

Ćwiczenie 6:

OKREŚLANIE STRUKTUR PRZEPŁYWU UKŁADU DWUFAZOWEGO GAZ-CIECZ

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest identyfikacja struktur przepływu układu dwufazowego woda-powietrze w rurach pionowych i poziomych oraz sprawdzenie zgodności zakresów ich występowania z zakresami podawanymi na mapach przepływu mieszaniny dwufazowej.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

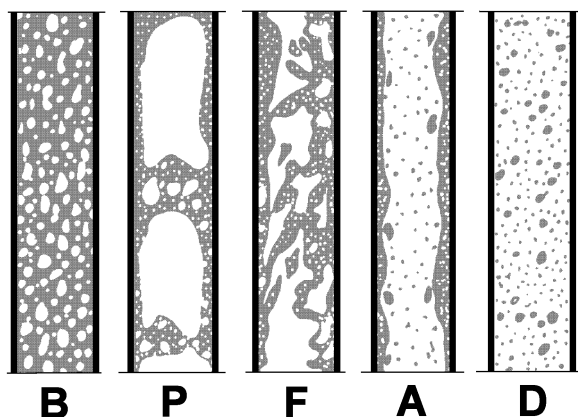
Wiele procesów technologicznych, prowadzonych na skalę przemysłową, zachodzi w układach dwufazowych gaz-ciecz. Układy te niejednokrotnie są przesyłane przez rurociągi łączące poszczególne elementy instalacji produkcyjnej. Wtedy gdy gaz i ciecz płyną jednocześnie przez kanał występuje przepływ mieszaniny dwufazowej. W trakcie takiego przepływu oba składniki mieszaniny tworzą formy geometryczne o różnych kształtach. Wzajemne konfiguracje tych form noszą nazwę struktur przepływu. Rodzaj tworzącej się struktury uzależniony jest od takich parametrów jak:

- wartość strumieni obu faz;
- właściwości fizyczne faz;
- wymiar, kształt i usytuowanie kanału w którym odbywa się przepływ.

Znajomość poszczególnych struktur przepływu, a zwłaszcza zakresów ich występowania, jest o tyle istotna, że częstokroć wytwarzane są one celowo dla uzyskania korzystnych warunków prowadzenia danego procesu. Przykładem mogą tu być wyparki cienkowarstewkowe w których wytwarza się w sposób hydrauliczny przepływ cienkiej warstwy cieczy na wewnętrznej ścianie rury wyparnej.

Systematyki struktur przepływu dokonuje się zwykle w oparciu o obserwacje wizualne płynącej mieszaniny dwufazowej.

Na rys. 1 przedstawiono powszechnie znaną, np. podawaną w pracy [1], systematykę struktur przepływu układu gaz-ciecz, które mogą pojawić się przy współprądowym wznoszącym przepływie gazu i cieczy w rurze pionowej.



Rys. 1. Struktury dwufazowe gaz-ciecz przy przepływie w rurze ku górze

B - pęcherzykowa; P - korkowa; F - pianowa;

A - pierścieniowa; D - dyspersyjna

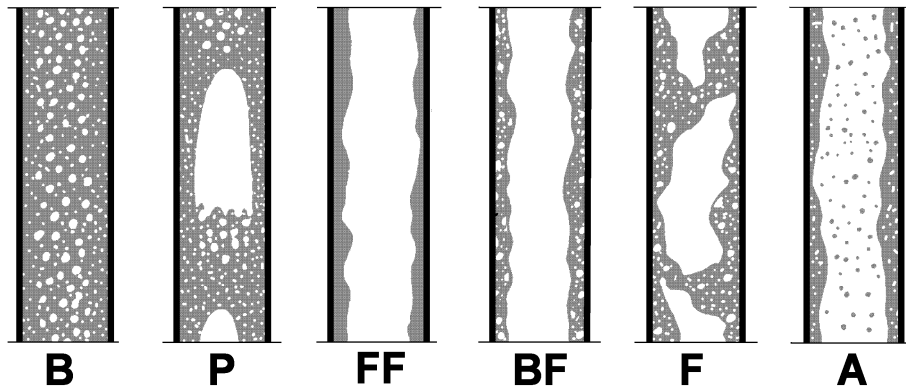
Są to następujące rodzaje (struktury) przepływu:

- przepływ pęcherzykowy (B) - charakteryzujący się tym, że w ciągłej fazie ciekłej rozproszone są pęcherzyki gazu płynące z prędkością zbliżoną do prędkości cieczy;
- przepływ korkowy (P) - to naprzemienny przepływ porcji cieczy i korków gazu;
- przepływ pianowy (F) - pojawia się wraz ze zwiększeniem strumienia gazu. Zwiększenie zawartości gazu w porcjach cieczy zaburza ciągłość fazy ciekłej i dochodzi do wzajemnego chaotycznego przemieszczania się faz;
- przepływ pierścieniowy (A) - charakteryzujący się tym, że ciecz płynie cienką warstewką po wewnętrznej powierzchni rury, a gaz, ze znaczną prędkością, jej środkiem. Wraz ze zwiększeniem prędkości gazu i zmniejszeniem prędkości cieczy, zanikają fale na powierzchni rozdziału faz;
- przepływ dyspersyjny (D) - przy dużym strumieniu gazu następuje porywanie kropeł cieczy z wierzchołków fal przepływu pierścieniowego. W skrajnym przypadku ciecz w całości płynie w postaci kropeł i mgły.

W przypadku przepływu układu dwufazowego w dół przez rury pionowe brak jest w literaturze zgodnej opinii co do systematyki struktur przepływu. Na rys. 2

przedstawiono, zaczerpniętą z pracy [2], przykładową systematykę tych struktur zaproponowaną przez Oschinowo i Charlsa.

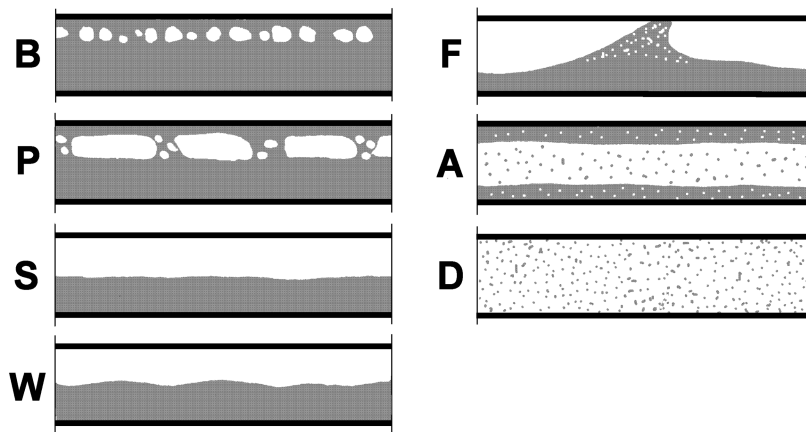
Warto zauważyć, że podczas przepływu opadającego nie tworzy się przepływ dyspersyjny cieczy, natomiast przepływowi wznoszącemu nie towarzyszy klasyczny przepływ cienkiego filmu cieczy po ścianie kanału, jak to może mieć miejsce podczas przepływu ku dołowi.



Rys. 2. Struktury dwufazowe gaz-ciecz przy przepływie w rurach ku dołowi

B - pęcherzykowa; P - korkowa; FF - spływający film; BF - pęcherzykowo-filmowa; F - pianowa; A - pierścieniowa

Na rys. 3 podano systematykę struktur występujących podczas przepływu mieszaniny gaz-ciecz przez rury poziome. Została ona zaproponowana przez Bakera i jest powszechnie uznawana przez wielu badaczy.



Rys. 3. Struktury dwufazowe gaz-ciecz przy przepływie w rurze poziomej
 B - pęcherzykowa; P - korkowa; S - rozwarstwiona; W - falowa; F - rzutowa;
 A - pierścieniowa; D - dyspersyjna

Według tej systematyki wyróżnia się następujące struktury:

- przepływ pęcherzykowy (B) - w ciągłej fazie ciekłej płyną pęcherzyki gazu gromadzące się głównie w górnej części rury;
- przepływ korkowy (P) - w ciągłej fazie ciekłej płyną korki gazu w postaci walców o zaokrąglonym czole, korki mają tendencję do przepływu w górnej części rury;
- przepływ rozwarstwiony (S) - ciecz płynie w dolnej części kanału, zaś gaz w górnej; powierzchnia rozdziału faz jest gładka;
- przepływ falowy (W) - wraz ze zwiększaniem strumieni gazu i cieczy na powierzchni rozdziału faz tworzą się fale, początkowo sinusoidalne, a następnie tzw. fale toczące;
- przepływ rzutowy (F) - powierzchnia rozdziału faz jest tak znacznie zafalowana, że szczyty fal dotykają górnej ściany rury tworząc na przemian przepływ porcji cieczy oraz spienionej mieszaniny cieczy i gazu;
- przepływ pierścieniowy (A) - ciecz płynie cienką warstwą po ścianie, zaś gaz środkiem rury, może występować asymetria grubości filmu cieczy - w dolnej części przekroju rury film jest grubszy niż w górnej. Na powierzchni rozdziału faz pojawiają się fale;
- przepływ dyspersyjny (D) - przy znacznych wartościach prędkości gazu następuje porywanie cieczy z wierzchołków fal, w skrajnym przypadku zanika film cieczy na ścianie, a cała ciecz płynie w postaci kropeł unoszonych przez gaz.

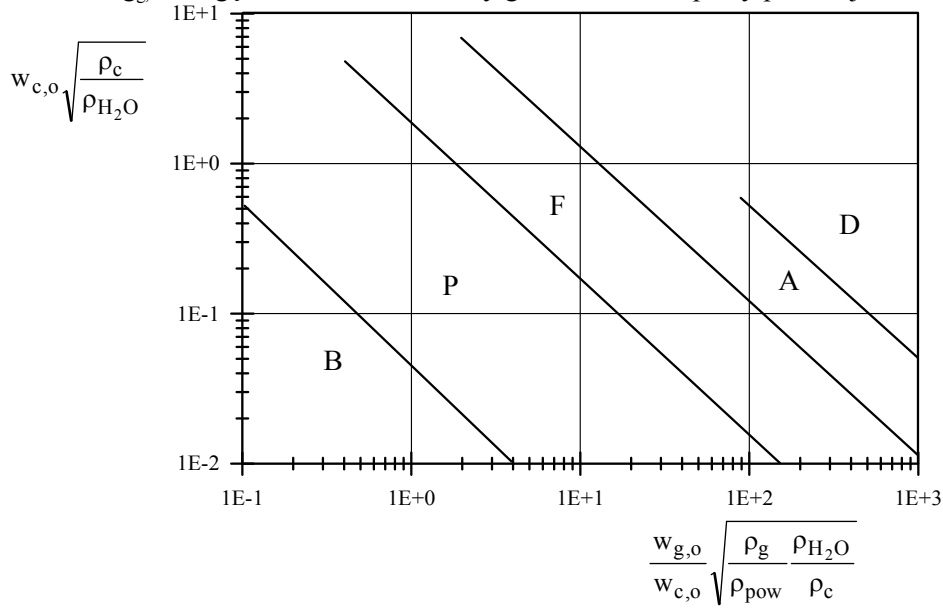
Zakresy występowania poszczególnych struktur przepływu układu dwufazowego są przedstawiane na ogół, w zależności od różnych parametrów, na wykresach zwanych mapami przepływu w formie obszarów rozdzielonych liniami bądź pasmami granicznymi. W literaturze, np. [1, 2, 3], można spotkać bardzo wiele takich map, opracowanych w różnych układach współrzędnych i obowiązujących dla kanałów o różnej geometrii i kierunku przepływu mieszaniny dwufazowej. Niekiedy mapy takie obowiązują jedynie dla mieszanin dwufazowych o ściśle określonych właściwościach fizycznych obu tworzących je składników i w ściśle określonych zakresach zmian ich strumieni.

Na rys. 4. przedstawiono mapę dla przepływu wznoszącego w rurach pionowych. Mapa ta uznawana jest w literaturze jako uniwersalna, obowiązująca w szerokim zakresie zmian właściwości i strumieni składników mieszaniny dwufazowej.

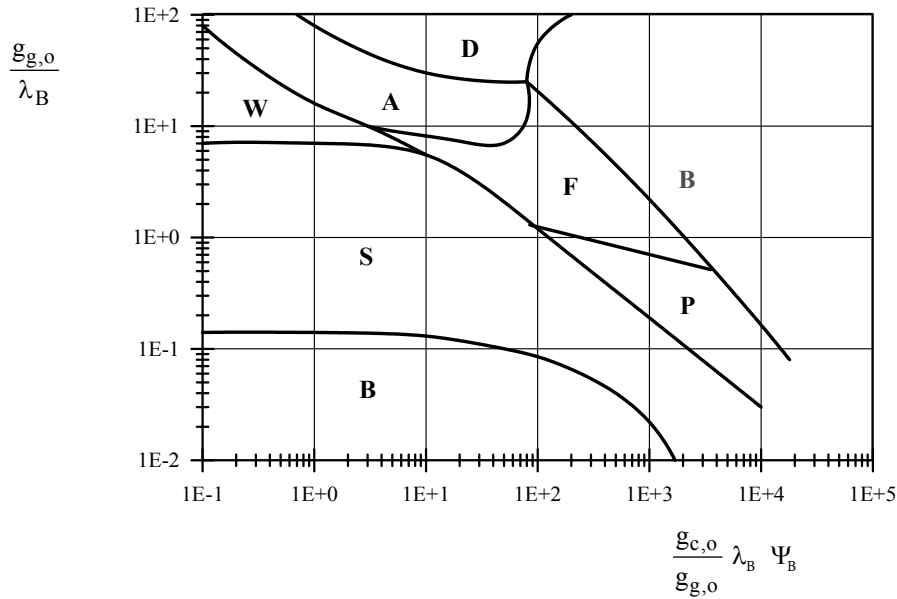
Na rys. 5 przedstawiono natomiast mapę obowiązującą dla przepływu przez rurę poziomą.

Parametry od wartości których uzależniono na obu prezentowanych mapach obszary występowania poszczególnych struktur to:

- $w_{c,o}$ - prędkość pozorna cieczy liczona na pełny przekrój kanału;
- $w_{g,o}$ - prędkość pozorna gazu liczona na pełny przekrój kanału;
- $g_{c,o}$ - gęstość strumienia masy cieczy liczona na pełny przekrój kanału;
- $g_{g,o}$ - gęstość strumienia masy gazu liczona na pełny przekrój kanału;



Rys. 4. Mapa struktur przepływu mieszaniny gaz-ciecz w rurach pionowych ku górze
B - pęcherzykowa; P - korkowa; F - pianowa; A - pierścieniowa; D - dyspersyjna



Rys. 5. Mapa struktur przepływu mieszaniny gaz-ciecz w rurach poziomych
 B - pęcherzykowa; P - korkowa; S - rozwarstwiona; W - falowa; F - rzutowa;
 A - pierścieniowa; D - dyspersyjna

$$\lambda_B = \left(\frac{\rho_g}{\rho_{\text{pow}}} \frac{\rho_c}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^{0,5}$$

$$\Psi_B = \frac{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}}{\sigma_c} \left[\frac{\eta_c}{\eta_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_c} \right)^{0,5} \right]^{0,33}$$

gdzie: ρ - gęstość, kg/m^3 ;
 η - współczynnik dynamiczny lepkości, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;
 σ - napięcie powierzchniowe, N/m ;

indeksy dotyczą:

c - cieczy;
 g - gazu;
 pow - powietrza;
 H_2O - wody.

Dysponowanie mapami przepływu dla określonego przypadku daje możliwość przewidywania rodzaju struktury, która wystąpi w danym rurociągu zasilanym założonymi strumieniami gazu i cieczy. Znajomość rodzaju struktury dwufazowej pozwala natomiast na właściwą ocenę zjawisk ciepłno-

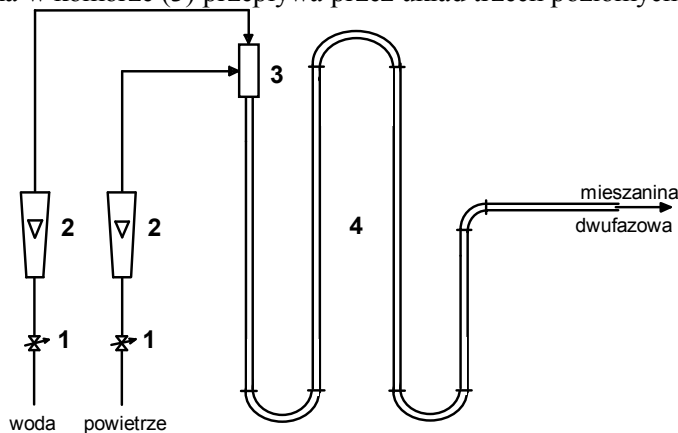
przepływowych (opory przepływu, wnikanie ciepła) towarzyszących tego rodzaju przepływowi.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Stanowisko do identyfikacji struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz składa się z dwóch niezależnych od siebie części.

Pierwsza z nich, przedstawiona schematycznie na rys. 6, służy do obserwacji struktur przepływu w rurach pionowych przy współprądowym, wznoszącym i opadającym, przepływie faz. Doprowadzane do instalacji na rys. 6 strumienie wody i powietrza są mieszane ze sobą w komorze (3), a następnie trafiają do układu szklanych pionowych rur o średnicy wewnętrznej 25 mm, połączonych ze sobą również szklanymi łukami. Wartość strumieni obu faz jest regulowana zaworami (1), a mierzona rotametrami (2) wyskalowanymi bezpośrednio w jednostkach strumienia objętościowego danego płynu. W trakcie przepływu mieszaniny przez instalację obserwowane są i identyfikowane tworzące się struktury dwufazowe. Ich postać zależy m.in. od strumieni obu płynów oraz kierunku przepływu mieszaniny. Po przejściu przez instalację mieszanina kierowana jest do kanalizacji.

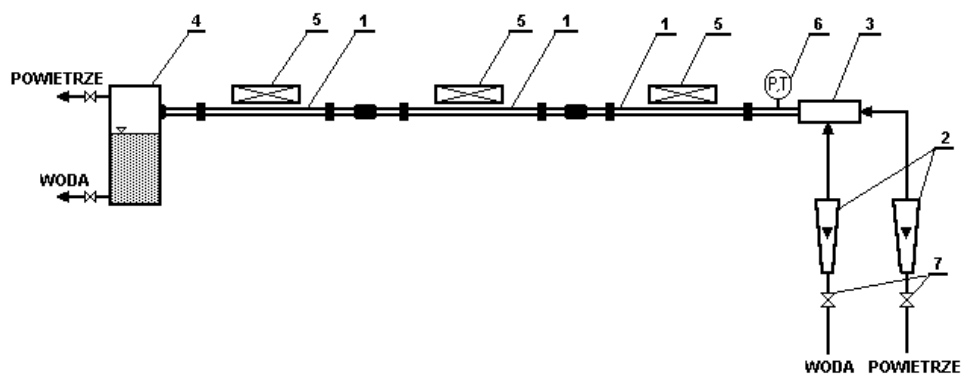
Druga część stanowiska to układ poziomych szklanych rur o średnicy 12, 16 i 22 mm połączonych ze sobą szeregowo, (rys. 7). Mieszanina dwufazowa, wytwarzana w komorze (3) przepływa przez układ trzech poziomych szklanych



Rys. 6. Schemat stanowiska do identyfikacji struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurach pionowych

1 - zawory regulacyjne; 2 - rotametry; 3 - komora mieszana; 4 - układ szklanych rur o średnicy wewnętrznej ϕ 25 mm

rur w kierunku od rury o najmniejszej średnicy do największej, co zapobiega gromadzeniu się wody wewnątrz układu. Strumienie obu faz są regulowane zaworami (7), a mierzone rotametrami (2). Rotametry te wyskalowano w jednostkach strumieni objętościowych poszczególnych płynów. Obserwacja tworzących się struktur przepływu prowadzona jest na podświetlanych odcinkach rur (5).



Rys. 7. Schemat stanowiska do identyfikacji struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurach poziomych

1 - rury szklane o średnicy kolejno 12, 16 i 22 mm, 2 - rotametry, 3 - komora mieszana, 4 - separator, 5 - układy podświetlające, 6 - pomiar ciśnienia i temperatury, 7 - zawory regulacyjne

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia identyfikacji struktur przepływu mieszaniny dwufazowej woda-powietrze w rurach pionowych, przy wykorzystaniu stanowiska badawczego przedstawionego na rys. 6, należy:

- otworzyć zawory odcinające na przewodach łączących instalację doświadczalną z siecią wodociągową i sprężonego powietrza;
- sprawdzić czy przewód odpływowy z instalacji jest przyłączony do sieci kanalizacyjnej;
- zmieniając zaworami (1) nastawy strumieni obu płynów, (z odpowiednio przyjętym krokiem), obserwować i identyfikować tworzące się w rurach struktury przepływu;
- wyniki obserwacji notować w tabeli.
- po wykonaniu pomiarów zamknąć zawory odcinające wody i sprężonego powietrza.

Struktury przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurach pionowych			
Rodzaj cieczy: woda			
Rodzaj gazu: powietrze			
Średnica rury: 25 mm.			
Strumień wody	Strumień powietrza	Zaobserwowana struktura przepływu	
m ³ /h	m ³ /h	przepływ wznoszący	przepływ opadający

W celu przeprowadzenia identyfikacji struktur przepływu mieszaniny dwufazowej woda-powietrze w rurach poziomych, przy wykorzystaniu stanowiska badawczego przedstawionego na rys. 7, należy:

- otworzyć zawory odcinające na przewodach łączących instalację doświadczalną z siecią wodociągową i sprężonego powietrza;
- sprawdzić czy przewód odpływowy z separatora jest przyłączony do sieci kanalizacyjnej;
- wyłącznikiem elektrycznym umieszczonym obok rotametrów włączyć układy podświetlania rur;
- zmieniając zaworami (7) nastawy strumieni obu płynów, (z odpowiednio przyjętym krokiem), obserwować i identyfikować tworzące się w rurach struktury przepływu;
- wyniki obserwacji notować w tabeli;

Struktury przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurach poziomych			
Rodzaj cieczy: woda			
Rodzaj gazu: powietrze			
Strumień wody	Strumień powietrza	Średnica rury	Zaobserwowana struktura przepływu
m ³ /h	m ³ /h	mm	
		12	
		16	
		22	
		12	
		16	

- f) po wykonaniu pomiarów wyłączyć układy podświetlające i zamknąć zawory odcinające wody i sprężonego powietrza.

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Porównać rodzaj struktury gaz-ciecz występującej podczas przepływu wznoszącego i opadającego. Porównanie to przeprowadzić dla kolejnych punktów pomiarowych odpowiadających stałym strumieniom mieszaniny dwufazowej w rurach instalacji. Opisać różnice w zachowaniu się faz.
2. W odniesieniu do przepływu wznoszącego w rurze pionowej i przepływu w rurze poziomej, zaznaczyć na odpowiednich mapach przepływu punkty odpowiadające zaobserwowanym w trakcie pomiarów strukturom.
3. Porównać, na podstawie uzyskanych w pkt. 2 rysunków, zgodność występowania zaobserwowanych kolejno struktur z obszarami ich występowania na mapach przepływu.
4. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L.: Aparaty z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy, Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, Seria: Studia i Monografie, z. 14, Opole 1989
- [2] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1992
- [3] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996

7. TEMATYKA ZAGADNIENÍ KONTROLNYCH

1. Systematyka struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz występujących w rurach pionowych.
2. Systematyka struktur przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz występujących w rurach poziomych.
3. Mapy przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz.
4. Wpływ rodzaju struktury na zjawiska ciepłno-przepływowe zachodzące podczas przepływu mieszaniny gaz-ciecz przez rurociąg.
5. Przykłady praktycznego występowania przepływów wielofazowych w aparaturze procesowej.