą masą na całej długości kanału. Uzyskano w ten sposób kanał o przekroju pierścieniowym (Rys. 1).



Rys. 1. Wypełnienie siatkowe: a) przekrój kanału b) widok rzeczywisty wypełnienia

Przepływ realizowano w kanale o średnicy wewnętrznej 21,7/11 mm i długości całkowitej 2,6 m. Sekcja pomiarowa o długości 0,9 m, była poprzedzona i zakończona odcinkami stabilizującymi przepływ. Opory przepływu oraz ciśnienie w kanale mierzono za pomocą elektronicznych czujników ciśnienia (różnicowych i bezwzględnych). Sygnały wyjściowe czujników ciśnienia oraz przepływomierzy wody i powietrza rejestrowane były przez komputerowy system akwizycji danych.

## Analiza wyników badań

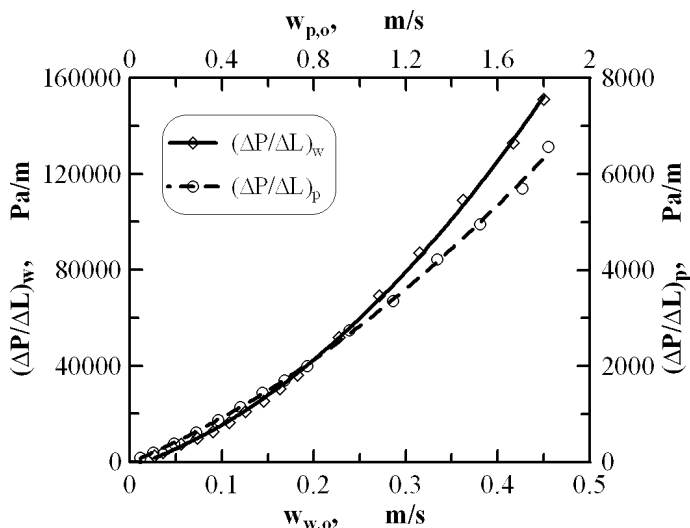
Wyniki pomiarów wskazują, że zastosowane wypełnienie siatkowe posiada typowe dla innych materiałów porowatych właściwości przepływowe. Charakter zmian oporów przepływu jednofazowego (Rys. 2) jest zgodny z prawem *Forchheimera*,

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \eta K^{-1} w + \rho C w^2 \quad (1)$$

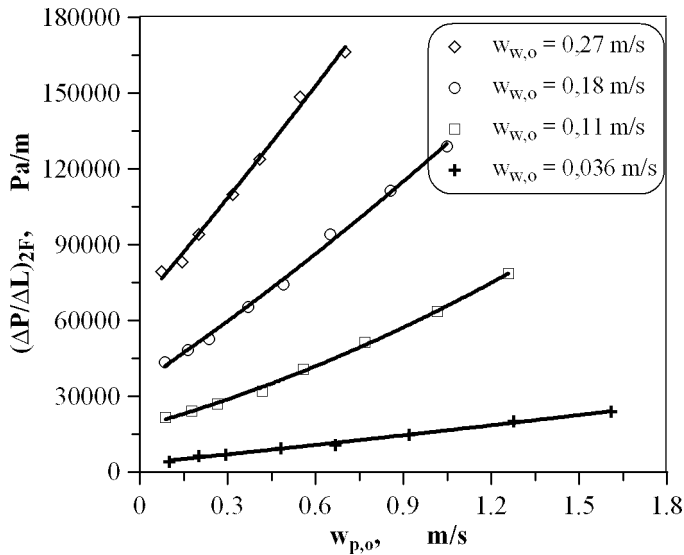
przy czym mimo prowadzenia badań ze stosunkowo dużymi prędkościami faz, odstępstwa od przepływu *Darcy'ego* są niewielkie.

Wyznaczona w oparciu o zmierzone opory przepływu wartość przepuszczalności  $K$  i współczynnika inercji  $C$  dla zastosowanego wypełnienia wynoszą:  $K = 9,63 \cdot 10^{-9} m^2$ ,  $C = 609 m^{-1}$ .

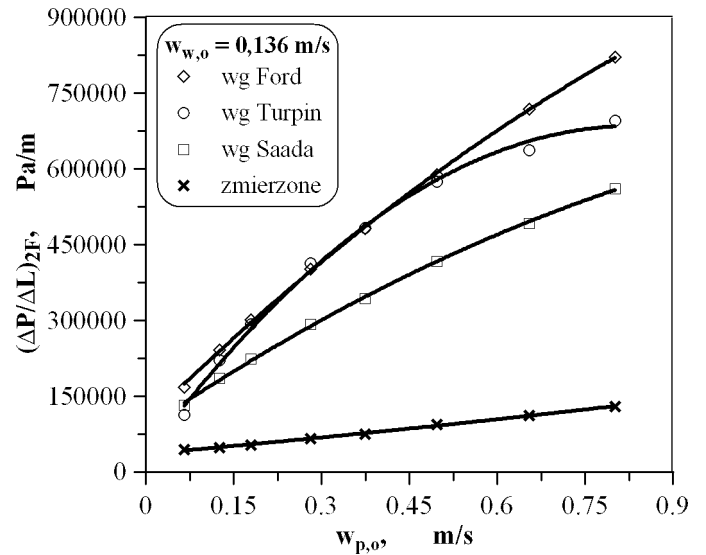
Opory przepływu dwufazowego (Rys. 3) zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości faz. Wzrost prędkości powietrza (przy  $w_{w,o} = const$ ) wywołuje w przybliżeniu liniowy przyrost oporów. Taki charakter zmian wiąże się z dużą zmianą gęstości powietrza dopływającego do kanału. W warunkach wysokich



Rys. 2. Opór przepływu jednofazowego przez wypełnienie siatkowe



Rys. 3. Wpływ prędkości faz na opór przepływu dwufazowego w wypełnieniu siatkowym



Rys. 4. Opory przepływu powietrze-woda, obliczone za pomocą wybranych metod

oporów przepływu, przyrost strumienia masowego gazu nie znajduje proporcjonalnego odzwierciedlenia w zmianie jego prędkości. Wpływ powietrza na wartość oporów przepływu dwufazowego uwidacznia się silniej przy przepływach z większymi strumieniami wody.

W oparciu o uzyskane wyniki badań, sprawdzono możliwość zastosowania wybranych modeli hydrauliki przepływu gaz-ciecz przez wypełnienia porowate do przewidywania oporów tego rodzaju przepływu przez wypełnienie siatkowe. W literaturze dostępne są głównie modele przepływu dwufazowego przez kolumny wypełnione cząstkami o kształcie kulistym. Do analizy wybrano modele zaproponowane przez autorów prac [3-5] (Tablica 1). O wyborze zdecydował stosunkowo szeroki zakres stosowalności tych modeli.

Rys. 4 przedstawia porównanie oporów zmierzonych i odpowiadających im wartości obliczonych. Uzyskane wartości obliczone są we wszystkich przypadkach dużo wyższe (nawet 7-krotnie) od oporów zmierzonych. Dodatkowo w przypadku metody opracowanej przez Turpina i Huntingtona [3] charakter zmian oporów przepływu jest wyraźnie krzywoliniowy.

Przyczyną tak znacznych błędów może być specyficzna niezotropowa budowa wewnętrzna wypełnienia siatkowego oraz duża porowatość (w stosunku do wypełnienia usypanego). Bardzo duże znaczenie ma wartość przyjętej do obliczeń średnicy hydraulicznej. W przeprowadzonej analizie obliczeniowej, jako wymiar charakterystyczny wypełnienia  $d_p$  przyjęto rozmiar oczka siatki.

### Podsumowanie

Stwierdzono, że opory przepływu jednofazowego przez wypełnienie siatkowe opisuje równanie *Forchheimera*. W przypadku przepływu gaz-ciecz straty ciśnienia rosną monotonicznie wraz ze wzrostem prędkości faz. Przyrost oporów ma charakter liniowy w przypadku zwiększania strumienia gazu. Metody obliczania oporów przepływu gaz-ciecz w kolumnach wypełnionych nie pozwalają na poprawne wyznaczenie strat ciśnienia przy przepływie przez wypełnienia siatkowe. Dla wypełnień siatkowych należy opracować odrębny model hydrauliki przepływu uwzględniający specyficzne właściwości przepływowe tego rodzaju struktur porowatych.

### Oznaczenia

- $d_p$  – średnica cząstki wypełnienia, [m],
- $w$  – prędkość, [m/s],
- $\Delta P/\Delta L$  – jednostkowy opór przepływu, [Pa/m],
- $\epsilon$  – porowatość, [-],
- $\eta$  – lepkość, [Pas],
- $\rho$  – gęstość, [kg/m<sup>3</sup>].

### Indeksy

- $c$  – ciecz,
- $g$  – gaz,
- $i$  – i-ta faza,  $i = c, g$ ,
- $p$  – powietrze,
- $w$  – woda,
- $o$  – wielkości pozorne (odniesione do samodzielnego przepływu faz),
- $2F$  – przepływ dwufazowy.

### LITERATURA

1. M. Özdemir, F. Özgüç: Heat and Mass Transfer, **33**, 129 (1997).
2. F. Barron Randall: Cryogenic systems. 2nd ed. Oxford University Press, 1985.
3. J.L. Turpin, R.L. Huntington: AIChE J., **13**, 1196 (1967).
4. M. Saada: Chem. Ind. Genie Chem., **105**, 1415 (1972).
5. L.H. Ford: Ph.D. Thesis, University of London, 1960.

Tablica 1

Opis oporów przepływu gaz-ciecz przez wypełnienie porowate

Źródło	Model matematyczny
Turpin [3]	$\frac{\Delta P}{\Delta L} = f \frac{w_g^2 \rho_g^3 (1-\epsilon)}{\epsilon d_p}; \quad d_e = \frac{2d_p \epsilon}{3(1-\epsilon)}$ $Inf = 8 - 1,12(\ln Z) - 0,0769(\ln Z)^2 + 0,0152(\ln Z)^3$ $Z = \frac{Re_g^{1,167}}{Re_c^{0,767}}; \quad Re_i = \frac{w_{i,o} d_p \rho_i}{\eta_i}$
Saada [4]	$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 0,027 \hat{g} \rho_c Re_c^{0,35} Re_g^{0,51} \left(\frac{d_k}{d_p}\right)^{1,15}; \quad Re_i = \frac{w_{i,o} d_p \rho_i}{\eta_i}$
Ford [5]	$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 0,0407 \hat{g} \rho_c Re_c^{0,29} Re_g^{0,57} \left(\frac{\eta_c}{\eta_g}\right)^{0,28}; \quad Re_i = \frac{w_{i,o} d_p \rho_i}{\eta_i}$