

## Norbert SZMOLKE

e-mail: n.szmolke@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Inwersja faz w fluidalnym wymienniku ciepła

## Wstęp

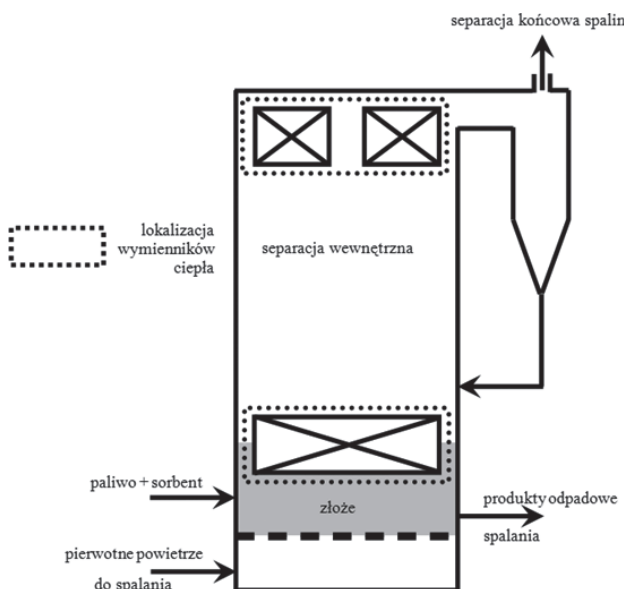
Inwersja faz, rozumiana jako proces wymiany funkcji pomiędzy substancjami biorącymi w nim udział jest zjawiskiem powszechnie znanym m.in. w reologii czy technologiach membranowych [Kruszelnicka i Sterzyński, 2005]. Występuje również w trójfazowych procesach przepływowych z udziałem gazu i cieczy [Witczak, 2004].

Nieco inaczej jest interpretowana w aparatach fluidyzacyjnych. W układach ciecz – ciało stałe występuje wtedy, gdy większe cząstki frakcji stałej mają mniejszą gęstość od cząstek mniejszych. Dla takich przypadków przeanalizowano już wpływ gęstości pozornej frakcji stałej, wielkości cząstek czy kształtu kolumny fluidyzacyjnej na występowanie inwersji. Przeprowadzono również symulacje numeryczne i przedstawiono modele matematyczne opisujące to zjawisko [Kmieć i in., 2007].

W przypadku fluidyzacji gazowej w zasadzie nie prowadzono badań nad inwersją faz; w klasycznych układach fluidalnych zjawisko to rzadko występuje.

Szczególnym przypadkiem fluidyzacji gaz – ciało stałe jest przepływ mieszaniny przez przestrzeń międzyrurową wymiennika ciepła. Obecność wkładu rurowego powoduje, że inwersja faz może częściej występować, a jej przebieg jest zdecydowanie inny niż w układzie ciecz – ciało stałe.

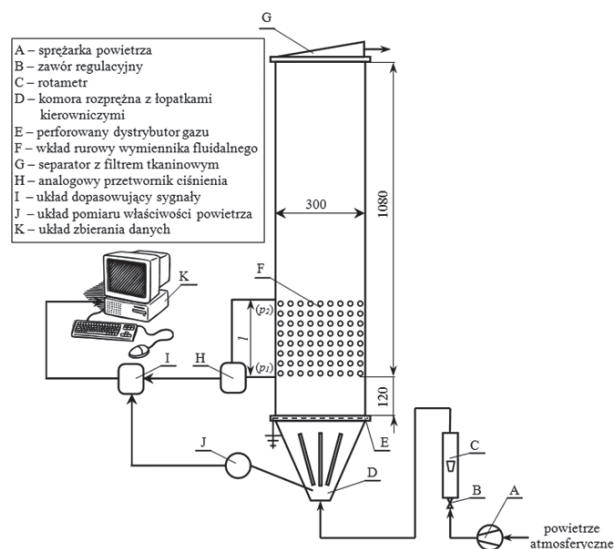
W pracy przedstawiono wybrane informacje wynikach badań nad inwersją faz w modelowym fluidalnym wymienniku ciepła, który stosowany jest w kotłach z pęcherzykową warstwą fluidalną (Rys. 1). W badanym aparacie proces realizowany jest w układzie powietrze – ciało stałe.



Rys. 1. Schemat kotła z fluidalną warstwą pęcherzykową, wg [Chmielniak, 2008]

## Stanowisko doświadczalne i pomiary

Na rys. 2 pokazano schemat stanowiska doświadczalnego z przezroczystym kanałem pomiarowym (o wymiarach 300×30×1200 mm) w którym montowano wkłady rurowe. Jego konstrukcja umożliwia zastosowanie układów rurowych o różnej geometrii (kwadratowej, kwadratowej przestawnej i trójkątnej przestawnej) o poziomej podziałce  $t = 25 \div 55$  mm i średnicy rur  $d_r = 16 \div 38$  mm.



Rys. 2. Schemat stanowiska doświadczalnego

Do pomiaru zmian ciśnienia przy ścianie aparatu wykorzystano analogowe przetworniki. Miejsca pomiaru ciśnienia rozmieszczono w takiej odległości, by możliwe było zmierzenie wartości ciśnień bezpośrednio poniżej pierwszego ( $p_1$ ) i powyżej ostatniego rzędu rur ( $p_2$ ).

Podczas pomiarów szczególny nacisk położono na pozyskanie informacji o warunkach geometrycznych i przepływowych, przy których rozpoczyna się inwersja faz.

Podstawowe informacje o badanych materiałach, którymi były frakcje monodispersyjne, przedstawiono w tab. 1. Wartości średniej średnicy ziaren  $d$  wyznaczono metodą analizy sitowej a gęstość  $\rho$  metodą wagową.

Warstwa ciała stałego w stanie zwartym wypełniała całą przestrzeń pod wkładem rur oraz pierwszy rząd rur.

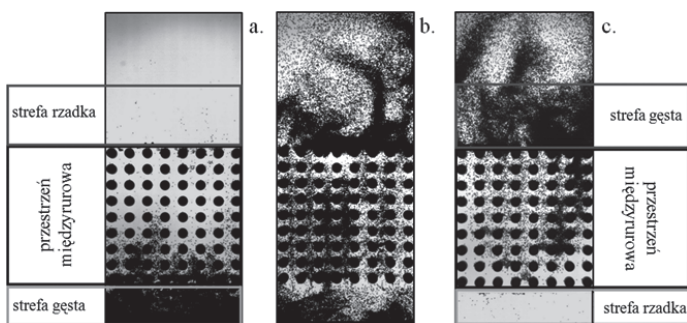
Tab. 1. Własności fizyczne badanych materiałów

Oznaczenie materiału	$d$ mm	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>
G	2,3	1160
K1	0,4	1470
K2	0,6	1450
K3	0,9	1435
Q	5,1	900
P1	0,5	2720
P2	1,2	2650
R	1,7	1120

## Inwersja faz w przestrzeni międzyrurowej fluidalnego wymiennika ciepła

Inwersja faz w przestrzeni międzyrurowej fluidalnego wymiennika ciepła to szczególna forma struktury burzliwej [Szmolke, 2011], jaka może powstać w takim aparacie; charakteryzuje się ona trzema strefami: strefą rzadką nad rusztem, przepływem przez przestrzeń międzyrurową oraz strefą zagęszczoną nad wkładem rurowym (Rys. 3).

Podczas inwersji faz występuje silne porywanie cząstek ciała stałego z warstwy fluidalnej; następuje to, gdy prędkość fazy gazowej jest wyższa od prędkości opadania pojedynczych cząstek.



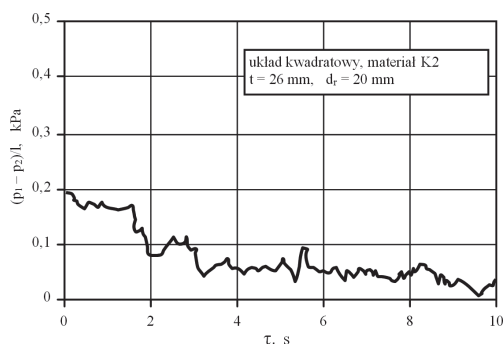
Rys. 3. Etapy zjawiska inwersji faz: a) strefa gęsta pod pękiem rur a rzadka nad pękiem rur, b) etap przejściowy, c) strefa gęsta nad pękiem rur a rzadka pod pękiem rur

W trakcie zjawiska inwersji cząstki stałe przemieszczają się w kierunku przestrzeni międzyrurowej, gdzie doznają wyraźnego przyspieszenia. Nad ostatnim rzędem rur gwałtownie zmniejsza się prędkość gazu; cząstki powracają do stanu fluidyzacji burzliwej lub korkowej.

Jest to zjawisko niekorzystne, ponieważ w trakcie i po jego wystąpieniu pewna część cząstek ciała stałego nie bierze udziału w procesach wymiany ciepła i masy.

### Wyniki badań eksperymentalnych

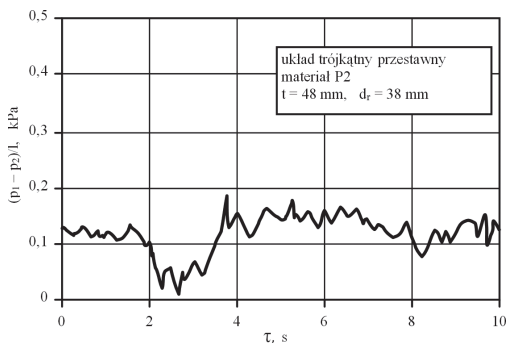
Na rys. 4 pokazano wyniki pomiaru różnicy ciśnień  $p_1 - p_2$  na wysokości  $l$ , będącej odległością pomiędzy punktami impulsowymi (Rys. 2) w czasie  $\tau$ .



Rys. 4. Przebieg zmian różnicy ciśnień,  $u_G = 0,33$  m/s

W przypadku cząstek o małej gęstości oraz niewielkiej średnicy inwersja przebiega w stosunkowo krótkim czasie. Większa część frakcji stałej znajdzie się nad wkładem rurowym, który przejmuje rolę rusztu w tym procesie. Nadciśnienie nad wkładem rurowym po wystąpieniu inwersji jest znacznie wyższe od tego, które mierzone jest pod wkładem rurowym stąd na wykresie zmniejszenie unormowanej wartości różnicy ciśnień.

Na rys. 5 pokazano zmiany różnicy ciśnień dla cząstek o większej gęstości i geometrii wkładu rurowego.



Rys. 5. Przebieg zmian różnicy ciśnień,  $u_G = 0,95$  m/s

W tym przypadku niewielka część złoża poddała się inwersji (ok. 2 s trwania procesu). Cząstki stałe z górnej części złoża, zgodnie z przebiegiem zjawiska, przemieściły się ponad wkład rurowy zaś większa ich

część pozostała w stanie pęcherzykowania poniżej wkładu. Unormowane ciśnienie różnicowe po chwilowym obniżeniu przyjmuje wartości quasi-stabilne.

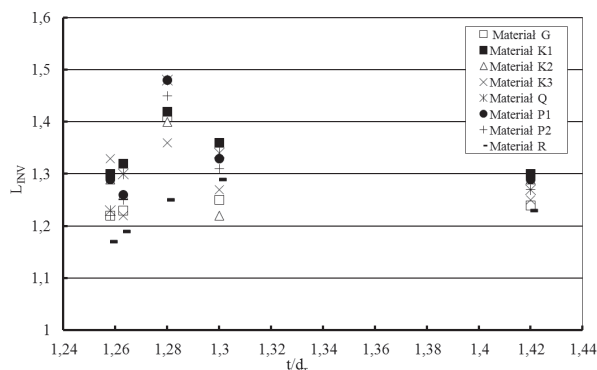
Na rys. 6 przedstawiono warunki geometryczne  $t/d_r$  i przepływowe  $L_{INV}$  przy których zaobserwowano początek inwersji faz. Liczba inwersji  $L_{INV}$  zdefiniowana jest jako

$$L_{INV} \equiv \frac{u_G}{u_{mf}} \quad (1)$$

gdzie:

$u_G$  – prędkość pozorna gazu, [m/s]

$u_{mf}$  – prędkość początku fluidyzacji, obliczona z zależności  $Wena$  i  $Yu$ , zalecanej przez Geldarta do stosowania dla fluidyzacji powietrze – ciało stałe [Wen i Yu, 1966; Geldart, 1973], [m/s]



Rys. 6. Warunki geometryczne i przepływowe początku inwersji faz

Jak wynika z przeprowadzonych eksperymentów inwersja faz występuje przede wszystkim dla wkładów rurowych, których geometria charakteryzuje się stosunkiem

$$\frac{t}{d_r} \leq 1,42 \quad (2)$$

Dla badanej geometrii aparatu, po przekroczeniu prędkości początku fluidyzacji pewna część cząstek trafia do przestrzeni międzyrurowej w której prędkość jest znacznie wyższa. Układ rurowy wymiennika fluidalnego zaczyna spełniać rolę dystrybutora gazu.

### Wnioski

Prędkości gazu, przy których rozpoczyna się inwersja faz odpowiadają prędkości rozwiniętego pęcherzykowania. Początek inwersji faz dotyczy tych cząstek, które znajdują się w dolnej części przestrzeni międzyrurowej.

Cząstki pomiędzy rusztem a pierwszym rzędem rur przepływają przez obszar wkładu rurowego przy podwyższonej prędkości  $u_G$ , by w konsekwencji znaleźć się nad przestrzenią międzyrurową i tam tworzyć strukturę korkową lub burzliwą. Inwersja faz następuje w przestrzeni międzyrurowej choć jej skutki są widoczne poza nią.

Zakres występowania inwersji jest bardzo ograniczony. Aby jej uniknąć w aparatach ze złożem pęcherzykowym należy stosować wkłady rurowe o dużej podziałce, pozwalające na swobodny ruch cząstek w przestrzeni międzyrurowej.

### LITERATURA

Chmielniak T., 2008. Technologie energetyczne. WNT, Warszawa  
 Geldart D., 1973. Types of gas fluidization. *Powder Technology*, 7, nr 5, 285-292. DOI: 10.1016/0032-5910(73)80037-3  
 Kmieć Z. i in., 2007. Teoria i technika fluidyzacji. Pr. Nauk. Inst. Inż. Ochr. Środ., 83, monogr. 48, Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław  
 Kruszelnicka I., Sterzyński T., 2005. Reologiczna i strukturalna ocena mieszanin polimerowych w warunkach inwersji faz. *Polimery*, 50, nr 5, 358-364  
 Szmolke N., 2011. Przepływ w aparacie fluidalnym z pękiem rur. *Studia i Monogr.*, z. 287, Wyd. Pol. Opolskiej, Opole  
 Wen C.Y., Yu Y.H., 1966. Mechanics of Fluidization. *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 62, nr 67, 100-111  
 Witczak S., 2004. Inwersja faz ciekłych w przepływach trójfazowych gaz-ciecz-ciecz. *Inż. Chem Proc.* 23, 3/3, 1801-1806