

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY

**WARUNKI PRACY APARATU ZE WZNOŚCĄCYM
I OPADAJĄCYM PRZEPŁYWEM DWUFAZOWYM
GAZ - CIECZ**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Autor: mgr inż. Alina Kuchczyńska
Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Ulbrich

OPOLE 2010

*Składam serdeczne podziękowania
mojemu promotorowi
prof. dr hab. inż. Romanowi Ulbrichowi
za pomoc oraz cenne wskazówki
udzielane podczas realizacji niniejszej pracy*

Spis treści:

Wykaz oznaczeń	4
1. Wprowadzenie	6
2. Charakterystyka przepływu dwufazowego	8
2.1. Struktury przepływu dwufazowego w przewodach pionowych	8
2.1.1. Struktury przepływu dwufazowego wznoszącego	8
2.1.2. Struktury przepływu dwufazowego opadającego	9
2.2. Mapy przepływu	11
2.3. Podsumowanie	16
3. Studia literaturowe z zakresu badań przepływu mieszaniny dwufazowej gaz - ciecz	18
3.1. Przepływ dwufazowy w aparatach przemysłowych	18
3.2. Badania eksperymentalne nad przepływem dwufazowym gaz – ciecz	21
3.3. Dystrybutory fazy gazowej	24
3.4. Geometria przewodów pomiarowych	25
4. Analiza sygnałów i obrazów	28
4.1. Klasyfikacja sygnałów fizycznych	28
4.2. Cyfrowe przetwarzanie obrazu – DIP	30
4.2.1. Etapy cyfrowego przetwarzania obrazu	31
5. Metody eksperymentalne analizy przepływu dwufazowego gaz – ciecz	33
5.1. Obserwacja wizualna	33
5.2. Metody stochastyczne wykorzystywane w celu identyfikacji struktur przepływu mieszaniny dwufazowej	34
5.2.1. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa	34
5.2.2. Funkcja autokorelacji (korelacji własnej)	37
5.2.3. Funkcja interkorelacji (korelacji wzajemnej)	37
6. Cel i zakres pracy	40
7. Stanowisko pomiarowe	41
7.1. Rodzaje dystrybucji fazy gazowej	44
7.2. Wizualizacja przepływu dwufazowego	46
7.3. Charakterystyka urządzeń wykorzystanych podczas badań własnych	47
7.4. Analiza błędów pomiarowych	49
8. Koncepcja i metodyka badań	50
8.1. Histogram wyrównania	51
8.2. Test stacjonarności	54
8.3. Dobór odpowiedniego obszaru badawczego	57
8.4. Analiza obrazu	60
8.4.1. Fluktuacje poziomu szarości	61
9. Wyniki badań	62
9.1. Jednorodność przepływu mieszaniny dwufazowej w aparacie węzownicowym	62
9.2. Identyfikacja struktur przepływu za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa	72
9.3. Ocena wpływu układu dystrybucji na podstawie map przepływu	78
9.3. Porównanie wyników badań własnych z istniejącymi mapami	92
9.4. Ewolucja prędkości fazy gazowej w aparacie węzownicowym	106
9.5. Wyznaczanie prędkości oraz udziału objętościowego fazy gazowej według modelu poślizgu faz	125
9.5.1. Wyznaczanie udziału objętościowego gazu	134
10. Podsumowanie i wnioski końcowe	141
11. Lista skrótów	142
12. Literatura	143

Wykaz oznaczeń

C_0	- współczynnik rozkładu
d_h	- średnica hydrauliczna kanału, m
D	- średnica, m
f	- częstotliwość, Hz
f_s	- częstotliwość próbkowania, Hz
g	- przyspieszenie ziemskie, m/s^2
H	- wysokość, m
k	- stosunek boków kanału prostokątnego
L	- długość, m
N	- liczba elementów zbioru
m	- indeks sumy
$p(x)$	- gęstość prawdopodobieństwa PDF
$P(x)$	- dystrybuanta
Pe	- liczba Pecleta
Pr	- prawdopodobieństwo
$R_x(\tau)$	- funkcja autokorelacji ACF
$R_{xy}(\tau)$	- funkcja interkorelacji CCF
s	- grubość, m
S	- współczynnik poślizgu faz
S_b	- długość boku prostokąta, m
t	- czas przepływu, s
T	- przedział czasu obserwacji, s
T_p	- przedział czasu, w którym zachodzi pełne drganie, s
T_x	- suma przedziałów czasu, s
w	- prędkość, m/s
W_b	- szerokość boku prostokąta, m
X	- amplituda
α	- udział objętościowy
ε	- stopień zatrzymania gazu
η	- dynamiczny współczynnik lepkości, $Pa \cdot s$
θ	- kąt fazowy
κ	- stała dielektryczna
μ	- wartość średnia
ρ	- gęstość, kg/m^3
σ	- napięcie powierzchniowe, N/m
τ	- opóźnienie czasowe, s
ν	- kinematyczny współczynnik lepkości, $Pa \cdot s$
ω	- poprawka uwzględniająca odstępstwa przepływu w kanale prostokątnym od przepływu w rurze
Ψ^2	- wartość średniokwadratowa

Indeksy

G	- odnosi się do fazy gazowej
L	- odnosi się do fazy ciekłej
obl	- odnosi się do wyniku obliczonego
op	- odnosi się do przepływu opadającego
śr	- odnosi się do wartości średniej
T	- odnosi się do sumarycznego przepływu obu faz
wz	- odnosi się do przepływu wznoszącego
zm	- odnosi się do wyniku zmierzonego
∞	- odnosi się do przepływu korka w nieruchomej warstwy cieczy

1. Wprowadzenie

W dobie dynamicznego rozwoju technologicznego poszukiwane są innowacyjne rozwiązania dotyczące budowy i konstrukcji maszyn mające na celu zwiększenie efektywności oraz obniżenie awaryjności pracy urządzeń. Rozwój cywilizacyjny nieodzwrotnie związany jest z postępem technicznym. Naukowcy zatem zostali postawieni przed zadaniem odnajdywania najlepszych rozwiązań aby te potrzeby zaspokoić. Rozwiązania te powinny charakteryzować się zarówno optymalną konstrukcją, możliwie niską ceną oraz mieć na uwadze dobro środowiska.

Przepływy wielofazowe są spotykane w wielu gałęziach przemysłu gdzie do poprawnej pracy aparatu niezbędny jest określony charakter przepływu mieszaniny. Problematyka przepływów wielofazowych jest przedmiotem zainteresowania przede wszystkim budowy maszyn, ponieważ ma podstawowe znaczenie przy opisie procesów wymiany pędu, ciepła i masy w wielu ważnych urządzeniach takich jak wymienniki ciepła i masy, reaktory i bioreaktory, kolumny destylacyjne, rektyfikacyjne, absorpcyjne, barbotażowe czy też typu air-lift [21].

Ogólnie rzecz ujmując przepływy wielofazowe występują w przemyśle energetycznym, celulozowym, chemicznym, petrochemicznym, farmaceutycznym, rolnym, spożywczym i w inżynierii środowiska.

Powszechne zastosowanie zagadnień dotyczących przepływów wielofazowych w przemyśle skłania do poznawania zachodzących zjawisk w celu modelowania i poprawy efektywności procesów technologicznych. Obecnie zagadnienie przepływów wielofazowych stanowi ważny nurt badań w mechanice płynów.

W wielu procesach technologicznych szczególnie istotną rolę odgrywają przepływy dwufazowe gaz – ciecz, wiąże się to szczególnie z wykorzystaniem tego typu przepływu w urządzeniach energetycznych. Mają one zastosowanie np. w rurowych generatorach pary energetycznej, parowo – wodnych układach chłodzenia reaktorów jądrowych, wymiennikach ciepła lub parownikach urządzeń chłodniczych. Oprócz obszaru związanego z energetyką przepływy dwufazowe występują również w transporcie hydraulicznym i pneumatycznym, rurociągach łączących poszczególne elementy instalacji oraz urządzeniach do napowietrzania wody i ścieków.

Szczególnie ważnym zagadnieniem dotyczącym przepływu dwufazowego jest rodzaj występującej struktury przepływu, która jest uzależniona od: strumieni doprowadzanych faz,

ich właściwości fizykochemicznych, kierunku przepływu, rodzaju dystrybutora faz oraz kąta pochylenia przewodu [20] .

Wytworzenie odpowiedniej struktury przepływu jest konieczne do poprawnej pracy aparatu np. struktury pierścieniowej w cienkowiarkowych aparatach wyparnych, struktury dyspersyjnej w kolumnach dyspersyjnych struktury pęcherzykowej w kolumnach barbotażowych lub korkowej w reaktorach pulsacyjnych.

W dotychczasowych opracowaniach istnieje znikoma ilość informacji na temat równoczesnego wznoszącego i opadającego przepływu mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz gdyż problematykę tę analizowano rozdzielnie w zależności od kierunku przepływu mieszaniny. Fakt ten skłania zatem do podejmowania w tym zakresie badań zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych w celu poznania zjawisk zachodzących w aparatach wężownicowych. Zastosowane metody badawcze powinny charakteryzować się wysoką dokładnością, krótkim czasem wykonania, niezawodnością oraz szczególnie, możliwie najniższą inwazyjnością.

W niniejszej pracy podjęto próbę opisu zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w aparacie z równoczesnym, wznoszącym i opadającym przepływem mieszaniny dwufazowej z uwzględnieniem wpływu geometrii układu zasilania fazą gazową oraz potwierdzono celowość prowadzenia badań w tym zakresie. Potwierdzono również wysoką przydatność stosowania technik analizy obrazu.

2. Charakterystyka przepływu dwufazowego

Przepływ dwufazowy jest to wspólny przepływ dwóch faz. Wyróżnia się fazę ciągłą i fazę rozproszoną. Fazą ciągłą jest płyn tj. ciecz lub gaz, a fazą rozproszoną substancja o dowolnym stanie skupienia. Faza oznacza jednorodną pod względem fizycznym część układu, oddzieloną od pozostałej jego części granicą faz. Podczas przechodzenia przez tę granicę następuje skokowa zmiana składu chemicznego lub stanu termodynamicznego. Np. stan chemiczny zmienia się przy przejściu od wnętrza kropli wody do powietrza, zaś stan termodynamiczny- przy przejściu z kropli wody do pary wodnej. Istotną rolę spełnia granica rozdziału faz. W związku z tym układ dwóch cieczy mieszających się jest układem jednofazowym zaś układ utworzony z połączenia dwóch cieczy nie mieszających się – układem dwufazowym [58].

Przepływy dwufazowe charakteryzują się tym, że granica rozdziału faz formuje się i zmienia w czasie ruchu, co stanowi o niezwykłej złożoności tego problemu. Przepływy dwufazowe w odróżnieniu od przepływów jednofazowych doznają nie tylko oddziaływań zewnętrznych ze strony ścian kanału lub ciał opływanych, lecz również oddziaływań wewnętrznych ze strony granic międzyfazowych. Te ostatnie oddziaływania są zmienne tak pod względem miejsca jak i czasu. Wywołują one zmianę pól prędkości, ciśnień i temperatur, przy czym zmiany te mają na granicy faz charakter skokowy. Dalszą specyfiką przepływów dwufazowych jest to, że chociaż poszczególne składniki są nieściśliwe to jednak cała mieszanina może mieć charakter ściśliwy. Dzieje się tak wtedy, kiedy w kierunku ruchu zmienia się prędkość faz a więc i gęstość mieszaniny [59].

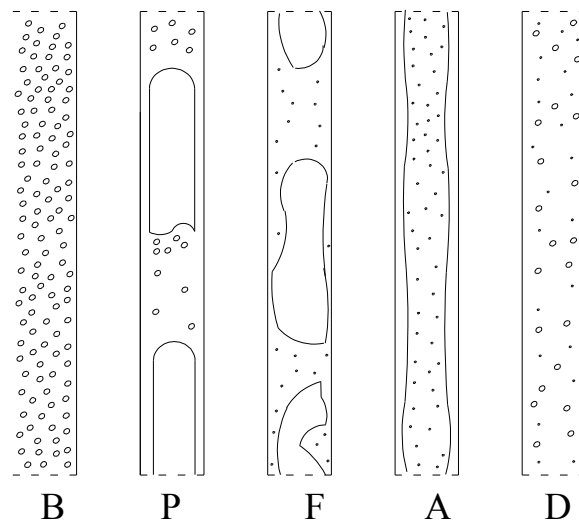
2.1. Struktury przepływu dwufazowego w przewodach pionowych

2.1.1. Struktury przepływu dwufazowego wznoszącego

Istnieje cały szereg klasyfikacji struktur przepływu. Poniżej przedstawiono najczęściej cytowaną w literaturze klasyfikację struktur współprądowego, dla wznoszącego przepływu mieszaniny dwufazowej gaz - ciecz w rurze pionowej (rys. 2.1). Klasyfikacja ta została zaproponowana przez Nicklina i Davidsona [54]:

- Przepływ pęcherzykowy (ang. bubble flow) – w przepływającej ku górze cieczy rozproszone są małe pęcherzyki gazu płynące z prędkością podobną do prędkości cieczy.

- Przepływ korkowy (ang. plug flow) – w przepływającej mieszaninie dwufazowej występuje na przemian przepływ porcji gazu i cieczy, przy czym porcje gazu zajmują prawie cały przekrój poprzeczny przewodu.
- Przepływ pianowy (ang. foam / churn flow) – pekające i łączące się pecherze gazowe przy oscylacyjnym i stochastycznym przepływie porcji cieczy wytwarzają mieszaninę o cechach piany. Dochodzi do wzajemnego chaotycznego przemieszczania się obu faz.
- Przepływ pierścieniowy (ang. annular flow) – ciecz przepływa w postaci cienkiej warstewki na ścianie przewodu, a gaz ze znaczną prędkością środkiem przewodu. Powierzchnia warstewki cieczy może być gładka lub zafalowana.
- Przepływ mgłowy (ang. mist flow) – ciecz w postaci małych kropeł przepływa w dużej ilości przepływającego gazu [21],[54], [95].

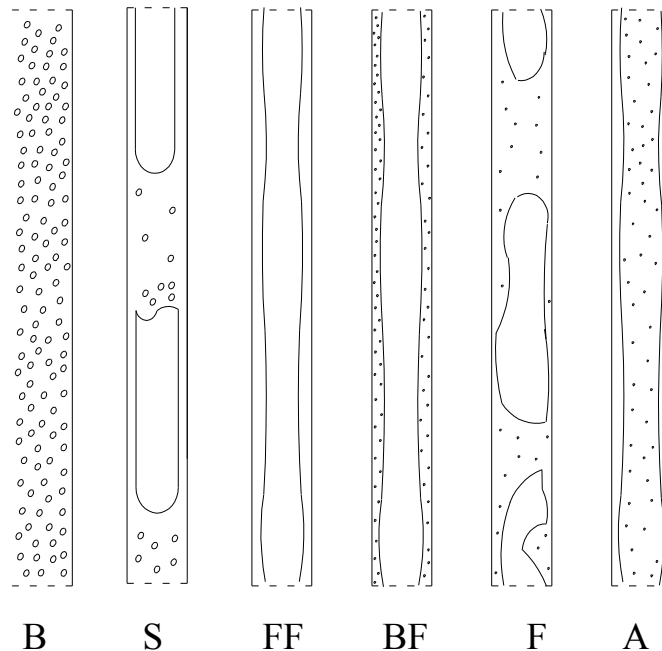


Rys. 2.1. Klasyfikacja struktur dla wznoszącego przepływu mieszaniny gaz-ciecz w kanale pionowym wg.: [54], struktura: pęcherzykowa (B), korkowa (P), pianowa (F), pierścieniowa (A), dyspersyjna (D)

2.1.2. Struktury przepływu dwufazowego opadającego

W przypadku przepływu opadającego w rurze pionowej jest znacznie mniej prac i brak zgodności co do klasyfikacji struktur przepływu. Podane poniżej struktury (rys. 2.2) zostały zaobserwowane przez Oshinowo i Charlsa [60] i ta praca zwykle stanowi punkt odniesienia:

- Przepływ pęcherzykowy.
- Przepływ rzutowy (z ang. slug flow).
- Spływający film (z ang. falling film flow) – ciecz cienką strugą spływa grawitacyjnie po ściankach kolumny.
- Przepływ pęcherzykowo filmowy (z ang. bubble – film flow) – w warstewce cieczy spływającej po ścianie kolumny występują drobne pęcherzyki gazu.
- Przepływ pianowy.
- Przepływ pierścieniowy.



Rys. 2.2. Klasyfikacja struktur dla opadającego przepływu mieszaniny gaz-ciecz w kanale pionowym wg.: [60], struktura: pęcherzykowa (B), rzutowa (S), spływający film (FF), pęcherzykowo – filmowa (BF), pianowa (F), pierścieniowa (A).

Zagadnienie przepływu dwufazowego jest bardzo złożone z tego też względu określenie struktur przepływu najczęściej odbywa się za pomocą map przepływu. Większość map sporządza się w oparciu o badania eksperymentalne jednak występują opracowania, i te należy uznać za najbardziej godne polecenia, w których mapy wyznaczone są za pomocą modeli teoretycznych przepływu dwufazowego. W kolejnym rozdziale szczegółowo opisano mapy przepływu wykorzystane w niniejszej pracy do weryfikacji badań własnych.

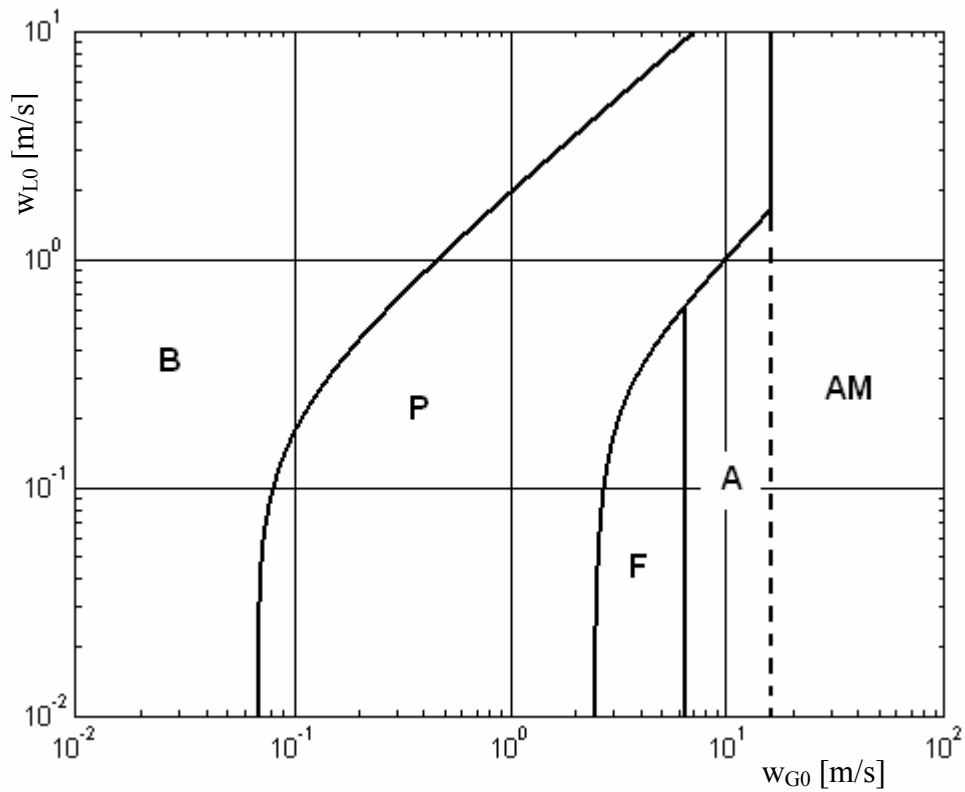
2.2. Mapy przepływu

Poprawna praca wielu aparatów przemysłowych wymaga przepływu konkretnej struktury przepływu. Z tego też względu już od początku lat 50-tych XX wieku badacze podejmowali próby opisu występowania konkretnych struktur dla danego pola prędkości. Wykresy przepływu dwufazowego zwane są mapami przepływu i stanowią obszary ograniczone liniami bądź pasmami granicznymi [25], [95]. Na osiach rzędnych i odciętych zazwyczaj umieszczone są prędkości lub strumienie masowe faz lub ich właściwości fizyczne takie jak: lepkość, gęstość czy napięcie powierzchniowe [19], [34]. Linii rozdziału na mapach przepływu, uzyskanych z obliczeń, nie należy traktować ściśle jako granic przejścia pomiędzy jedną strukturą a drugą ponieważ często w tym obszarze tworzą się struktury przejściowe, które w swej charakterystyce wiążą właściwości obu rodzajów przepływu. Zatem analizując konkretną mapę należy rozpatrywać na niej pasma o określonej szerokości, na których istnieje wysokie prawdopodobieństwo występowania danej struktury. W literaturze można spotkać wiele map różniących się klasyfikacją struktur oraz właściwościami fizycznymi czynników (np. gaz – ciecz nienewtonowska) : [12], [47], [55], [58], [97].

Mapy przepływu wyznaczane są na dwa sposoby: pierwszy z nich opiera się na obserwacji wizualnej, natomiast drugi powstaje w wyniku zastosowania modelu teoretycznego poszczególnych struktur przepływu i określenia warunków przejścia z jednej struktury w drugą. Drugi sposób wyznaczania map przepływu stosowany był m.in. przez Quanta [63], Stommę [82], Taitela i Duklera [86] i innych [2], [3], [51].

Na potrzeby niniejszej pracy wybrano dwie mapy dla przepływu wznoszącego i jedną dla przepływu opadającego, które uznano za najbardziej reprezentatywne dla prowadzonych badań.

Pierwszą z nich była mapa prezentowana przez Mishima i Ishi [52] (rys. 2.3). Główne zastosowanie tej mapy odnosi się do pionowych kanałów szczelinowych.



Rys. 2.3. Mapa przepływu dwufazowego woda – powietrze zaprezentowana przez Mishima i Ishii [52] dla kanału prostokątnego o wymiarach 1x40mm, 0,1 MPa i 25°C

Odpowiednio dla linii granicznych:

B-P :

$$w_{LO} = 1,514 \cdot w_{GO} - 0,096 \quad [m/s] \quad (2 - 1)$$

P-F:

$$w_{LO} = 0,123 \cdot w_{GO} - 0,309 \quad [m/s] \quad (2 - 2)$$

F-A:

$$w_{LO} = \sqrt{\frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_h}{\rho_G}} (\alpha - 1) \quad [m/s]; \quad (2 - 3)$$

gdzie:

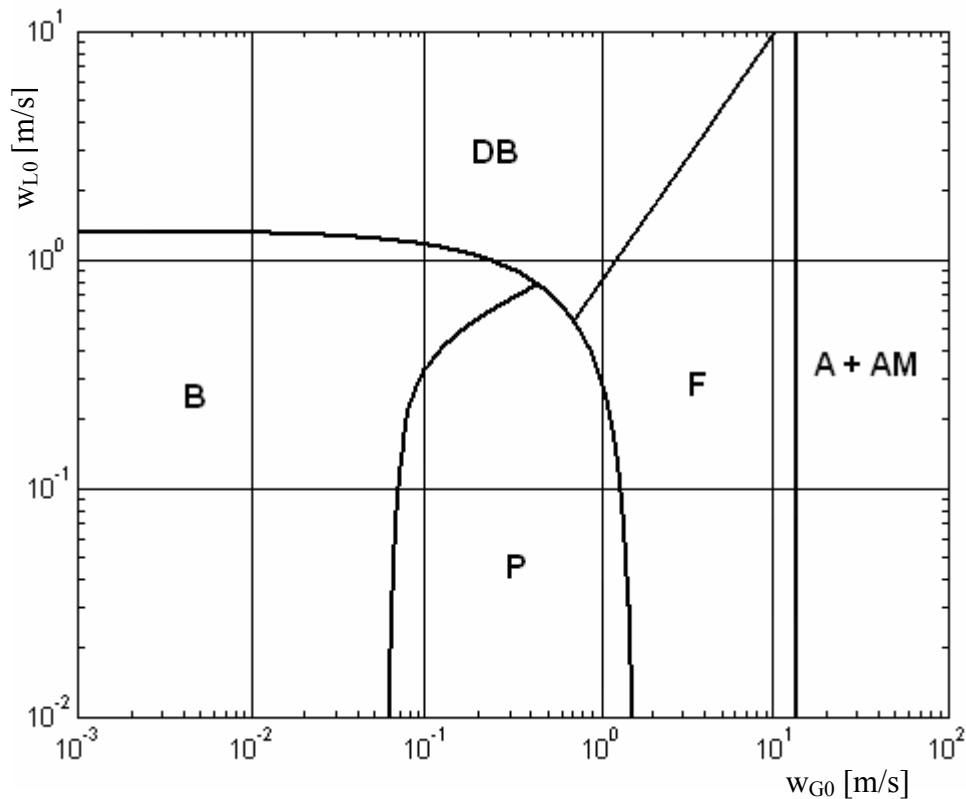
$$\alpha = 1 - 0,813 \left\{ \frac{(C_o - 1)w + \sqrt{\frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_h}{\rho_L}}}{w + 0,75 \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_h}{\rho_L}\right) \left(\frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_h^3}{\rho_L V_L^2}\right)^{1/18}}} \right\}^{0,75}; \quad (2 - 4)$$

$$C_0 = 1,35 - 0,35 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (2-5)$$

A-AM:

$$w_{GO} = \left(\frac{\sigma \cdot g \cdot \Delta \rho}{\rho_G^2} \right)^{0,25} \cdot N_{\eta_L}^{-0,2}, \quad N_{\eta_L} = \frac{\eta_L}{\left[\rho_L \cdot \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot \Delta \rho}} \right]^{0,5}} \quad (2-6)$$

Kolejną prezentowaną mapą była mapa wg. Taitel'a i innych [85]. Mapę tę głównie stosuje się dla przepływu w rurze pionowej (rys. 2.4). Autorzy mapy wprowadzili dodatkowe oznaczenia dla struktur przejściowych: DB (z ang. dispersed bubble) – przepływ pęcherzykowo-dyspersyjny oraz AM (z ang. annular mist) – przepływ pierścieniowo-mgłowy oraz oznaczenia poszczególnych linii granicznych.



Rys. 2.4. Mapa przepływu zaprezentowana przez Taitel'a i innych [85] przepływu dwufazowego woda - powietrze dla rury o średnicy 51 mm, 0,1 MPa i 25°C

Poniżej przedstawiono równania opisujące linie rozdziału pomiędzy poszczególnymi strukturami:

B - P:

$$w_{LO} = 3,0 \cdot w_{GO} - 1,15 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{0,25} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2 - 7)$$

P - F:

$$w_{LO} = \sqrt{gd_h} \left(\frac{L}{40,6d_h} - 0,22 \right) - w_{GO} \quad [m/s] \quad (2 - 8)$$

B - DB:

$$w_{LO} = 4,0 \left\{ \frac{d_h^{0,429} \left(\frac{\sigma}{\rho_L^2} \right)^{0,089}}{v_L^{0,072}} \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right]^{0,446} \right\} - w_{GO} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2 - 9)$$

DB - F:

$$w_{LO} = 0,923 \cdot w_{GO} \quad [m/s] \quad (2 - 10)$$

F - A+AM:

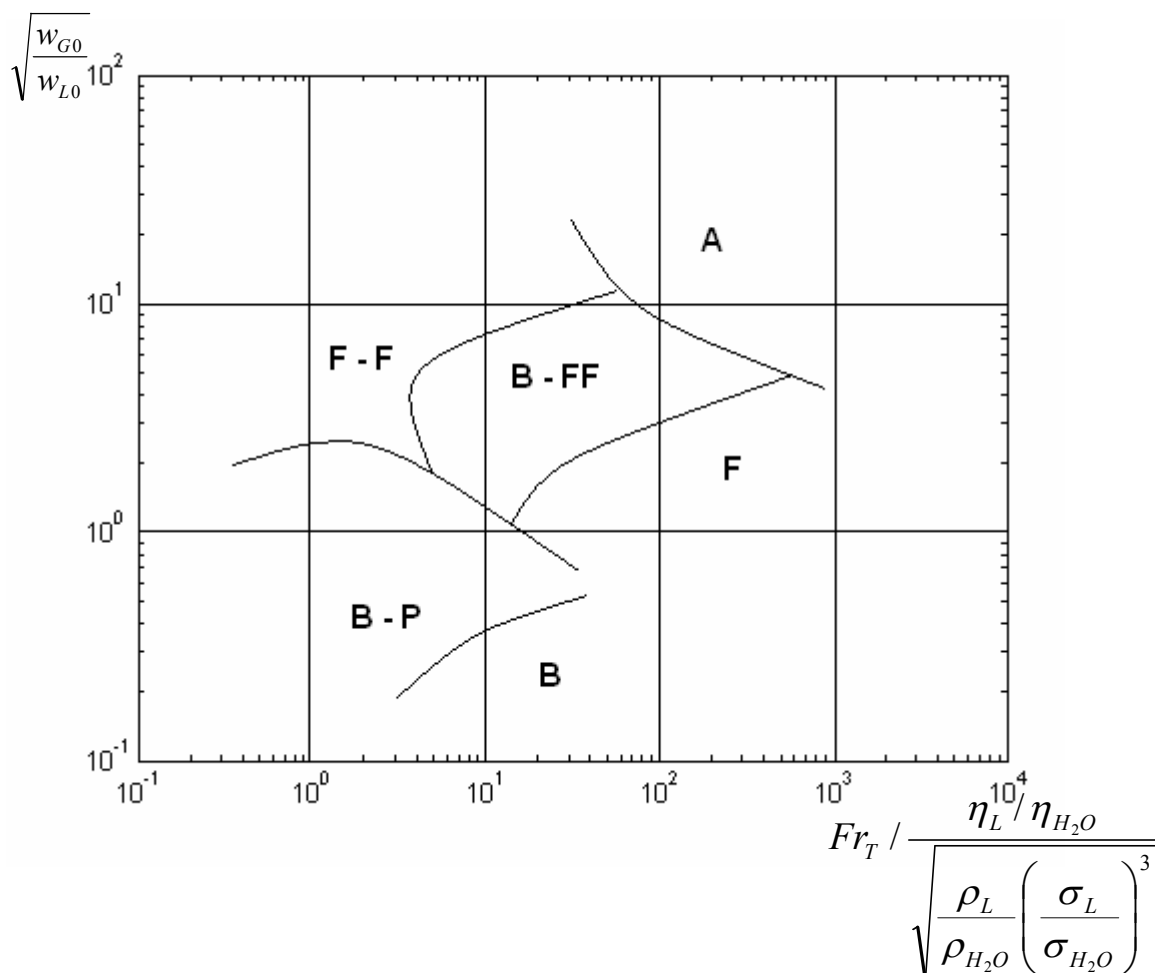
$$w_{GO} = \frac{3,1[g\sigma(\rho_L - \rho_G)]^{0,25}}{\rho_G^{0,5}} \quad [m/s] \quad (2 - 11)$$

W tabeli 2.1 przedstawiono wartości parametrów fizycznych gazu i cieczy przyjmowanych w powyższych równaniach dla opracowania map przedstawionych na rys. 2.3 i 2.4.

Tabela 2.1. Wartości parametrów fizycznych powietrza i wody ($t=20^{\circ}C$, $p=10^5 Pa$)

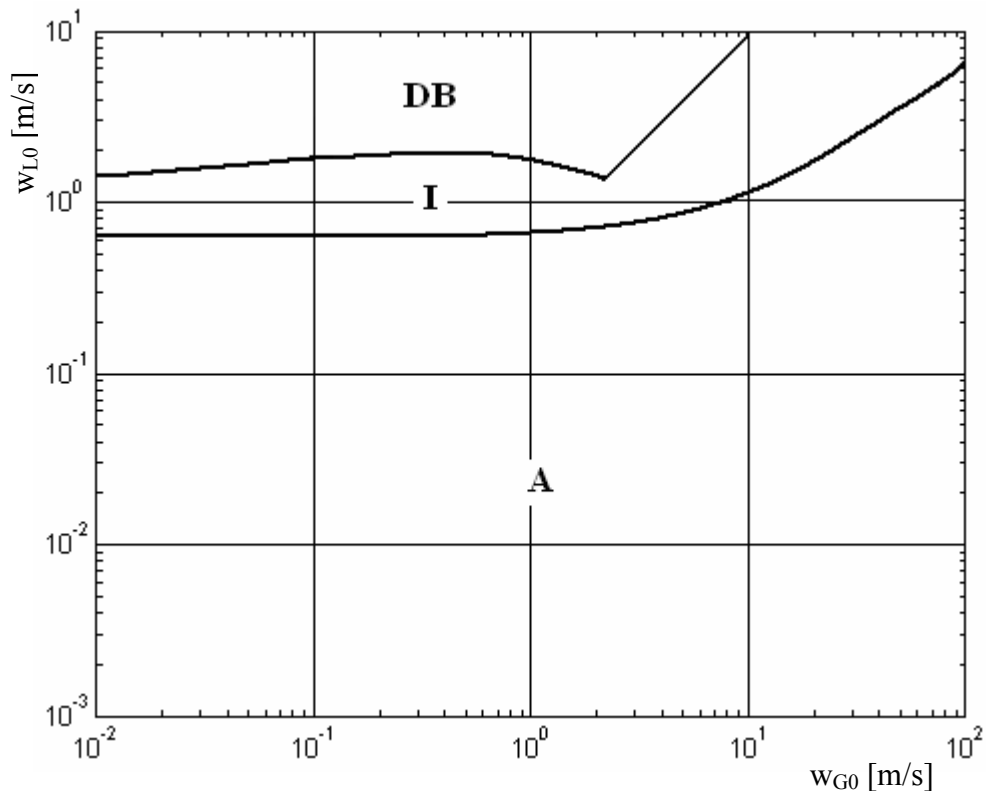
gęstość gazu	$\rho_G = 1,206 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
gęstość cieczy	$\rho_L = 998,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
lepkość powietrza	$\eta_p = 18,2 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$
lepkość cieczy	$\eta_l = 10 \cdot 10^{-4} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$
napięcie powierzchniowe	$\sigma = 0,073 \text{ [N/m]}$

W literaturze można spotkać wiele map dotyczących przepływu opadającego jednak większość z nich odnosi się do przepływu w rurze cieczy bardzo lepkiej z tego też względu dla celów poglądowych niniejszej pracy przedstawiono mapę Oshinowo – Charles [60], która dotyczy przepływu dwufazowego gaz- ciecz w rurze pionowej dla przepływu opadającego (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Mapa przepływu dwufazowego, opadającego gaz- ciecz wg.: Oshinowo - Charles [60]

Następną prezentowaną mapą przepływu dwufazowego jest mapa wg. Barnea [2], która dotyczy przepływu opadającego mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz w rurze pionowej o średnicy $d = 51$ mm (rys. 2.6). Prowadząc badania dla różnych usytuowań kanału, autor mapy posługuje się nieco inną klasyfikacją struktur aniżeli przedstawione w niniejszej pracy. Symbolem „I” oznacza przepływ intermitentny, który łączy przepływ rzutowy oraz wydłużonych pęcherzy.



Rys.2.6. Mapa przepływu dwufazowego, opadającego gaz – ciecz wg.: Barnea [2] dla przepływu dwufazowego woda - powietrze dla rury o średnicy 25,4 mm, 0,1 MPa i 25⁰C

Linie DB - I oraz I - A wyznacza się odpowiednio z równań (2-9), (2-10), (2-11). Te wspólne linie rozdziału na mapach przepływu wznoszącego (rys. 2.4) i opadającego (rys. 2.6) wynikają z faktu, iż oddzielają struktury pęcherzowe, korkowe (przejściowe) i pierścieniowe, które są wspólne dla obu rodzajów przepływu i niezależnie od kierunku występują w podobnych obszarach prędkości.

2.3. Podsumowanie

Określenie struktur na podstawie map przepływu jest zagadnieniem złożonym ponieważ istnieje ogromna liczba różnorodnych map a co za tym idzie problem wyboru spośród nich takiej, którą najlepiej można by zastosować do niniejszej pracy. Ponadto mapy są opracowane dla jednego kierunku przepływu stąd też problem w dopasowaniu mapy do zastosowań, w których występuje równoczesny wznoszący i opadający przepływ dwufazowy. Wyboru nie ułatwia również to, że autorzy map posługują się odmienną klasyfikacją i często wprowadzają bliżej niesprecyzowane struktury przejściowe.

Niewątpliwie najistotniejszym, z uwagi na wpływ struktury przepływu na zjawiska transportu ciepła i masy oraz stabilności procesu, jest praca aparatów dla tych samych struktur zarówno dla wznoszącego jak i opadającego przepływu mieszaniny dwufazowej.

Po przeprowadzeniu weryfikacji eksperymentalnej postanowiono wykorzystać do dalszej analizy:

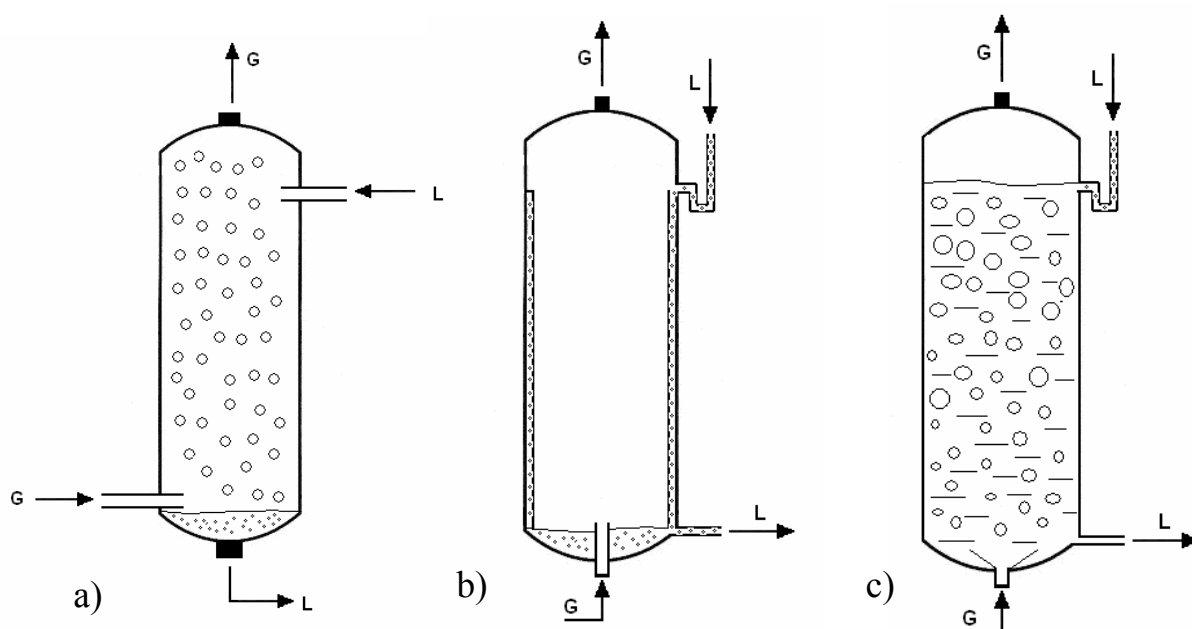
- mapy Mishima i Ishi [52] oraz Taitla i innych [85] dla weryfikacji przepływu wznoszącego,
- mapę Barnea [2] dla weryfikacji przepływu opadającego.

W kolejnym rozdziale przedstawiono urządzenia, które wykorzystują przepływ mieszaniny gaz – ciecz a efektywność ich pracy zależy od właściwie zdefiniowanej struktury przepływu.

3. Studia literaturowe z zakresu badań przepływu mieszaniny dwufazowej gaz - ciecz

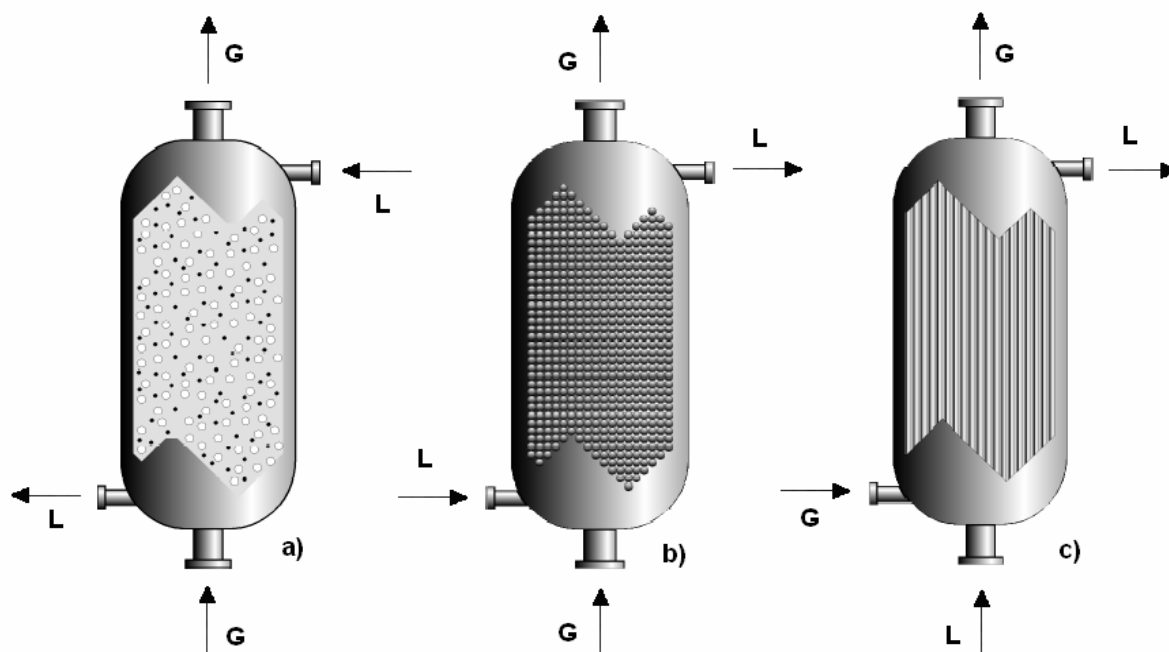
Poniżej przedstawiono przykładowe aparaty przemysłowe (rys. 3.1 – 3.4), w których realizowany jest przepływ dwufazowy a do prawidłowej pracy niezbędne jest wytworzenie odpowiedniej struktury, badania nad hydrodynamiką przepływu dwufazowego w oparciu o konkretne modele urządzeń oraz omówiono geometrię układów zasilania a także przewodów pomiarowych.

3.1. Przepływ dwufazowy w aparatach przemysłowych



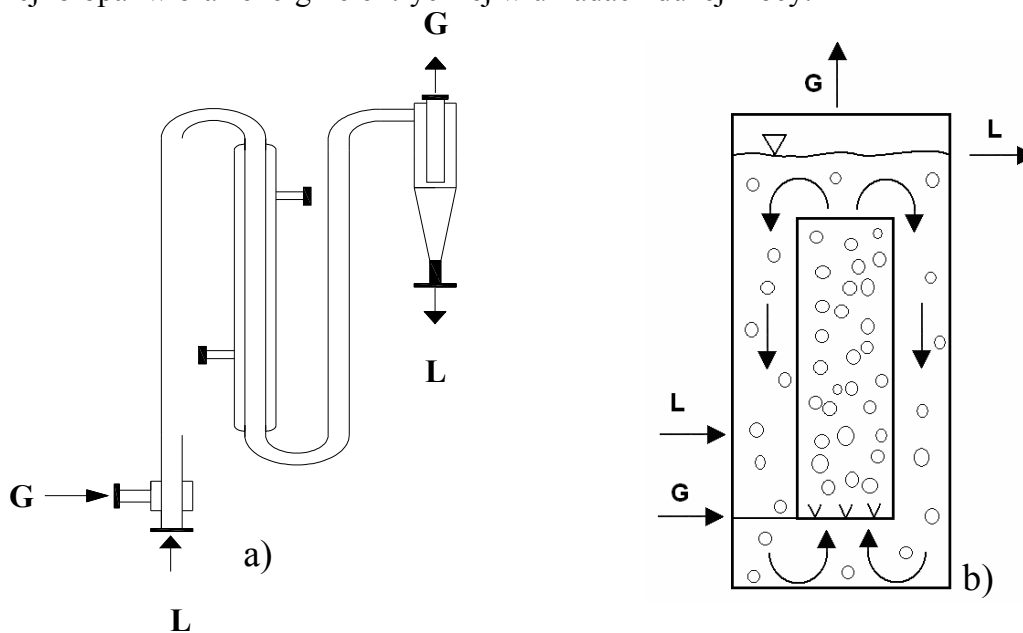
Rys. 3.1. Przykłady aparatów z dwufazowym przepływem gaz – ciecz: a) kolumna dyspersyjna, b) kolumna ze spływającym filmem, c) kolumna pęcherzykowa wg.: [9], [67], [78].

Powyższe urządzenia (rys. 3.1) są wykorzystywane w procesach technologicznych mających na celu kontaktowanie faz. Kolumny dyspersyjna i pęcherzykowa często używane są do prowadzenia procesów absorpcji. Przykładowo do uszlachetnienia biogazu, mokrego odsiarczania spalin czy też usuwania CO₂ z gazów spalinowych. Ogólnie rzecz ujmując kolumny wykorzystujące przepływ dwufazowy mają szerokie zastosowanie w ochronie środowiska ponieważ dzięki ich stosowaniu można ograniczać ładunki zanieczyszczeń oddawanych do atmosfery bądź podnosić wartość opałową biopaliw.



Rys. 3.2. Schematy urządzeń z dwufazowym przepływem gaz- ciecz wg.: [6]
 a) kolumna z zawiesiną pęcherzykową, b) reaktor ze stałym złożem,
 c) reaktor monolityczny.

Na powyższym rysunku (3.2) przedstawiono aparaty, które przepływ dwufazowy wykorzystują do procesów produkcji paliw. Reaktory ze stałym złożem najczęściej są stosowane do produkcji paliw silnikowych z węgla poprzez zgazowanie oraz w procesach zgazowania biomasy w układach małej mocy. Reaktory monolityczne wykorzystywane są do produkcji biopaliw oraz energii elektrycznej w układach dużej mocy.

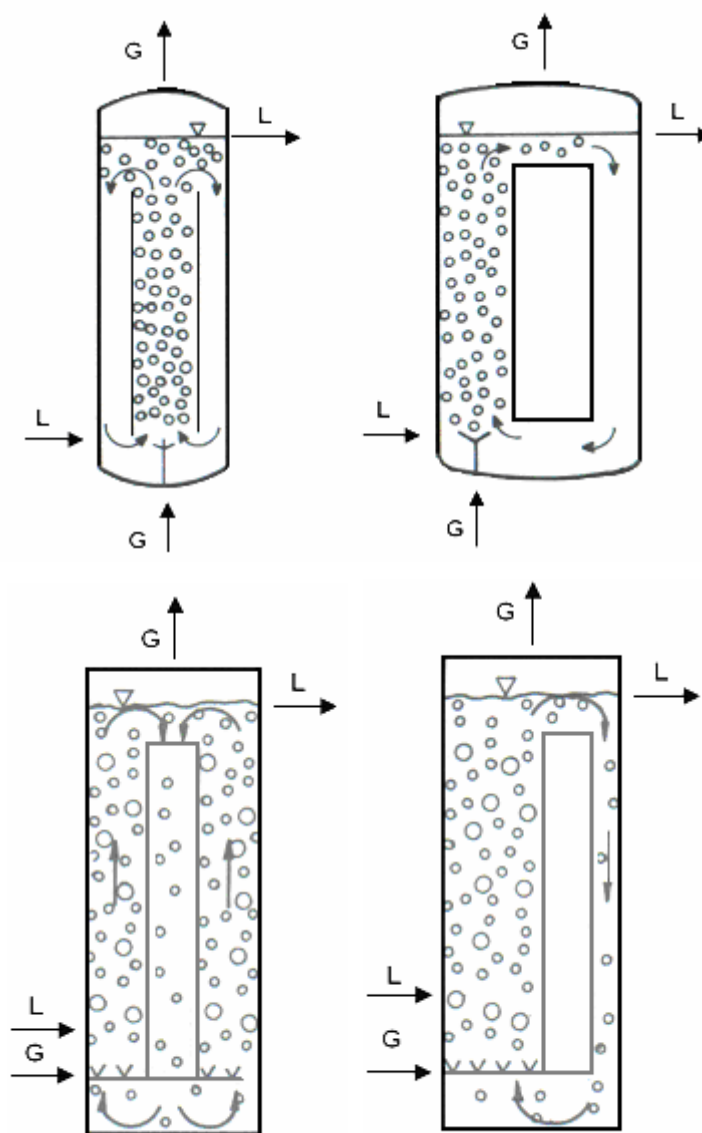


Rys. 3.3. a) Reaktor rurowy węzownicowy [78], b) aparat z rurą centralną [114]

Reaktory rurowe (rys. 3.3.a) charakteryzują się dużym stosunkiem powierzchni do objętości z tego też względu wykorzystywane są do prowadzenia reakcji kontaktowania, heterogenicznych w fazie gazowej i ciekłej w procesach zwykłych i katalizowanych. W reaktorach tych możliwe jest prowadzenie reakcji z dużą prędkością, dla wysokich wartości ciśnienia i temperatury ponieważ zapewniają dobre warunki wymiany ciepła.

Na podanych poniżej przykładach (rys. 3.4) występuje w aparacie równocześnie współprądowy, wznoszący i opadający przepływ mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz.

Aparaty z rurą centralną (rys. 3.3.b i rys. 3.4) stosowane są przeważnie jako aparaty kontaktowe w przemyśle chemicznym. Na przykład konwersji SO_2 do SO_3 w procesie produkcji kwasu siarkowego.



Rys. 3.4. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych aparatów z rurą centralną [114]

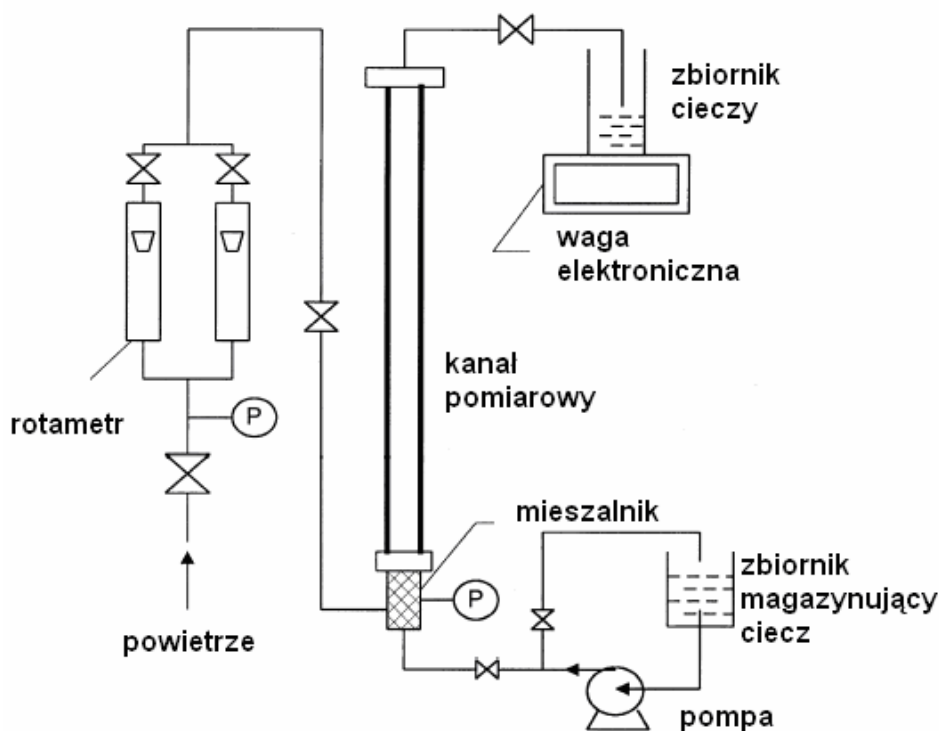
Podsumowując, wykorzystanie przepływu dwufazowego w aparatach przemysłowych ma na celu wymianę ciepła i masy oraz prowadzenie reakcji chemicznych. Tak szerokie zastosowanie przepływów dwufazowych powoduje, że niezwykle ważnym jest określenie warunków eksploatacyjnych tych urządzeń. Zagadnienie to jest przedmiotem ogromnej ilości prac badawczych zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych.

W kolejnym rozdziale przedstawiono wybrane badania eksperymentalne oraz rozważania konstrukcyjne dotyczące aparatów z dwufazowym przepływem mieszaniny gaz – ciecz.

3.2. Badania eksperymentalne nad przepływem dwufazowym gaz – ciecz

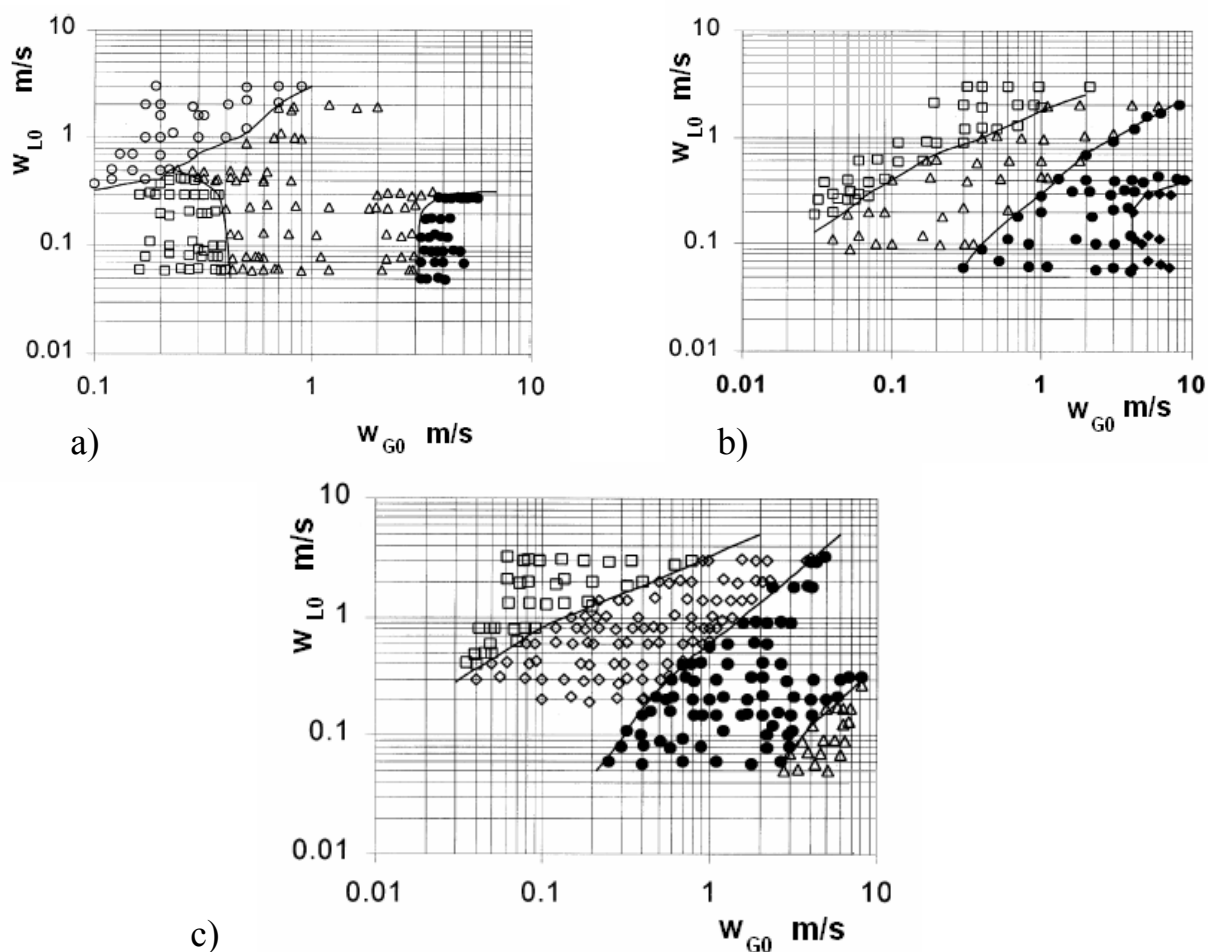
Poniżej przedstawiono wybrane metody badań nad hydrodynamiką mieszaniny dwufazowej oraz ich rezultaty. Ponieważ jednym z celów niniejszej pracy jest ocena wpływu układu dystrybucji fazy gazowej na tworzące się struktury przepływu, poniżej przedstawiono wyniki badań nad szczelinowym układem zasilania.

W pracy [109] badano zakresy występowania poszczególnych struktur przepływu w prostokątnym kanale pionowym ze szczelinowym układem zasilania (rys. 3.5) dla trzech wysokości szczeliny: 0,3; 0,6 i 1 mm.



Rys. 3.5. Schemat stanowiska pomiarowego wg.: Xu [109]

W rezultacie otrzymano trzy mapy przepływu dla każdego układu o zmiennej wysokości szczeliny.

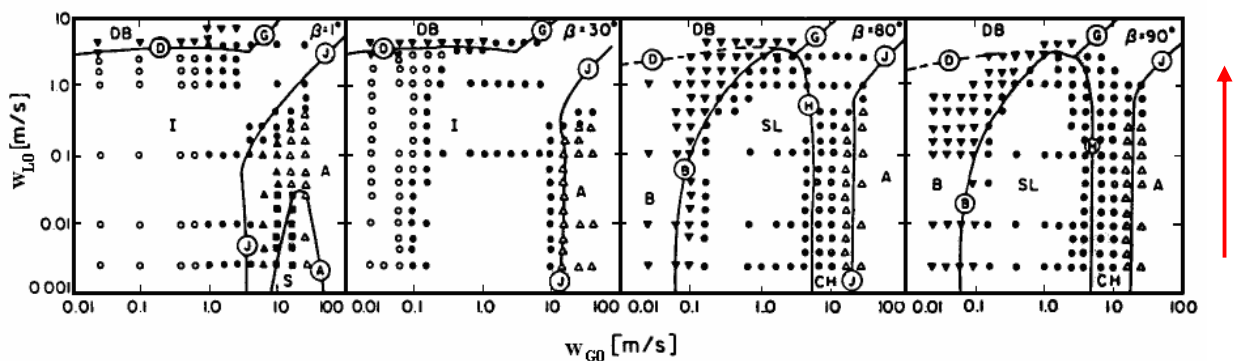


Rys. 3.6. Mapy przepływu dla prostokątnego kanału ze szczelinowym układem zasilania:
a) $s = 0,3\text{ mm}$; b) $s = 0,6\text{ mm}$; c) $s = 1\text{ mm}$. ○ - przepływ pęcherzykowo -dyspersyjny,
□ – przepływ pęcherzykowy, ◇- przepływ rzutowy Δ - przepływ pierścieniowy, ● - przepływ pianowy[109]

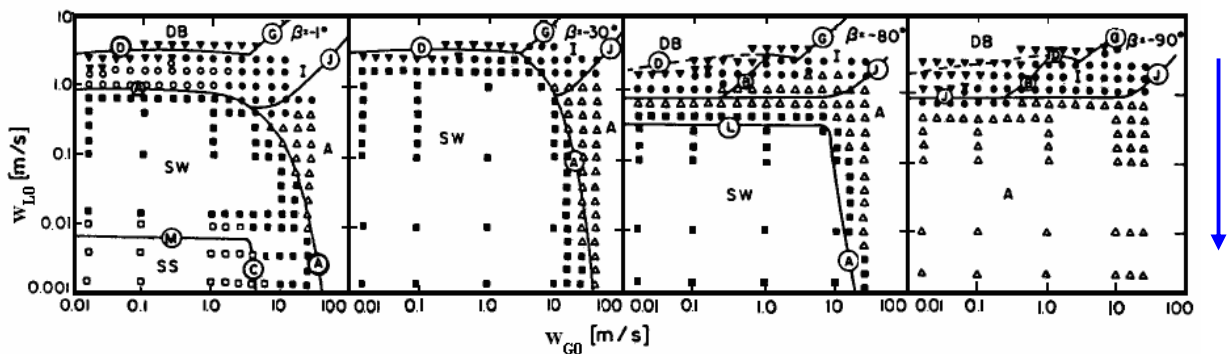
Zakresy występowania poszczególnych struktur były podobne dla szczelin o wysokości 1 i 0,6 mm (rys. 3.6.a, b) Wraz ze spadkiem wysokości szczeliny linie graniczne na mapach przepływu przesunęły się w kierunku niższych prędkości gazu. Przy szczelinie o wysokości 0,3 mm (rys. 3.6.c) uzyskano zupełnie odmienne wyniki badań niż dla pozostałych układów. Struktura pęcherzykowa nie została wcale zaobserwowana przy niskich prędkościach fazy gazowej.

Głównym nurtem niniejszej pracy jest ocena hydrodynamiki równoczesnego, wznoszącego i opadającego przepływu mieszaniny dwufazowej z tego też względu poniżej przedstawiono próbę opisu wznoszącego i opadającego przepływu przez Barneę [2]. Badacz

proceeding the research for both directions of flow in a vertical pipe. Additionally, he studied the influence of the inclination of the channels, both vertical and horizontal, in the range from 1° to 90° , on the hydrodynamics of two-phase gas-liquid flow. The author's research results are based on his earlier experiments, which he conducted together with Taitle and also on the works of Mishima and Ishi [52] and McQuillan and Whalley [51]. As a result, flow maps for two-phase upward flow (fig. 3.7) and downward flow (fig. 3.8) for different inclination angles of the measuring pipes were obtained. The authors do not treat the maps below (figs. 3.7 – 3.9) as strictly hydrodynamic flow maps, but as theoretical models, on which they mark the transition boundaries (lines A, B, C, D, G, J, M) between structures described by specific equations (quoted in chapter 2.2.; eqns.: 2-5 ; 2-12).



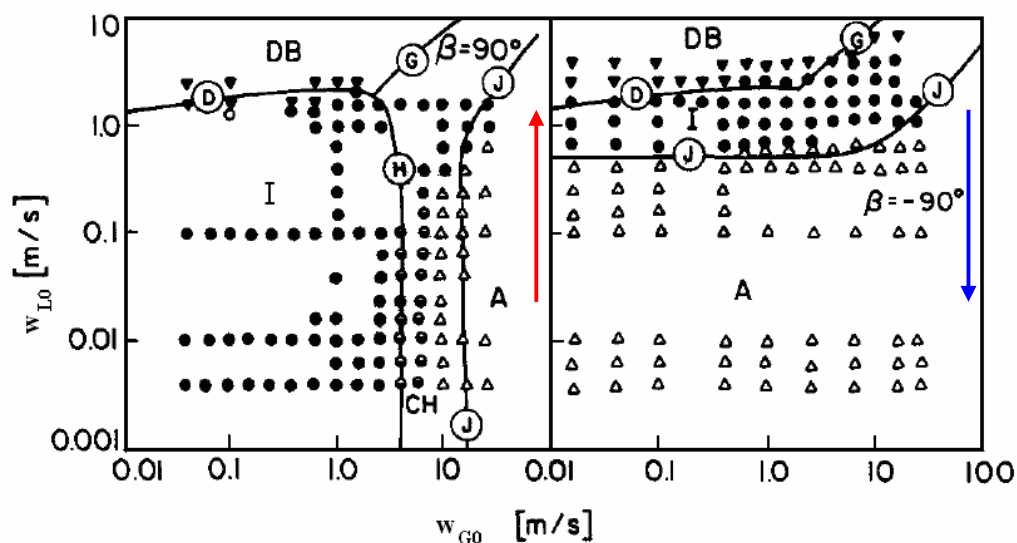
Rys. 3.7. Mapy przepływu wznoszącego dla całego zakresu kąta nachylenia rury o średnicy 51mm wg.: Barnea [2].



Rys. 3.8. Mapy przepływu opadającego dla całego zakresu kąta nachylenia rury o średnicy 51mm wg.: Barnea [2]

On the above maps, the authors used the following classification of structures: A – annular, AW – annular wavy, B – bubbly, CH – churn, DB – bubbly dispersive, EB – elongated bubbles, I – intermittent (chords + elongated bubbles), S – stratified, SL – slug, SS – stratified smooth, SW – stratified wavy.

Kolejnym krokiem badaczy było wyznaczenie map przepływu w pionowej rurze o średnicy 25,4 mm.



Rys. 3.9. Mapy przepływu wznoszącego i opadającego dla kąta nachylenia $\pm 90^\circ$ rury o średnicy 25,4 mm wg.: Barnea [2]

3.3. Dystrybutory fazy gazowej.

Rodzaj dystrybutora fazy gazowej zdaniem wielu badaczy ma istotny wpływ na hydrodynamikę przepływu a co za tym idzie na pracę aparatu. Podczas dozowania jednakowych strumieni czynników dla różnych układów dystrybucji linie rozdziału na mapie przepływu ulegają przemieszczeniom. Bywają również takie przypadki, że dana struktura może wcale nie wystąpić podczas stosowania danego dystrybutora, gdzie przy użyciu innego, zajmuje znaczący obszar.

Najczęściej stosowane rozwiązania konstrukcyjne dystrybutorów stanowią układy wielootworkowe. Średnica otworów zazwyczaj dobierana jest w oparciu o strumień objętościowy fazy gazowej tak aby nie występowały zbyt duże lokalne opory przepływu. W kanałach okrągłych otwory rozmieszczane są na obwodzie natomiast w prostokątnych są wykonywane przelotowo na przeciwległych dłuższych ścianach [44], [71].

Drugim z kolei rozwiązaniem są dystrybutory szczelinowe. Badania nad tego typu układem przedstawiono w pracach [28], [76], [109], [110].

Ostatnim najczęściej stosowanym rodzajem dystrybutora gazu są układy ze szczeliną wypełnioną materiałem porowatym. Wypełnienie stanowią materiały o porach nie mniejszych niż $0,6 \mu\text{m}$ lub siatki z otworami. Tego typu badania prowadzono w pracach [68], [69].

3.4. Geometria przewodów pomiarowych

Badania przepływu mieszaniny dwufazowej najczęściej prowadzone są w kolumnach o przekroju kołowym ale coraz częściej także w kanałach prostokątnych. W literaturze można napotkać również prace, w których badacze odnosili się do innych przekrojów np. w kształcie rombu bądź trójkąta [14], [107].

Zagadnieniem wpływu kształtu kanału zajmował się Ulbrich [94], w swojej pracy badał 10 kanałów prostokątnych o stosunku boków $k = 1 \div 12$ ($d_h = 7,46 \div 13,09$ mm). Następnie wyprowadził zależność przepływu w kanałach prostokątnych do przepływu w rurze od stosunku boków k . W rezultacie przeprowadzonych rozważań autor jako miarę odstępstwa przepływu w kanale prostokątnym w stosunku do przepływu w rurze zastosował poprawkę ω :

$$\omega = \frac{3k^2}{2(1+k)^2 f(k)} \quad (3-1)$$

gdzie:

$$f(k) = 1 - \frac{192}{\pi^5 k} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2m+1)^{2m+1}} \operatorname{tgh} \left(\frac{2m+1}{2} \frac{\pi}{k} \right) \right] \quad (3-2)$$

Podstawiając równanie 3-1 do równania 3-2 poprawkę ω można zapisać w postaci:

$$\omega = \left(\frac{k}{2} \right)^{0,16} \quad (3-3)$$

Z powyższego równania wynika, że jeżeli stosunek boków $k = 2$ to przepływ w kanale prostokątnym jest taki sam jak przepływ w kanale o przekroju kołowym.

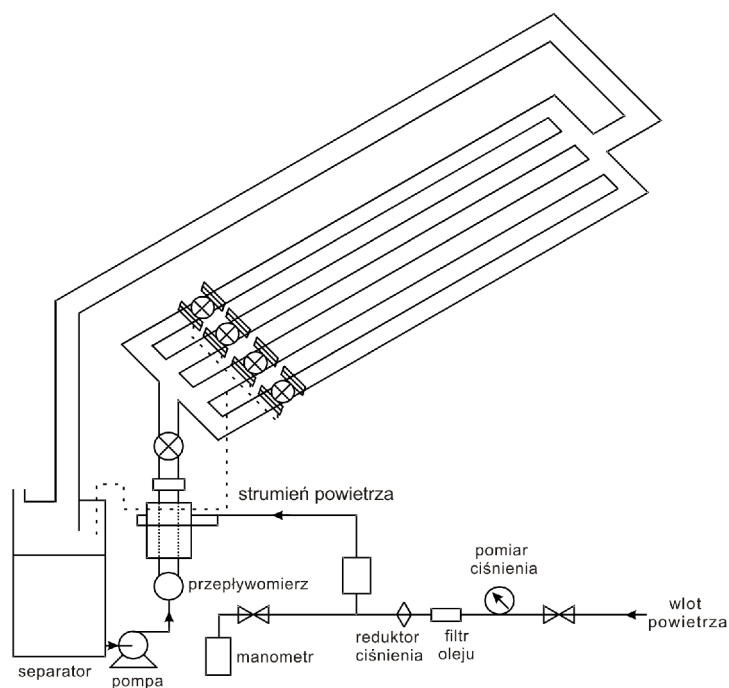
Poprawka umożliwia stosowanie zależności odnoszących się do przepływu w rurach również dla kanałów prostokątnych.

Kolejnym zagadnieniem odnoszącym się do geometrii kanału jest jego usytuowanie w przestrzeni. Najczęściej badania przepływu dwufazowego odnoszą się do badania w kanale pionowym [10], [15], [36], [57], [73], bądź poziomym [39], [98], [102], [108]. W literaturze można odnaleźć również prace odnoszące się do przepływu w kanałach pochylonych pod różnymi kątami. Barnea i inni [3] badali przepływ mieszaniny dwufazowej w kanałach pochylonych pod kątem od 0 do 90° a następnie wyniki badań przedstawili na mapach przepływu wraz z równaniami przejścia pomiędzy poszczególnymi strukturami [2].

W pracy [93] badano wpływ pochylenia kanału (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) na hydrodynamikę struktury korkowej przy bardzo małych średnicach (2; 4; 6; 8mm).

W rezultacie badań autorzy doszli do wniosku, że kształt korków w kanale zależy od jego średnicy, kąta pochylenia oraz strumieni doprowadzanych czynników. Ponadto stwierdzono, że długość oraz prędkość korków gazu w kanałach pochylnych jest większa niż w kanałach poziomych czy też pionowych.

Taitel i inni [87] badali kąty pochylenia równe 0° , 5° , 10° oraz 15° w kanałach o długości 6m i średnicy 26mm (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Schemat stanowiska pomiarowego wg.: [87]

W przypadku kątów pochylenia odpowiednio 5° , 10° i 15° zauważono różnorodność tworzących się struktur w poszczególnych kanałach w zależności od strumieni przepływu gazu i cieczy. Natomiast przy kącie pochylenia 0° obserwowano przepływ jednorodny.

Powyższe metody badań bazują na prędkościach pozornych doprowadzanych strumieni czynników czego rezultatem jest identyfikacja struktur przepływu dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych aparatów. Jednak zagadnienie hydrodynamiki przepływu dwufazowego jest o wiele bardziej złożone. Wymaga to prowadzenia badań nad zmiennymi w czasie strukturami przepływu. W kolejnym rozdziale przedstawiono ogólne informacje o procesach losowych oraz cyfrowych metodach przetwarzania obrazu w celu analizy czasowego i przestrzennego rozkładu faz.

Przeprowadzone studia literaturowe pozwalają stwierdzić, że dotychczas brak jest badań odnoszących się do równoczesnego, wznoszącego i opadającego przepływu mieszaniny dwufazowej. W związku z powyższym istnieje potrzeba podjęcia badań eksperymentalnych w tym zakresie w celu poznania ogółu zjawisk zachodzących w aparacie węzownicowym.

4. Analiza sygnałów i obrazów

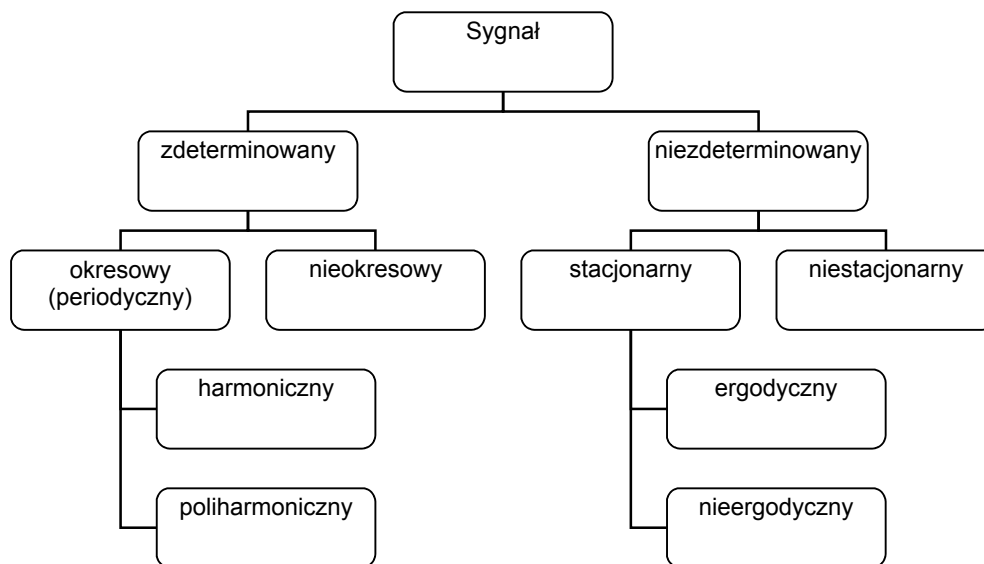
Zjawisko fizyczne jakim jest przepływ dwufazowy można rozpatrywać jako układ zamknięty posiadający parametry wejściowe oraz wyjściowe. Zatem proces zachodzący wewnątrz układu można traktować jako sygnał fizyczny opisany zdefiniowanymi zależnościami matematycznymi.

Wszystkie sygnały fizyczne można najogólniej podzielić na dwie grupy:

- sygnały zdeterminowane – mogą być opisane za pomocą ścisłych zależności matematycznych,
- sygnały niezdedeterminowane (losowe) – nie mogą być opisane wprost zależnościami matematycznymi lecz za pomocą uśrednionych charakterystyk statycznych.

Praktyczne rozstrzygnięcia o zdeterminowanym lub losowym charakterze sygnału dokonuje się biorąc jako punkt wyjścia możliwość lub niemożliwość odtworzenia go w danych warunkach. Jeżeli wielokrotne powtarzanie doświadczenia daje jednakowe wyniki, to sygnał można uważać za zdeterminowany. Jeżeli natomiast powtarzanie doświadczenia w identycznych warunkach doprowadza do różnych wyników, to przyjmuje się że natura sygnału jest losowa [4], [66].

4.1. Klasyfikacja sygnałów fizycznych



Rys. 4.1. Klasyfikacja sygnałów fizycznych wg.: [113]

Sygnały okresowe – można opisać szeregiem fal sinusoidalnych, których częstotliwości są współmierne.

Sygnały nieokresowe – sygnały, które powstały z sumowania dwóch lub więcej fal o dowolnych częstotliwościach.

Sygnały harmoniczne (sinusoidalne) – mogą być opisane funkcją czasu:

$$x(t) = X \sin(2\pi f_0 t + \theta) \quad (4 - 1)$$

Sygnały poliharmoniczne – mogą być opisane funkcją czasu, powtarzającą dokładnie swoje wartości w jednakowych przedziałach czasowych:

$$x(t) = x(t \pm nT_p), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4 - 2)$$

Ponieważ sygnały są realizacją procesów fizycznych, poniżej opisano sygnały niezdeterminowane za pomocą definicji procesów.

Proces stacjonarny to taki, w którym mierzona wartość średnia $\mu_x(t_1)$ i funkcja autokorelacji $R_x(t_1, t_1 + \tau)$ zależą od czasu t_1 (wielkości te zostaną zdefiniowane w następnym rozdziale).

Proces niestacjonarny – wartość średnia $\mu_x(t_1)$ i funkcja autokorelacji $R_x(t_1, t_1 + \tau)$ zmieniają się wraz ze zmianą czasu.

Proces ergodyczny – jeżeli proces losowy jest stacjonarny i wartości zmiennych zależnych podprzestrzeni i czasu są jednakowe dla różnych funkcji losowych to proces nazywa się ergodycznym. Dla ergodycznego procesu losowego wartość średnia i funkcja autokorelacji (jak również i inne momenty uzyskane przez uśrednienie w czasie) równają się odpowiednim średnim w zbiorze.

W celu pozyskania sygnału reprezentatywnego dla przepływu dwufazowego, można zastosować np. metodę wizualizacyjną polegającą na cyfrowej rejestracji rozkładu faz i dlatego też w kolejnym rozdziale szczegółowo opisano tą technikę.

4.2. Cyfrowe przetwarzanie obrazu – DIP

Cyfrowe przetwarzanie obrazu traktuje się jako jedną z dziedzin cyfrowego przetwarzania sygnałów. Różnica polega na tym, że poszczególne obrazy są reprezentacją danych z pomiarów optycznych a także na tym, że obraz to sygnał dwu-i więcej wymiarowy. Zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania obrazu w przepływach dwufazowych odnosi się do rejestracji samego przepływu w formie fotografii lub pliku wideo.

Techniki cyfrowego przetwarzania obrazu DIP (z ang. Digital Image Processing) charakteryzują się dużym stopniem złożoności mającym na celu wyeksponowanie istotnych elementów obrazu poddawanych dalszej analizie. Z definicji pod pojęciem *przetwarzania obrazu* należy rozumieć procesy przekształcania informacji, w których dane wejściowe jak i wyjściowe mają formę obrazu. Natomiast pojęcie *analizy obrazu* wiąże się z przetwarzaniem informacji, w których dane wejściowe stanowią obraz, natomiast dane wyjściowe mają formę różną od obrazu. Mogą one mieć postać liczb, symboli, tablicy cyfr, tekstu, decyzji lub czynności [84], [103].

Stosowanie metod DIP dla przepływów dwufazowych sprowadza się do rejestracji fotograficznych lub sekwencji filmowych pod postacią plików wideo.

Podstawy przetwarzania obrazu w zastosowaniu do przepływu mieszanin wielofazowych przedstawiono w pracach [40], [47], [111].

Ze względu na nieinwazyjny charakter technik cyfrowego przetwarzania obrazu możliwa jest rejestracja, za pomocą szybkich kamer cyfrowych, obrazów przepływu mieszaniny dwufazowej oraz analiza zarówno czasowa jak i przestrzenna. Otrzymane wyniki analizuje się na drodze wizualizacji pod kątem zmienności jasności obrazów w skali poziomów szarości.

W celu realizacji procesu pozyskiwania istotnych dla badacza wyników niezbędne są cztery elementy:

- system akwizycji obrazu,
- urządzenie stosowane do zamiany analogowego sygnału na obraz cyfrowy (tzw. frame grabber),
- komputer o odpowiedniej mocy obliczeniowej
- odpowiednie oprogramowanie jako narzędzie do przetwarzania obrazu [40].

Wzrost mocy obliczeniowej komputerów sprawił, że przy wykorzystaniu metod DIP można niemalże w bezpośredni sposób wyznaczyć prędkość, kształt, rozmiar i trajektorie ruchu fazy rozproszonej, a w przypadku układu gaz-ciecz takich parametrów jak prędkość pęcherzy i udział objętościowy fazy gazowej [112].

Na korzyść metod cyfrowego przetwarzania obrazu przemawia szybkość, pewność, precyzyjność pomiaru oraz możliwość redukcji danych z przestrzeni trójwymiarowej na dwuwymiarową i odwrotnie dzięki metodom stereoskopii ilościowej [47], [48], [50].

Warunkiem koniecznym stosowalności tych metod jest przezroczystość ścian aparatu, w którym są prowadzone badania. Otrzymane wyniki charakteryzują się wysoką rozdzielczością zarejestrowanych obrazów oraz krótkim czasem wykonywania pomiarów.

Powyższe argumenty zdecydowały, iż obecnie techniki DIP wraz z analizą stochastyczną są jednymi z najskuteczniejszych i najczęściej wykorzystywanych metod do badań hydrodynamiki przepływu mieszaniny dwufazowej oraz identyfikacji struktur [33], [75].

W niniejszej pracy stanowią podstawę do wyznaczenia warunków pracy aparatu ze wznoszącym i opadającym przepływem mieszaniny dwufazowej.

4.2.1. Etapy cyfrowego przetwarzania obrazu

Przed przystąpieniem do analizy danych niezbędne jest odpowiednie przygotowanie sygnału we względu na złożoność procesu. Pierwszym krokiem jest *dyskretyzacja*, która składa się z dwóch oddzielnych operacji:

- próbkowanie – proces polegający na określeniu czasu, w którym przebieg ma być obserwowany oraz rozdzielczości zapisu poszczególnych obrazów,
- kwantowanie – proces zamiany wartości analogowych na postać cyfrową.

Próbkowanie sygnałów jest zazwyczaj prowadzone w jednakowych odstępach czasu jednak występuje problem przyjęcia odpowiedniego odstępu. Zbyt wąski odstęp powoduje dużą redundancję oraz skorelowanie próbek natomiast zbyt szeroki może prowadzić do pomieszczenia składowych o dużej i małej częstotliwości sygnału oryginalnego (maskowanie) [62].

Obserwacja przepływów turbulentnych lub szybkich zjawisk lokalnych (powstawanie pęcherzy, rozpad kropli) wymaga wysokiej częstotliwości próbkowania.

Aby rejestracja cyfrowa była reprezentatywna z sygnałem ciągłym muszą być spełnione dwa warunki [4], [62]:

- częstotliwość próbkowania f_s musi spełniać warunek Nyquista tzn. powinna zdecydowanie a najlepiej co najmniej 10-cio krotnie przewyższać częstotliwość własną badanego procesu,
- czas trwania próby powinien być dostatecznie długi (teoretycznie nieskończenie długi) co pozwala na przyjęcie założenia o stacjonarności i ergodyczności procesu.

W literaturze można odnaleźć wiele prac poświęconych zagadnieniom uśredniania w czasie i przestrzeni dla przepływu dwufazowego [16], [17].

Pełne opisanie tego zjawiska wiąże się z zastosowaniem odpowiedniej techniki pomiarowej, którą może być cyfrowa analiza obrazu. W kolejnym rozdziale opisano metody analizy przepływu dwufazowego, bazujące na cyfrowej analizie obrazu, które mogą być wykorzystane na potrzeby prezentowanej pracy.

5. Metody eksperymentalne analizy przepływu dwufazowego gaz – ciecz

5.1. Obserwacja wizualna

Obserwacja wizualna jest dotychczas najczęściej stosowaną metodą, która polega na wizualnym badaniu przepływu dwufazowego przez obserwatora, który dokonuje klasyfikacji wg własnego uznania i doświadczenia. Z tego względu jest to często metoda niedokładna i subiektywna. Poza tym zdarza się, że trudno ocenić rodzaj struktury, ponieważ obserwowany ruch mieszaniny znajduje się na granicy dwóch rodzajów przepływu np. przepływ pianowy przechodzący w pierścieniowy. Ocena struktury przepływu odbywa się poprzez obserwację wizualną mieszaniny w czasie jej ruchu. Zdarza się, że podczas jednej analizy następuje zmiana charakteru przepływu, np. pojawiają się pęcherzyki gazu oraz korki. W takiej sytuacji przepływ klasyfikuje się według najczęściej występującej struktury. Choć metoda ta jest subiektywna, a uzyskane wyniki mogą być obarczone błędem, to większość badań odnosząca się do przepływu dwufazowego dotychczas była prowadzona przy wykorzystaniu właśnie tej techniki. Powstające błędy mogą wynikać głównie z ograniczonych zdolności oka ludzkiego do odbioru informacji, szczególnie jeżeli chodzi o liczbę rejestrowanych obrazów w jednostce czasu oraz zakres długości fal elektromagnetycznych [35]. Nie należy także zapominać o trudności przy prowadzeniu porównań w zakresie definiowania poszczególnych struktur przez osobę wykonującą badania, zwłaszcza w zakresie dużych prędkości przepływu gazu i cieczy ludzkie oko nie jest w stanie odróżnić przepływu pianowego od pierścieniowego. W metodzie tej często wykorzystuje się cyfrową rejestrację przepływu lub zdjęcia poszczególnych struktur.

Czasami w strefę przepływu czynników wprowadzane są inertne substancje kontrastujące, które ułatwiają odróżnienie faz i rozpoznanie struktur. W tym samym celu stosuje się oświetlenie badanych obiektów przy wykorzystaniu techniki jasnego i ciemnego pola. Obserwacja wizualna dostarcza jedynie informacji jakościowych na temat pola przepływu. Metoda ta miała i ma w dalszym ciągu duże znaczenie czego odzwierciedleniem jest wiele opracowań w literaturze [25], [51].

W warunkach przemysłowych zdarza się, że nie ma możliwości dokonania wizualnej obserwacji, a więc nie można dokonać identyfikacji struktur. W takich przypadkach wykonuje się często specjalne wzierniki, bądź też stosuje się bardziej zaawansowane techniki. Obecnie wiele tych ograniczeń zostało rozwiązanych w wyniku uzupełnienia metody wizualnej, metodami cyfrowego przetwarzania obrazu. Uzyskanie informacji jakościowej

z całego pola przepływu, przy wykorzystaniu metod wspomaganych komputerowo przekształcone zostają na informacje ilościowe. W rezultacie tego otrzymuje się płaski obraz, który poddawany jest dalszemu cyfrowemu przetwarzaniu [70], [89].

5.2. Metody stochastyczne wykorzystywane w celu identyfikacji struktur przepływu mieszaniny dwufazowej

W niniejszej pracy zastosowano najczęściej wykorzystywane funkcje stochastyczne do oceny hydrodynamiki przepływu mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz:

- funkcja gęstości prawdopodobieństwa - w celu identyfikacji struktur przepływu,
- funkcja autokorelacji (korelacji własnej) – w celu wyznaczenia częstości występowania struktur gazowych,
- funkcja interkorelacji (korelacji wzajemnej, krzyżowej) – w celu wyznaczenia prędkości przemieszczania się struktur gazowych ,

Powyższe funkcje wraz z metodami cyfrowego przetwarzania obrazu posłużą do oceny warunków pracy aparatu ze wznoszącym i opadającym przepływem mieszaniny dwufazowej.

5.2.1. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa PDF (z ang. probability density function) sygnału losowego określa prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że wartości sygnału w dowolnej chwili są zawarte w określonym przedziale. Za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa można otrzymać informację o charakterystyce procesu rozpatrywanego w dziedzinie amplitudy (wartości).

Prawdopodobieństwo, że wartości funkcji $x(t)$ przypadają na przedział od x do $x + \Delta x$, można znaleźć wyznaczając stosunek T_x/T gdzie T_x oznacza sumę przedziałów czasu, w których wartości sygnału znajdują się w przedziale $(x, x + \Delta x)$ w czasie trwania obserwacji T . Przy dążeniu T do nieskończoności stosunek ten coraz dokładniej opisuje prawdopodobieństwo takiego zdarzenia. To twierdzenie można zapisać w następujący sposób:

$$\Pr[x < x(t) \leq x + \Delta x] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T} \quad (5 - 1)$$

Przy dostatecznie małych wartościach Δx gęstość prawdopodobieństwa $p(x)$ można określić:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Pr[x < x(t) \leq x + \Delta x]}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T} \right] \quad (5 - 2)$$

Prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że wartość chwilowa $x(t)$ nie przewyższa pewnej wartości x , charakteryzuje się funkcją $P(x)$, która równa jest całce gęstości prawdopodobieństwa w granicach od minus nieskończoności do x . Funkcja $P(x)$ nazywa się dystrybuantą.

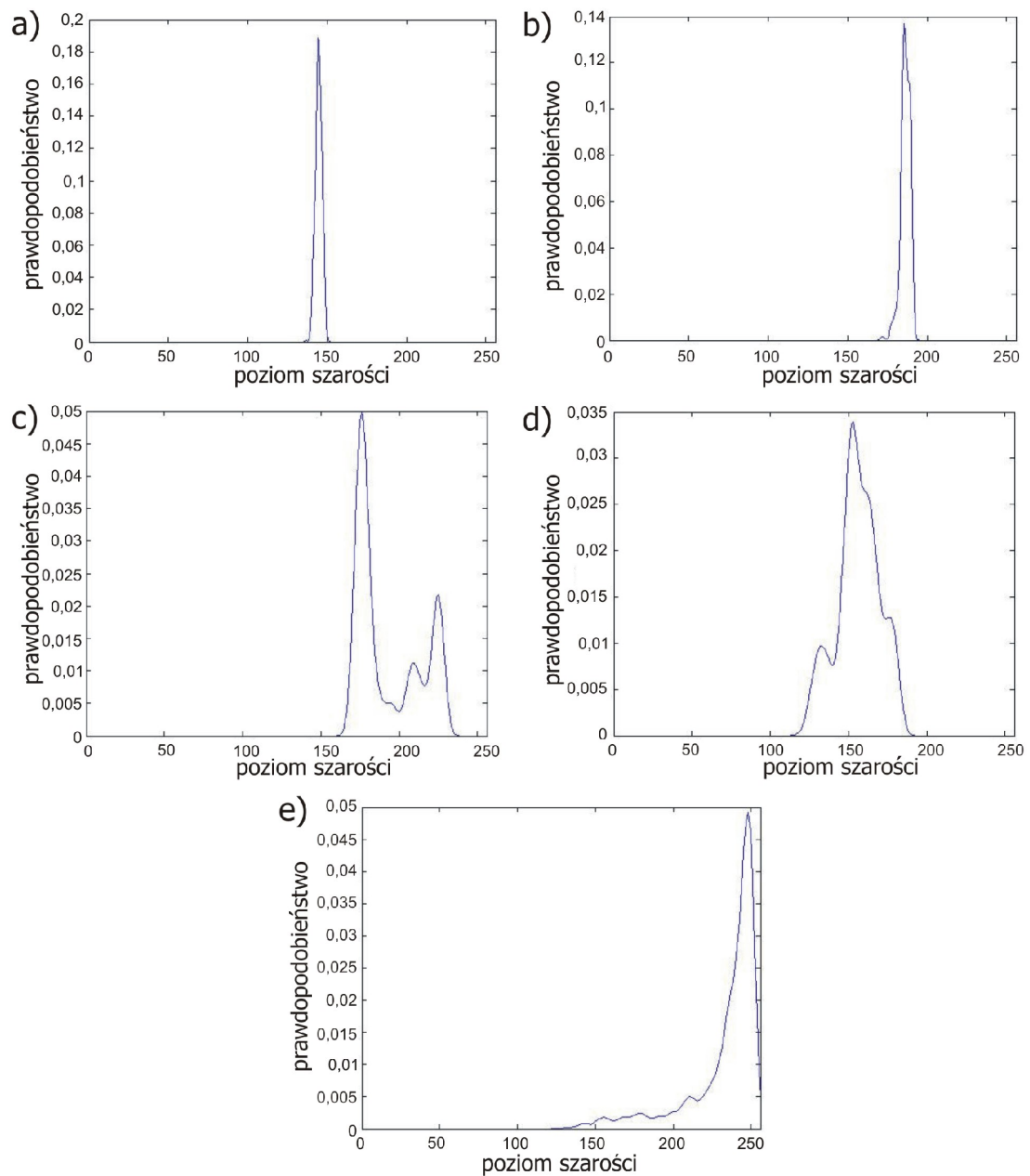
$$P(x) = \Pr [x(t) \leq x] \quad (5 - 3)$$

Dystrybuanta jest ograniczona wartościami 0 i 1, ponieważ prawdopodobieństwo tego, że $x(t)$ jest mniejsze od minus nieskończoności, równe jest zeru, natomiast prawdopodobieństwo tego, że $x(t)$ jest mniejsze od plus nieskończoności, jest równe jedności (zdarzenie pewne). Zatem prawdopodobieństwo tego, że wartość funkcji $x(t)$ znajdzie się w przedziale (x_1, x_2) wynosi:

$$P(x_2) - P(x_1) = \Pr [x_1 < x(t) \leq x_2] = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx \quad (5 - 4)$$

Gęstość prawdopodobieństwa jest zawsze funkcją rzeczywistą nieujemną. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa może mieć charakter dyskretny (zmienna losowa przyjmuje wartości całkowite) lub ciągły (zmienna losowa opisana jest przez wartości rzeczywiste). W stosunku do poziomu szarości funkcja ma charakter dyskretny [4], [62].

Funkcja PDF stanowi dobre narzędzie do rozpoznawania struktur przepływu mieszaniny dwufazowej ponieważ pozwala rozróżnić sygnał losowy od harmonicznego. Odbywa się to za pomocą analizy kształtu histogramu, który jest charakterystyczny dla poszczególnych struktur przepływu (rys. 5.1). Ocenie podlega zakres zmian na histogramie oraz występowanie lokalnych maksimów.



Rys. 5.1. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa wg.: Hestroni [27] dla przepływu wznoszącego :
a) pęcherzykowego, b) pęcherzykowo-dyspersyjnego, c) korkowego, d) pianowego, e) pierścieniowego

Głównym celem pomiaru funkcji gęstości prawdopodobieństwa sygnału fizycznego jest ustalenie praw statystycznych dotyczących rozkładu jego wartości chwilowych.

W literaturze można znaleźć wiele prac, w których do identyfikacji struktur stosowano funkcję gęstości prawdopodobieństwa: [38], [42], [56], [95].

5.2.2. Funkcja autokorelacji (korelacji własnej)

Funkcja autokorelacji ACF (z ang. auto correlation function) sygnału losowego charakteryzuje ogólną zależność wartości sygnału w pewnej określonej chwili od wartości w innej chwili. Za pomocą funkcji autokorelacji można otrzymać informację o charakterystyce procesu rozpatrywanego w dziedzinie czasu.

Estymator wartości funkcji autokorelacji, wiążącej wartości $x(t)$ w chwilach t i $t + \tau$, można uzyskać obliczając iloczyn tych dwóch rzędnych i uśredniając wartość iloczynu w przedziale czasu obserwacji T . Przy dążeniu T do nieskończoności obliczona wartość średnia iloczynu dąży do dokładnej wartości funkcji autokorelacji:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt \quad (5 - 5)$$

Funkcja $R_x(\tau)$ jest zawsze rzeczywista i parzysta oraz ma maksimum w punkcie $\tau = 0$; może ona przybierać wartości dodatnie lub ujemne:

$$R_x(-\tau) = R_x(\tau) \quad (5 - 6)$$

Głównym zastosowaniem funkcji autokorelacji procesu fizycznego jest badanie polegające na ustaleniu, w jakim stopniu wartości procesu w pewnej chwili wpływają na wartości procesu w pewnej określonej chwili w przyszłości. W przypadku sygnału harmonicznego lub innych sygnałów zdeterminowanych funkcja autokorelacji „trwa” dla wszystkich przesunięć czasowych – w przeciwieństwie do funkcji autokorelacji procesu losowego, która dąży do zera przy dużych wartościach przesunięcia. Wobec tego funkcja autokorelacji stanowi dobre narzędzie do wykrywania procesów zdeterminowanych, które mogą być maskowane przez szum losowy a jej wykres nosi nazwę autokorelogramu [4], [77].

5.2.3. Funkcja interkorelacji (korelacji wzajemnej)

Funkcja interkorelacji CCF (z ang. cross correlation function) dwóch sygnałów losowych charakteryzuje wzajemną zależność wartości jednego sygnału losowego od wartości drugiego sygnału losowego.

Estymacji funkcji interkorelacji wartości sygnału $x(t)$ w chwili t i wartości sygnału $y(t)$ w chwili $t + \tau$ można dokonać obliczając średni iloczyn tych dwóch wartości w czasie obserwacji T , jak to ma miejsce przy wyznaczaniu funkcji autokorelacji. Wyznaczona w ten sposób średnia wartość iloczynu dąży do wartości dokładnej funkcji interkorelacji przy dążeniu T do nieskończoności:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt \quad (5 - 7)$$

$R_{xy}(\tau)$ jest funkcją rzeczywistą, która może być zarówno dodatnia jak i ujemna. Oprócz tego funkcja $R_{xy}(\tau)$ niekoniecznie musi mieć maksimum w punkcie $\tau = 0$ i niekoniecznie musi być funkcją parzystą jak w przypadku funkcji autokorelacji.

Funkcja interkorelacji charakteryzuje się cechą antysymetrii, to znaczy gdyby zamienić x i y miejscami to:

$$R_{xy}(-\tau) = R_{yx}(\tau) \quad (5 - 8)$$

Jeżeli $R_{xy}(\tau) = 0$, to mówi się, że sygnały $x(t)$ i $y(t)$ są nieskorelowane. Jeżeli sygnały $x(t)$ i $y(t)$ są statystycznie niezależne, to dla każdej wartości τ zachodzi równanie $R_{xy}(\tau) = 0$.

Głównym zastosowaniem funkcji interkorelacji jest pomiar czasu opóźnienia.

Jeżeli układ jest liniowy, to wyznaczając funkcję interkorelacji między sygnałem na wejściu a sygnałem na wyjściu z układu można wyznaczyć bezpośrednio czas opóźnienia. Ponieważ sygnał na wyjściu z układu jest przesunięty w czasie względem sygnału na wejściu to funkcja interkorelacji będzie wykazywała wyraźne maksimum przy wartości przesunięcia równej czasowi, który jest niezbędny do przejścia przez układ. Wykres funkcji interkorelacji nazywamy interkorelogramem [4], [18].

Funkcję tą można również wykorzystać do wyznaczania toru sygnału oraz do wykrywania sygnałów w szumie i ich odtwarzanie.

Funkcje korelacji zastosowano w wielu pracach, między innymi: [23],[37], [61], [70], [92], [95], [115].

Funkcje autokorelacji i interkorelacji poddaje się normowaniu i filtrowaniu w celu wygładzenia rozrzutu za pomocą funkcji okna (z ang. window function). Okna poprzez wygładzenie częstotliwościowe powodują wytłumienie rozrzutu tzw. „listków bocznych” funkcji. Istnieją trzy takie metody:

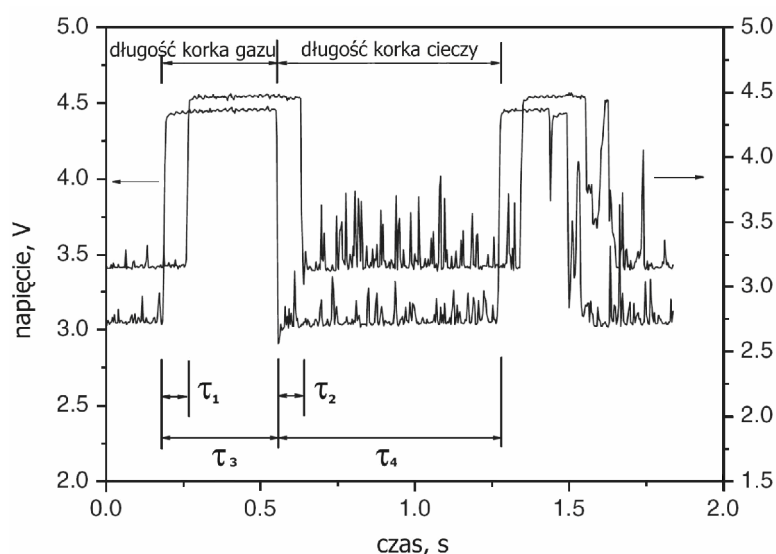
Okno Hanna powoduje uśrednienie trzech kolejnych listków bocznych, a wartość funkcji w maksimum jest dwukrotnie powiększona w stosunku do listków bocznych. Listki te przybierają na przemian wartości dodatnie i ujemne.

Okno Hamminga – jego kształt jest przybliżony do okna Hanna jednak należy wyróżnić niewielkie różnice pomiędzy tymi oknami. Mianowicie wartość maksymalnego listka bocznego dla okna Hamminga stanowi w przybliżeniu jedną piątą odpowiedniej wartości dla

okna Hanna. Także wartość listków bocznych w przypadku okna Hanna maleje znacznie szybciej niż dla okna Hamminga.

Okno Parzena. Jest o około 30% szersze od okna Hanna i Hamminga, a główną jego zaletą są nieujemne wartości gęstości widmowej (listki boczne fluktuują, lecz zawsze są dodatnie). Wspólną cechą tych trzech okien są wartości równe jedności przy τ równym zero. Podstawy teoretyczne tych okien opierają się na metodach Blackman'a i Tukey'a [5].

W literaturze można napotkać wiele opracowań dotyczących relacji przepływu struktur korkowych. Przykładowo przemieszczenie się korka gazowego wzdłuż kanału pomiarowego (rys. 5.2) badano w pracy [115].



Rys. 5.2. Interpretacja graficzna przepływu struktury korkowej, wg.: [115]

Ze względu na dużą ilość metod eksperymentalnych analizy przepływu dwufazowego istnieje problem wyboru najbardziej odpowiedniej metody, która opisałaby ogół zjawisk hydrodynamicznych.

W prezentowanej pracy do oceny warunków pracy aparatu ze wznoszącym i opadającym przepływem mieszaniny dwufazowej gaz - ciecz postanowiono wykorzystać metodę cyfrowej analizy obrazu w połączeniu z wykorzystaniem funkcji stochastycznych co umożliwi kompleksową ocenę zjawisk dzięki przestrzennej i czasowej analizie obrazu.

6. Cel i zakres pracy

Na podstawie studiów literaturowych stwierdzono, iż dotychczas większość badań dotyczących przepływu mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz w kanale pionowym prowadzono rozdzielnie dla przepływu wznoszącego i opadającego. Zatem zasadniczym pytaniem będzie czy występują ogólne zależności pomiędzy tymi przepływami oraz czy badania te można odnieść do równoczesnego, wznoszącego i opadającego przepływu mieszaniny, wreszcie jaki wpływ na charakter przepływu ma zmiana jego kierunku.

Aparaty węzownicowe są często spotykane w przemyśle jako urządzenia wykorzystywane do realizacji procesu transportu ciepła lub masy, dlatego też dokładne poznanie hydrodynamiki przepływu w tego typu aparacie jest istotnym zagadnieniem.

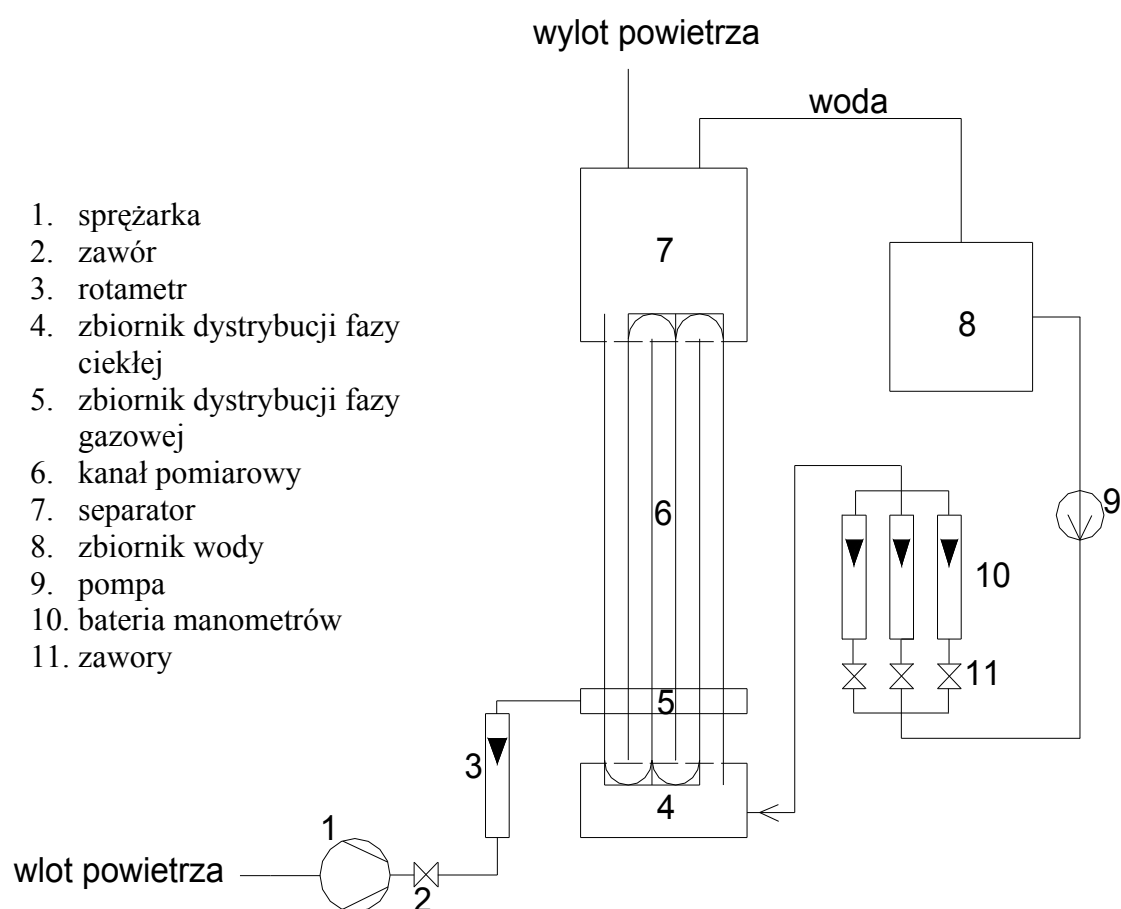
Na podstawie powyższego stwierdzenia za cel pracy przyjęto kompleksową analizę hydrodynamiki mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz z równoczesnym, współprądowym, naprzemiennym, wznoszącym i opadającym przepływem, w zależności od układu dystrybucji, w węzownicowym kanale pionowym.

Zakres pracy obejmował:

- przegląd literaturowy,
- projekt oraz budowę stanowiska badawczego,
- wizualizację procesu przepływu w kanale węzownicowym,
- cyfrową analizę obrazu pod kątem analizy fluktuacji poziomu szarości,
- identyfikację powstających struktur przepływu oraz opracowanie map przepływu,
- analizę porównawczą wyników badań własnych z istniejącymi w literaturze,
- wykorzystanie technik korelacyjnych do wyznaczenia prędkości struktur korkowych,
- określenie udziału objętościowego fazy gazowej,
- ocenę wpływu układu dystrybucji na przepływ dwufazowy,
- wyznaczenie obszarów prawidłowej pracy aparatu gdzie dla wznoszącego i opadającego przepływu mieszaniny występują jednakowe struktury.

7. Stanowisko pomiarowe

W celu określenia warunków pracy aparatu ze wznoszącym i opadającym przepływem mieszaniny dwufazowej gaz - ciecz zaprojektowano i wykonano stanowisko pomiarowe (rys. 7.1). Głównym elementem stanowiska był pionowy kanał o przekroju prostokątnym o wymiarach zewnętrznych: wysokość – 2000 mm, szerokość – 235 mm, grubość – 25 mm. Wewnątrz kanału znajdowało się pięć równoległych, współpracujących kanałów o przekroju wewnętrznym 5 x 35 mm (grubość / szerokość) połączonych łukami o promieniu 40 mm. Wężownicowa geometria wewnętrznego kanału wymuszała naprzemienny, wznoszący i opadający przepływ mieszaniny dwufazowej.



Rys. 7.1. Schemat instalacji do badania przepływu wznoszącego i opadającego mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz.

Powietrze atmosferyczne stanowiące fazę gazową dostarczane było do układu za pomocą sprężarki a następnie poprzez rotametr regulujący jego strumień trafiało do zbiornika dystrybucji fazy gazowej. Woda krążyła w układzie w obiegu zamkniętym. Poprzez pompę

oraz baterię rotametrów, strumień cieczy wypełniał zbiornik dystrybucji fazy ciekłej a następnie wtłaczany był do kanału pomiarowego. W zbiorniku dystrybucji fazy gazowej następowało połączenie się obu czynników w mieszaninę dwufazową. Po przejściu przez kanał węzownicowy mieszanina trafiała do separatora gdzie czynniki rozdzielały się. Powietrze ulatywało do otoczenia a woda zawracała do zbiornika i z powrotem do obiegu.

Stanowisko pomiarowe umiejscowione było w laboratorium do cyfrowej analizy obrazu, gdzie temperatura obu czynników przyjmowała temperaturę otoczenia i wahała się w granicach 20 – 22 °C.

Badania nad hydrodynamiką przepływu dwufazowego oparte były na cyfrowej analizie obrazu dlatego woda krążąca w obiegu zamkniętym została zabarwiona w celu uzyskania kontrastu pomiędzy naturalnie bezbarwnymi czynnikami. Do tego celu wykorzystano nieinwazyjny fizykochemicznie barwnik – błękit metylenowy ($C_{16}H_{18}ClN_3S$). Napięcie powierzchniowe, lepkość oraz gęstość cieczy nie uległy zmianie gdyż koncentracja barwnika była bardzo niska.

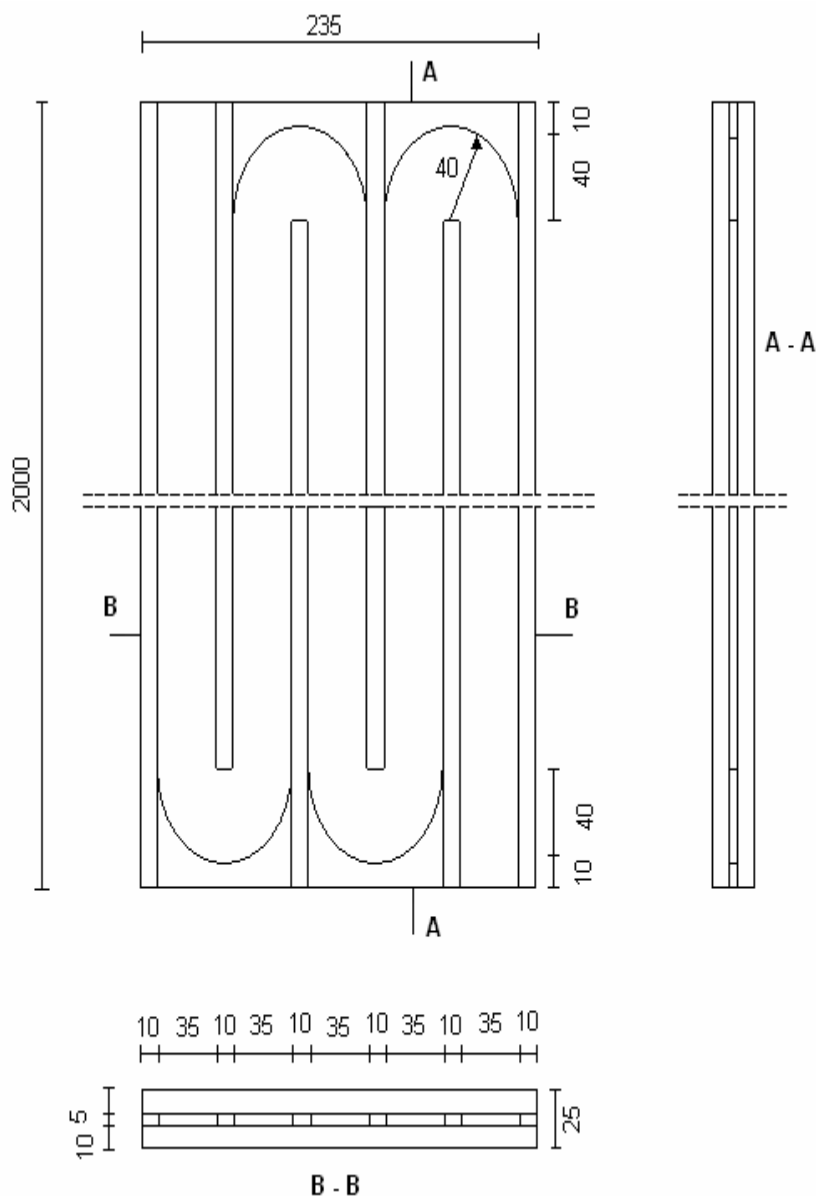
Zakresy prędkości obu czynników zostały dobrane doświadczalnie poprzez określenie najniższych i najwyższych prędkości faz, dla których praca aparatu była stabilna oraz uzyskać możliwie szeroki zakres występujących struktur przepływu. Jeżeli prędkość jednego z czynników była zbyt niska następowało blokowanie przepływu. Natomiast jeżeli prędkość, jednego lub obu czynników jednocześnie, była zbyt wysoka pojawiały się niebezpieczne pulsacje i drgania, które przy dalszej eksploatacji mogłyby spowodować uszkodzenia lub zniszczenie aparatu.

Aby wykluczyć wyżej wymienione niekorzystne warunki pracy, dobrano następujące przedziały prędkości czynników:

- $w_{G0} \in \langle 0,18 \div 5,8 \rangle$ m/s
- $w_{L0} \in \langle 0,01 \div 1 \rangle$ m/s

Kanał pomiarowy wykonano w całości z przezroczystego pleksiglasu (rys. 7.3, 7.4) aby umożliwić rejestrację zjawisk hydrodynamicznych za pomocą technik wizualizacyjnych.

Wysokość kanału pomiarowego została określona na podstawie założenia Taitel'a i innych [82], aby stosunek średnicy kanału do jego długości wynosił co najmniej 130, w celu rozwinięcia przepływu i uniknięcia wpływu efektów wlotowych.

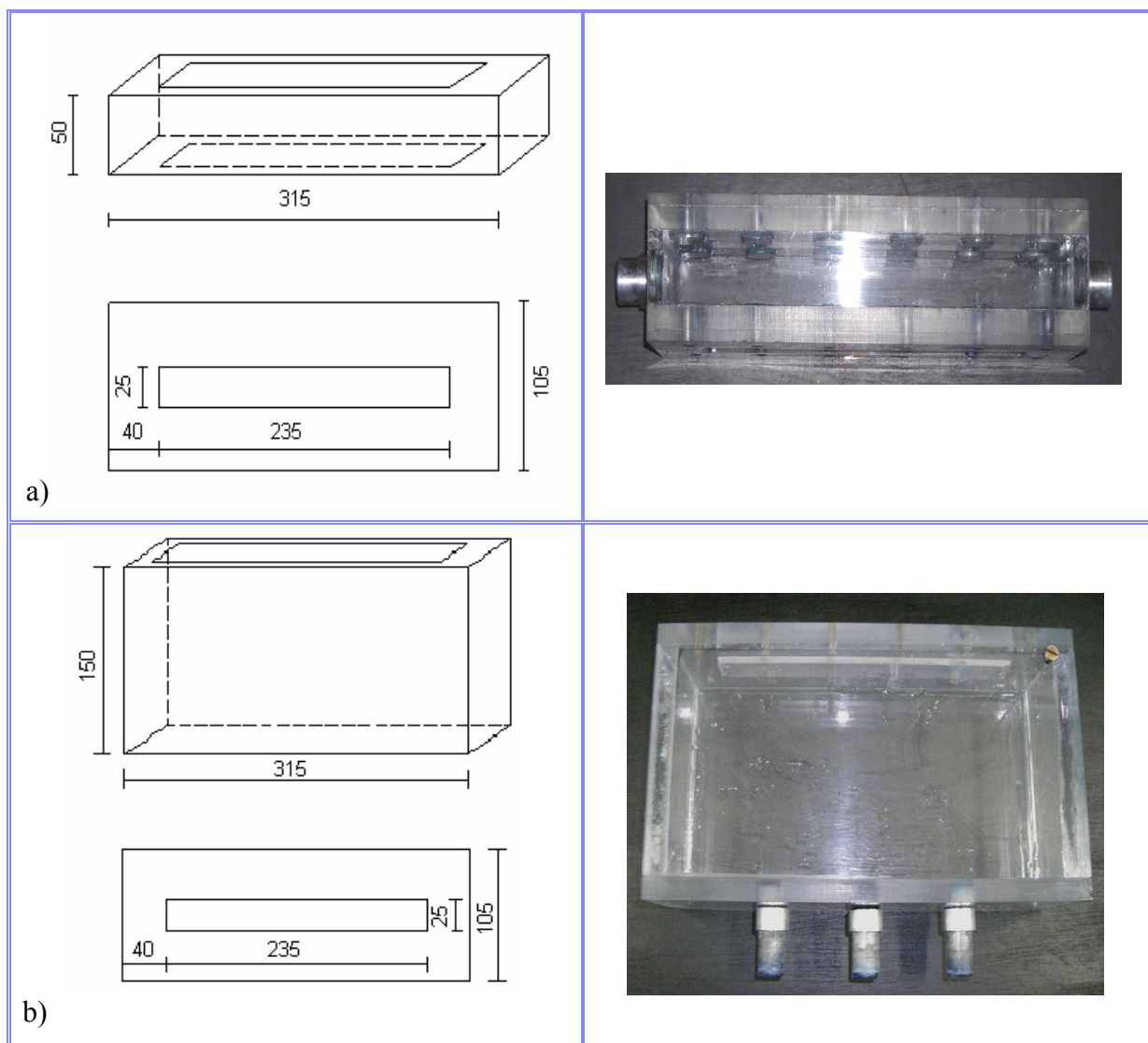


Rys. 7.2.. Geometria kanału pomiarowego



Rys. 7.3. Wygląd rzeczywisty

Ponieważ wpływ geometrii kanału ma nieznaczny wpływ na granice przejścia pomiędzy strukturami przepływu o czym mowa w pracach [14], [107], postanowiono dobrać wygodny w badaniach wizualizacyjnych przekrój o profilu prostokątnym [46] (rys. 7.2).

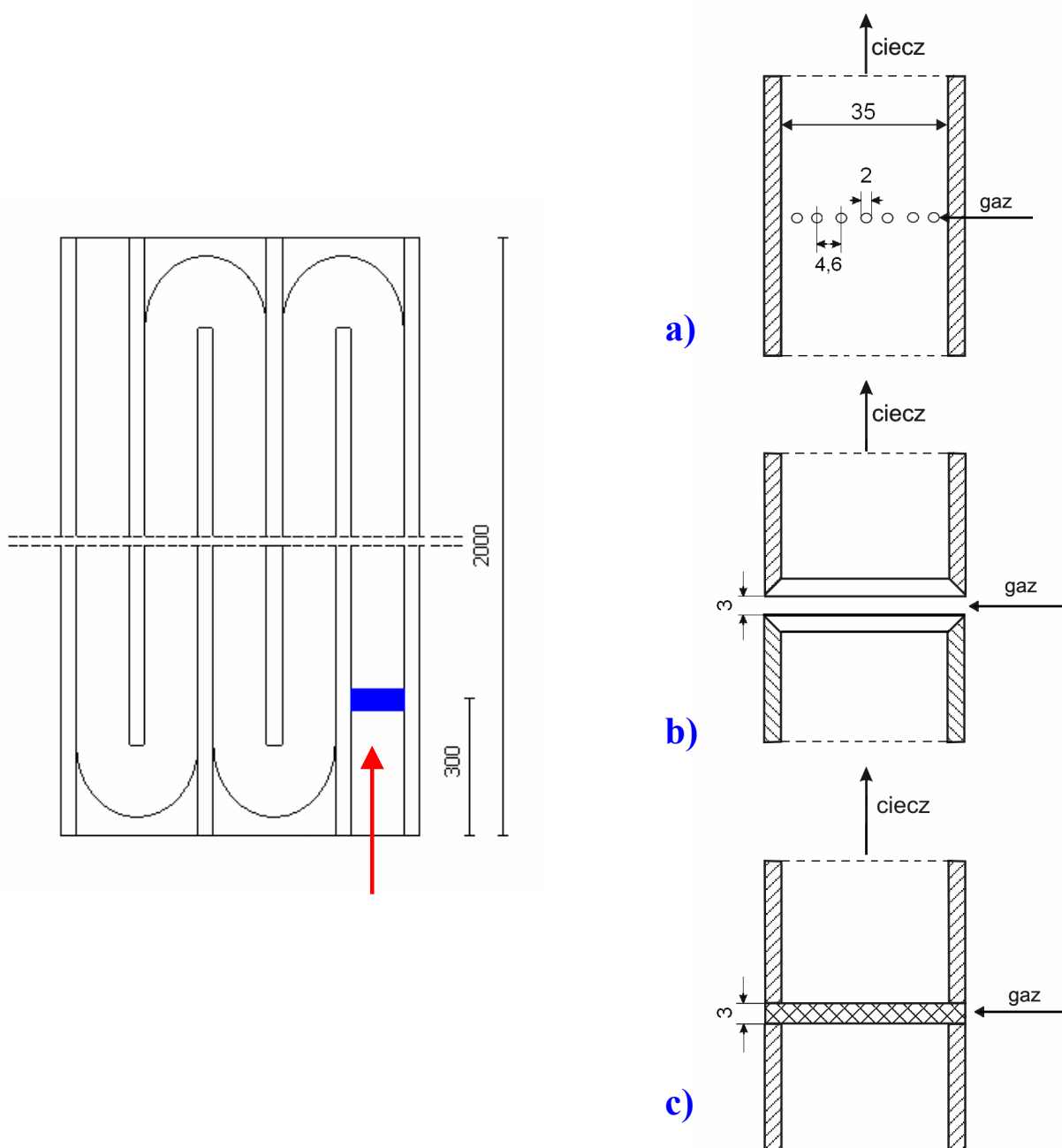


Rys. 7.4. Zbiorniki dystrybucji faz: a) gazowej, b) ciekłej

7.1. Rodzaje dystrybucji fazy gazowej

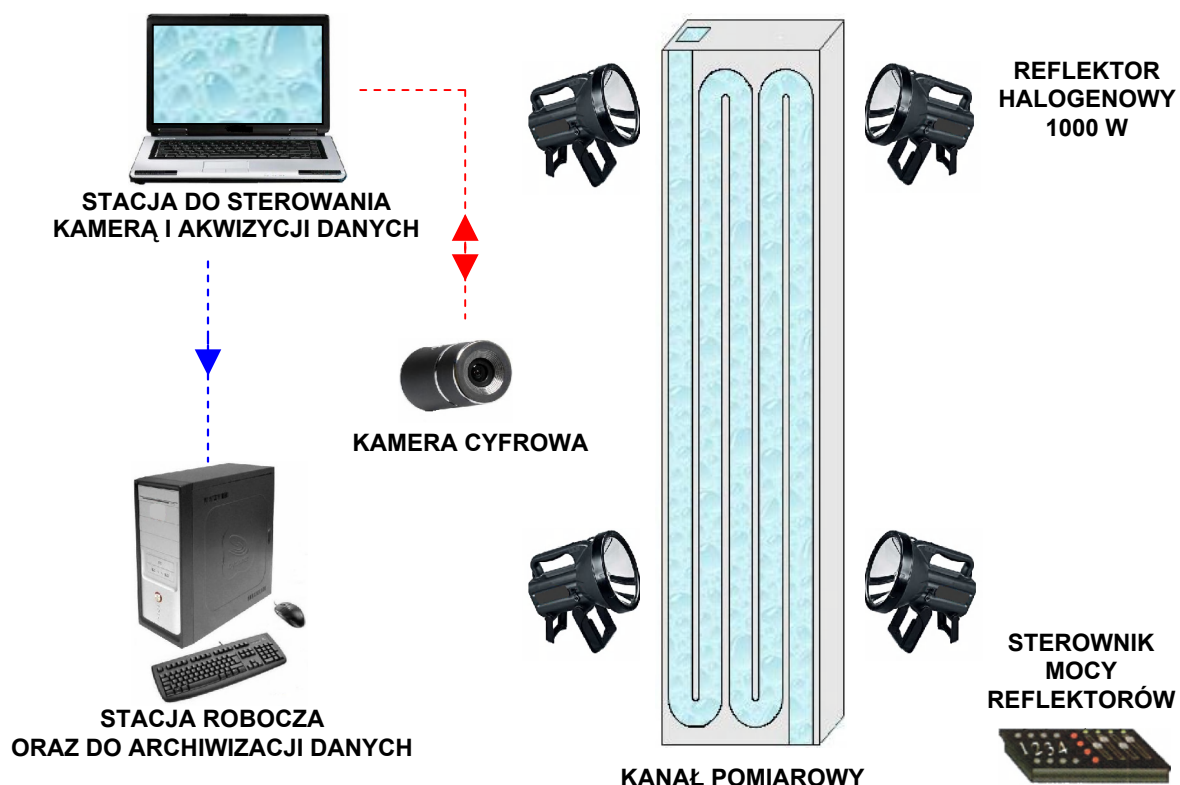
W celu sprawdzenia jakie oddziaływanie, na warunki pracy aparatu oraz hydrodynamikę przepływu mieszaniny dwufazowej, ma rodzaj dystrybutora fazy gazowej, postanowiono przebadąć trzy układy zasilania (rys. 7.5). W każdym przypadku powietrze ze zbiornika dystrybucji włączane było do kanału pomiarowego przez odpowiednio wykonany bezpośrednio w kanale wlotowym układ:

1. Otworkowy. W kanale wlotowym nawiercono siedem przelotowych otworów o przekroju 2 mm każdy w stałej odległości 2,6 mm.
2. Szczelinowy. Stanowiła szczelina przelotowa o wymiarach 3 x 35 mm.
3. Szczelinowy wypełniony materiałem porowatym. Szczelinę przelotową o wymiarach 3 x 35 mm wypełniono porowatą płytką ceramiczną typu N1 firmy COSS.



Rys. 7.5. Geometria dystrybucji fazy gazowej: a) układ otworkowy, b) układ szczelinowy, c) układ szczelinowy wypełniony materiałem porowatym

7.2. Wizualizacja przepływu dwufazowego



Rys. 7.6. Schemat stanowiska do cyfrowej analizy obrazu.

Kanał pomiarowy został oświetlony czterema reflektorami halogenowymi (rys. 7.6) o mocy 1000W każdy. W celu uniknięcia prześwietlenia obrazu w wyniku dopływu zbyt dużej ilości światła po bokach kanału ustawiono czarne maskownice oraz mleczną płytę z pleksiglasu z tyłu kanału aby wyeliminować zjawisko nierównomiernego rozproszenia światła. Moc reflektorów regulowana była za pomocą sterownika.

Każdy pomiar rozpoczynano po odpowiednio długim czasie, w którym przepływ mieszaniny dwufazowej stabilizował się po zmianie strumieni czynników. Okres 5 minut był wystarczającym czasem oczekiwania, po którym przystępowano do archiwizacji zdjęć przepływu.

Ponieważ prędkość zmian hydrodynamicznych mieszaniny dwufazowej jest bardzo wysoka do badań zastosowano szybką kamerę cyfrową, która umożliwiła precyzyjną rejestrację zjawisk zachodzących w aparacie. Na potrzeby badań własnych przyjęto:

- wartość przesłony - 5,6,
- rozdzielczość - 1024 x 512,

- częstotliwość – 223 Hz,
- ilość map bitowych – 1000.

Monochromatyczna kamera cyfrowa rejestrowała obrazy w formie map bitowych, w których każdy z pikseli odpowiadał jednemu z 256 poziomów szarości. Pojedyncza mapa bitowa stanowiła jedno zdjęcie reprezentujące klatkę filmu. Prędkość zapisu wynosiła 223 klatki na sekundę więc łączny czas ekspozycji stanowił 4,48s. Mapy bitowe zostały zapisane w pamięci wewnętrznej kamery a następnie przesłane do komputera, który pełnił rolę stacji do akwizycji danych oraz sterowania kamerą. Dane z tego komputera za pomocą nośnika w postaci płyty CD, przenoszone były do komputera klasy PC pełniącego funkcję stacji roboczej oraz archiwizatora danych.

7.3. Charakterystyka urządzeń wykorzystanych podczas badań własnych

W tabelach 7.1 i 7.2 przedstawiono dokładny opis urządzeń wykorzystanych do cyfrowej akwizycji obrazu.

Tabela 7.1. Układ akwizycji obrazu wg.: [1]

KAMERA CYFROWA	
Producent	VDS Vosskühler GmbH
Nazwa	HCC 1000
Receptor	Matryca CMOS o przekątnej ½”, monochromatyczna
Rozdzielczość obrazu	1024x256, 1024x512, 1024x1024 pikseli
Pamięć	512 MB
Migawka	1-2010 µs
Czas ekspozycji	0,5-551,9 ms
Częstotliwość próbkowania	0,001-1800 Hz
OBIEKTYW	
Obiektyw	Schneider Kreuznach Xenon
Ogniskowa	25 mm
f/stop	1:0,95-11,8

Tabela 7.2. Parametry stacji do sterowania kamerą i akwizycji danych wg.: [1]

KOMPUTER STERUJĄCY KAMERA	
Producent	PRISM Portale Computers
Nazwa	PRISM N9 Portable Workstation
Procesor	Intel Pentium III 667 MHz, 256 MB L2 Cache
Pamięć RAM	128 MB SDRAM
Pojemność dysku twardego	20 GB
Karta graficzna	ELSA ERAZOR III LT-NVIDIA
Napęd CD-RW	HP CD-WRITER Plus 9500
Monitor	LCD 14" SVGA 1024 ^x 768@75Hz

W tabelach 7.3 i 7.4 przedstawiono charakterystykę oraz dokładność rotametrów wykorzystywanych podczas badań.

Tabela. 7.3. Charakterystyka rotametrów regulujących strumień powietrza

Typ	ROS-10	ROS-16
Skala rotametry [m ³ /h]	0,11÷1,1	0,5÷5
Klasa dokładności	2,5	2,5
Zakres pomiarowy [m ³ /h]	0,99	4,5
Błąd bezwzględny (dokładność pomiaru) [m ³ /h]	0,0248	0,1125

Tabela 7.4. Charakterystyka rotametrów regulujących strumień wody

Typ	RDN-10	RDN-15	RDN-20
Numer obudowy	161405	1161406	161407
Skala rotametry [m ³ /h]	0,003÷0,03	0,018÷0,18	0,1÷1
Klasa dokładności	2,5	2,5	2,5
Zakres pomiarowy [m ³ /h]	0,027	0,162	0,9
Błąd bezwzględny (dokładność pomiaru) [m ³ /h]	0,0007	0,0041	0,0225

7.4. Analiza błędów pomiarowych

Aby wyznaczyć dokładność pomiaru w pierwszej kolejności obliczono błąd bezwzględny, który jest wyznaczony w oparciu o klasę przyrządu oraz górny zakres pomiarowy. Następnie obliczono przeciętny błąd względny, który określono jako stosunek błędu bezwzględnego do wartości równej połowie skali rotametu. Dla wszystkich przepływomierzy pomiary strumienia płynu prowadzono tak aby nie korzystać z dolnej części zakresu i w związku z tym błąd ten był na tym samym poziomie i nie przekraczał 4,5%.

Stanowisko pomiarowe znajdowało się w laboratorium do cyfrowej analizy obrazu stąd też brak czynników zewnętrznych takich jak zmiany temperatury czy natężenia światła dziennego, które mogłyby wprowadzać błąd przypadkowy.

8. Koncepcja i metodyka badań

Koncepcję badań mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz z równoczesnym wnoszącym i opadającym przepływem oparto na dwóch głównych założeniach:

1. Cyfrowa analiza obrazu umożliwia klasyfikację struktur przepływu w oparciu o analizę pojedynczych obrazów przestrzennego rozkładu faz.
2. Funkcje statystyczne wyznaczone na podstawie analizy ciągu obrazów wykorzystywane są do oceny przepływu w czasie i służą rozpoznawaniu poszczególnych typów struktur oraz wyznaczeniu rzeczywistej prędkości fazy gazowej.

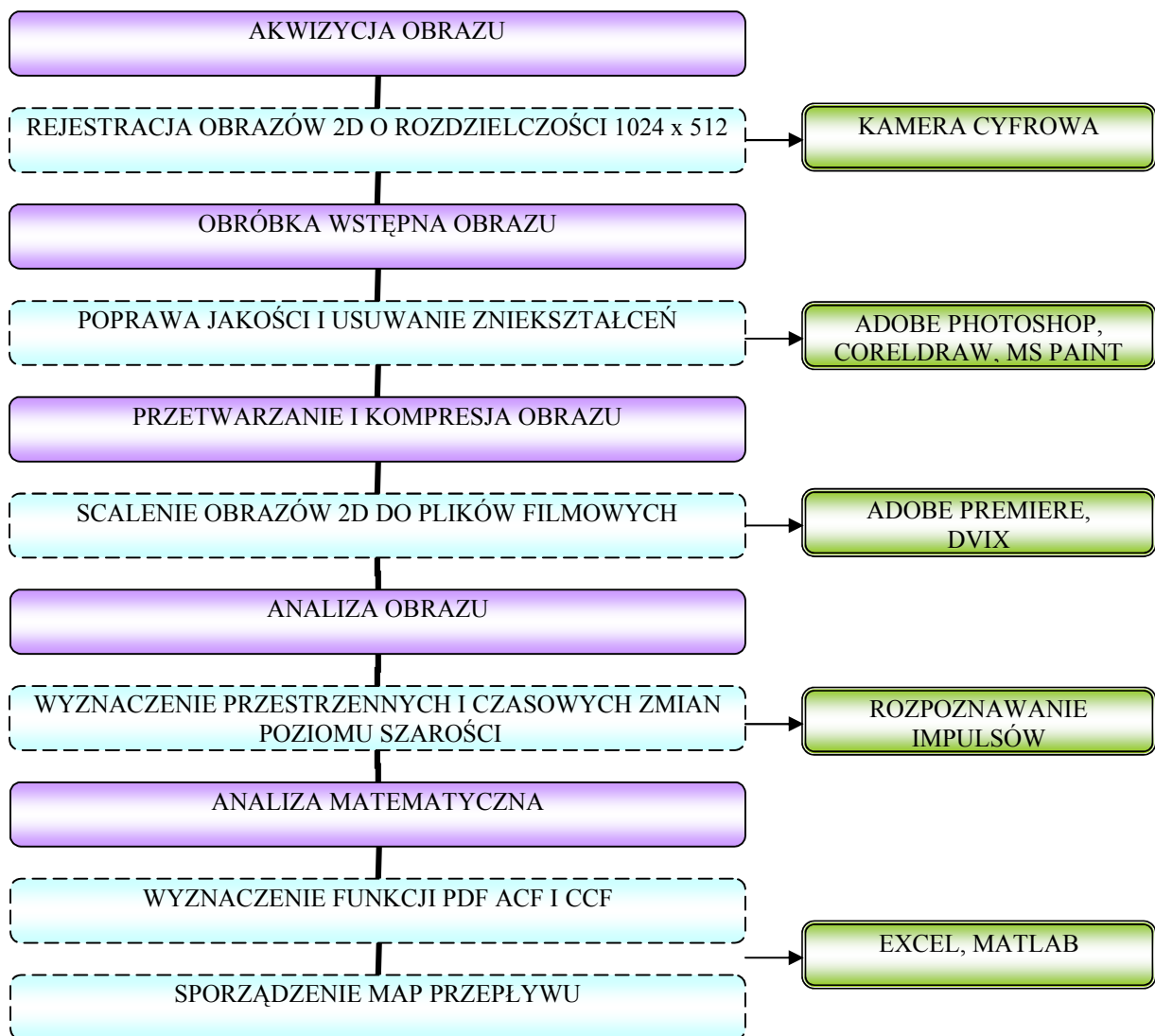
W celu realizacji powyższych założeń wykorzystano następujące oprogramowanie komputerowe:

- ✓ Adobe Premiere 5.1,
- ✓ Adobe Photoshop CS,
- ✓ CorelDRAW 11,
- ✓ Irfan View 3.91,
- ✓ Matlab 6.5,
- ✓ MS Excel
- ✓ MS Paint,
- ✓ Rozpoznawanie Impulsów [40].

Program Irfan View został użyty jako przeglądarka map bitowych zarejestrowanych zjawisk. Poprawy jakości obrazów oraz usunięcie powstałych zniekształceń dokonano w programach CorelDRAW, Adobe Photoshop oraz MS Paint. Następnie pojedyncze mapy bitowe zespolono do plików filmowych typu avi w programie Adobe Premiere oraz dokonano kompresji plików przy użyciu Divx 4,11 z rozmiaru 446 MB do 2MB. Zaletą tej kompresji było zachowanie wysokiej jakości obrazu przy krótkim czasie przetwarzania pliku [40], [112]. Kolejnym etapem było poddanie analizie plików filmowych w programie „Rozpoznawanie impulsów” [40] w celu wyznaczenia czasowego i przestrzennego przebiegu zmian poziomu szarości. W wyniku tego postępowania uzyskano dane liczbowe z zakresu 0 – 256 (skala poziomu szarości), które poddawano analizie matematycznej w programach MS Excel i Matlab [53], [106]. Dzięki zastosowaniu powyższych analiz możliwe było

rozpoznawanie poszczególnych struktur oraz wyznaczenie prędkości i udziału objętościowego fazy gazowej.

Na poniższym schemacie (rys. 8.1) przedstawiono tok postępowania od momentu wizualizacji przepływu do końcowych wyników.



Rys. 8.1. Algorytm badań przepływu. Linią ciągłą oznaczono etapy badań, linia przerywaną ich rezultaty a linią podwójną wykorzystane narzędzia.

8.1. Histogram wyrównania

Jedną z metod poprawy jakości obrazu, istotnej w przypadku rejestracji procesów szybkozmiennych, jest redukcja prześwieleń bądź niedoświeleń rejestrowanego obszaru badawczego [74]. W tym celu zastosowano procedurę wyrównania histogramu. Pod pojęciem

histogramu obrazu należy rozumieć statystyczny rozkład poszczególnych poziomów jasności występujących na badanym obrazie [105]. Algorytm wyrównania polega na dostosowaniu obwiedni histogramu aby wszystkie poziomy szarości występujące na retuszowanym obrazie występowały w jednakowej ilości [64], [79].

Końcowym efektem stosowania histogramu jest poprawienie jakości obrazu w tym jego wyrazistości i kontrastowości, podczas gdy sam obiekt nie ulega zmianie. Konwersja ta ma charakter globalny i oddziałuje na wszystkie piksele tworzące dany obraz.

Histogram jest funkcją $hist(G)$, zatem definiuje się go w następujący sposób [105] :

$$hist(G) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} pix(G, m, n) \quad (8 - 1)$$

gdzie:

$$pix(G, m, n) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } G(m, n) = G \\ 0 & \text{gdy } G(m, n) \neq G \end{cases} \quad (8 - 2)$$

$pix(G, m_1, n_1)$ -piksel o współrzędnych m_1, n_1 i poziomie szarości G

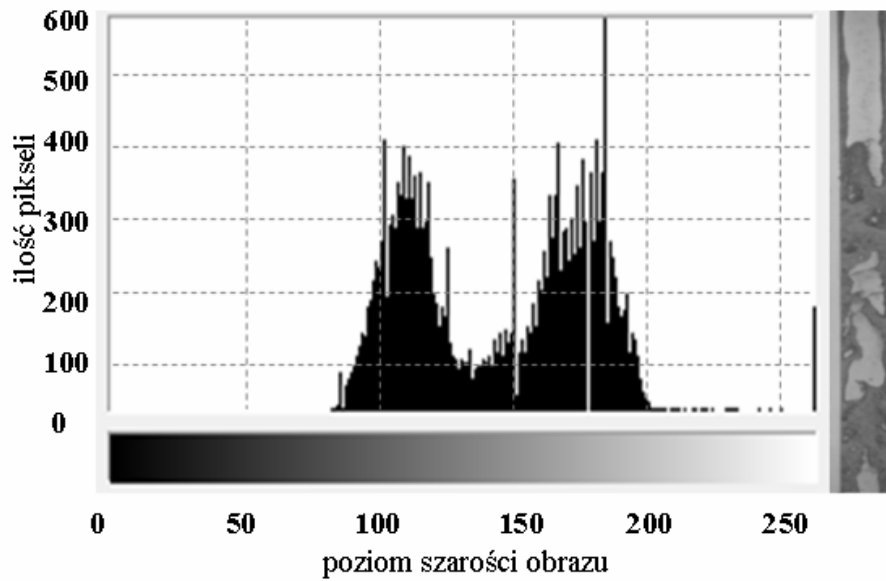
M_1, N_1 -liczba elementów zbioru

Składowe funkcji $hist(G)$, określają liczbę pikseli o poziomie szarości G występujących na obrazie. Wyrównanie histogramu, polega na zmianie położenia kolejnych prążków zawierających liczby pikseli o danym stopniu szarości wzdłuż poziomej osi, odpowiadającej stopniom szarości poszczególnych pikseli. Założenie jest takie, że dla pewnych liczb całkowitych a i b należących do dziedziny funkcji $hist(G)$, musi zostać spełniony warunek $hist(a) > 0$ i $hist(b) > 0$ i równocześnie $hist(G) = 0$ dla wszystkich $a < G < b$, wtedy należy tak przemieszczać punkty a i b , aby zminimalizować wartość α wyznaczoną ze wzoru:

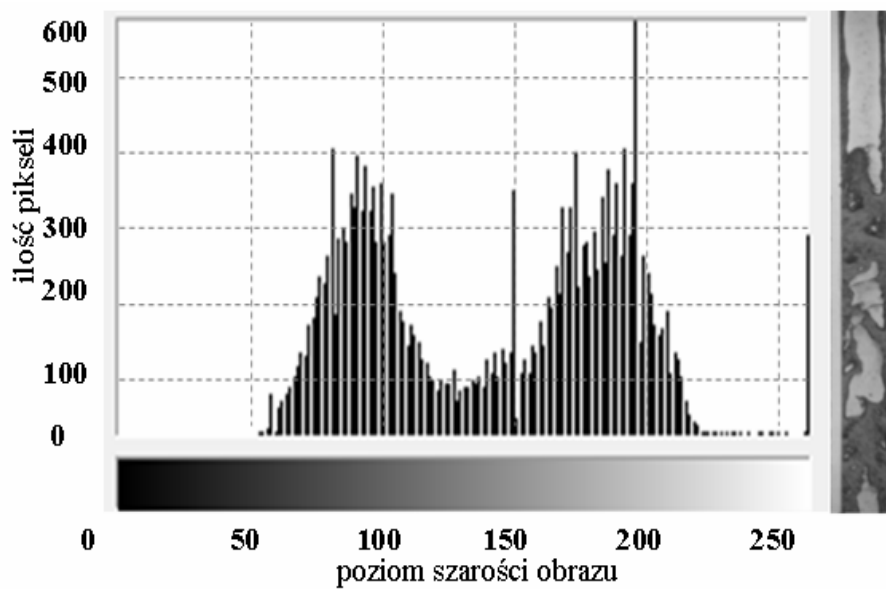
$$\alpha = \left| \frac{1}{2^8 - 1} \sum_{G=0}^{2^8-1} hist(G) - \frac{hist(a)}{b - a} \right| \quad (8 - 3)$$

α – wskaźnik jakości histogramu

W rezultacie otrzymuje się rozciągnięcie histogramu obrazu w obszarach występowania maksimum oraz zagęszczenie w miejscach o słabszym kontraście. Na poniższych rysunkach (rys. 8.2, 8.3) przedstawiono przykładowy obraz wraz z jego histogramem przed i po operacji wyrównania.



Rys. 8.2. Przykładowy obraz i jego histogram przed wyrównaniem



Rys. 8.3. Przykładowy obraz i jego histogram po wyrównaniu

W literaturze dotyczącej przetwarzania obrazów można odnaleźć szereg metod i algorytmów o czym świadczą prace: [40], [49], [65], [99], [100], [101].

8.2. Test stacjonarności

Stacjonarność sygnałów jest istotna z tego powodu, iż metody analizy sygnału niestacjonarnego, są ogólnie bardziej skomplikowane, niż odpowiednie metody stosowane dla sygnału stacjonarnego.

Najprostszą metodą weryfikacji hipotezy o stacjonarności sygnału losowego jest rozpatrzenie zasady fizycznej zjawiska powodującego powstawanie danego sygnału. Jeżeli podstawowe czynniki fizyczne generujące to zjawisko są niezmiennie w czasie to ogólnie można przyjąć bez dodatkowych badań, że wynikający stąd sygnał jest stacjonarny [4].

W praktyce dane dotyczące sygnału są często gromadzone w warunkach, które nie pozwalają na założenie o stacjonarności w oparciu o bezpośrednie rozpatrywanie zjawiska fizycznego. W takim przypadku stacjonarność sygnału musi być zweryfikowana za pomocą badań jego dostępnych realizacji. Weryfikację taką można przeprowadzić począwszy od optycznego sprawdzenia realizacji przez wprawnoego analityka, a skończywszy na szczegółowych testach statystycznych odpowiednich parametrów sygnału. W każdym przypadku należy wysunąć pewne istotne hipotezy jeżeli stacjonarność ma być wydedukowana na podstawie badania poszczególnych realizacji:

- po pierwsze trzeba założyć, że każda realizacja będzie we właściwy sposób odzwierciedlać niestacjonarny charakter rozpatrywanego procesu losowego,
- po drugie należy założyć, że każda obserwacja sygnału jest dostatecznie długa w porównaniu z okresem składowej sygnału o najniższej częstotliwości, wyłączając przy tym średnią niestacjonarną.

Poza tymi podstawowymi zależnościami wygodne jest dalsze założenie, że każda istotna niestacjonarność będzie ujawniona przez czasowy trend wartości średniokwadratowej sygnału [4].

Mając na względzie powyższe założenia, można badać niestacjonarność sygnału losowego przez rozpatrywanie pojedynczej obserwacji $x(t)$ w następujący sposób:

1. Należy podzielić dany sygnał obserwowany na N jednakowych przedziałów czasu tak, aby przebiegi w każdym przedziale mogły być uważane za niezależne.

2. Należy wyznaczyć wartość średniokwadratową dla każdego przedziału i uszeregować te wartości próbek w następujący ciąg: $\overline{x_1^2}, \overline{x_2^2}, \overline{x_3^2}, \dots, \overline{x_N^2}$.
3. Zbadać ciąg wartości średniokwadratowych pod względem obecności podstawowego trendu lub innych zmian niż te, które wynikają z oczekiwanej zmienności losowej [4].

Na podstawie powyższych założeń test można przeprowadzić na dwa sposoby:

Weryfikacja parametryczna wymaga znajomości składowych widma sygnału, co często jest niemożliwe, ze względu na to, iż do końca nie jest rozstrzygnięte, czy proces jest stacjonarny.

Weryfikacja nieparametryczna, nie wymaga znajomości rozkładu z próby parametrów sygnału, dlatego też jest dogodniejsza w stosowaniu.

W niniejszej pracy przeprowadzono nieparametryczny test zgodności, oparty na teorii serii [104]. Serię zdefiniowano jako sekwencję identycznych obserwacji, która następuje lub poprzedza inną obserwację lub nie poprzedza w ogóle żadnej obserwacji. Rozpatrując ciąg N obserwowanych wartości zmiennej losowej, każdą obserwację klasyfikuje się do dwóch wzajemnie wykluczających się kategorii (przykładowo do „1” lub „0”). Jeżeli zostanie zaobserwowane, iż prawdopodobieństwo wyników „0” i „1” nie zmienia się przy przejściu z jednej obserwacji sygnału do drugiej, to rozkład liczby serii jest zmienną losową o następującej wartości średniej:

$$\bar{x} = \frac{2N_1N_2}{N} + 1 \quad (8 - 4)$$

i wariancji:

$$\sigma_x^2 = \frac{2N_1N_2(2N_1N_2 - N)}{N^2(N - 1)} + 1 \quad (8 - 5)$$

gdzie:

N_1 i N_2 odnoszą się do liczby obserwacji „1” oraz „0”

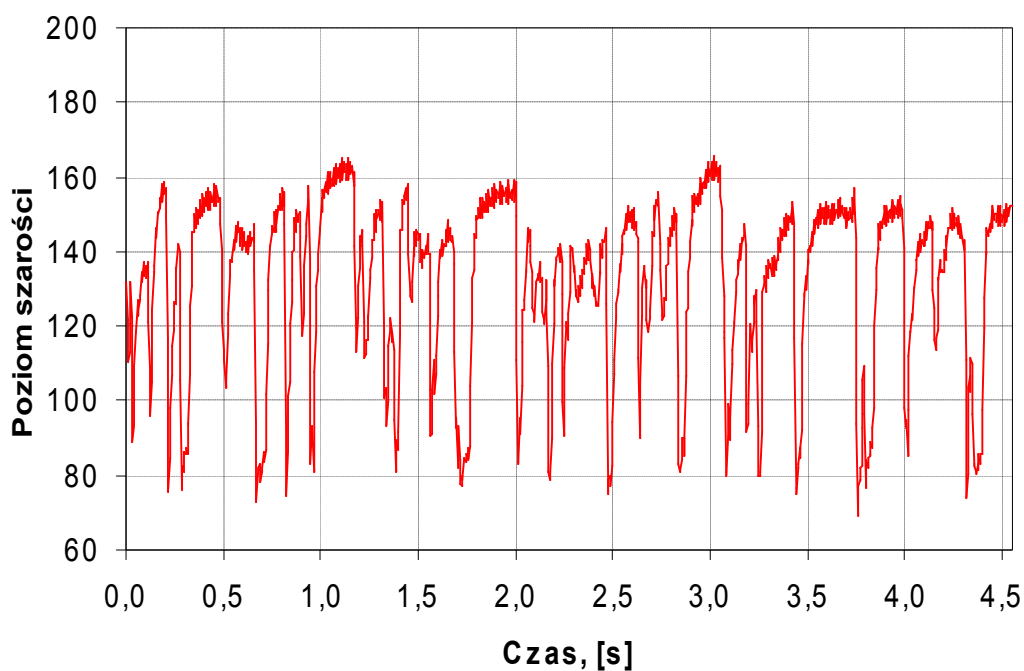
Rozpatrując dalej ciąg wartości średniokwadratowych zakłada się, iż każda z wartości jest niezależna i stanowi realizację zmiennej losowej o wartości średniokwadratowej. Natomiast jeżeli wartości sygnałów będą miały charakter losowy

i nie wykażą trendu wartości średniokwadratowej, to proces będzie stacjonarny. Liczba serii w odniesieniu do mediany, będzie wtedy identyczna jak dla ciągu niezależnych obserwacji zmiennej losowej.

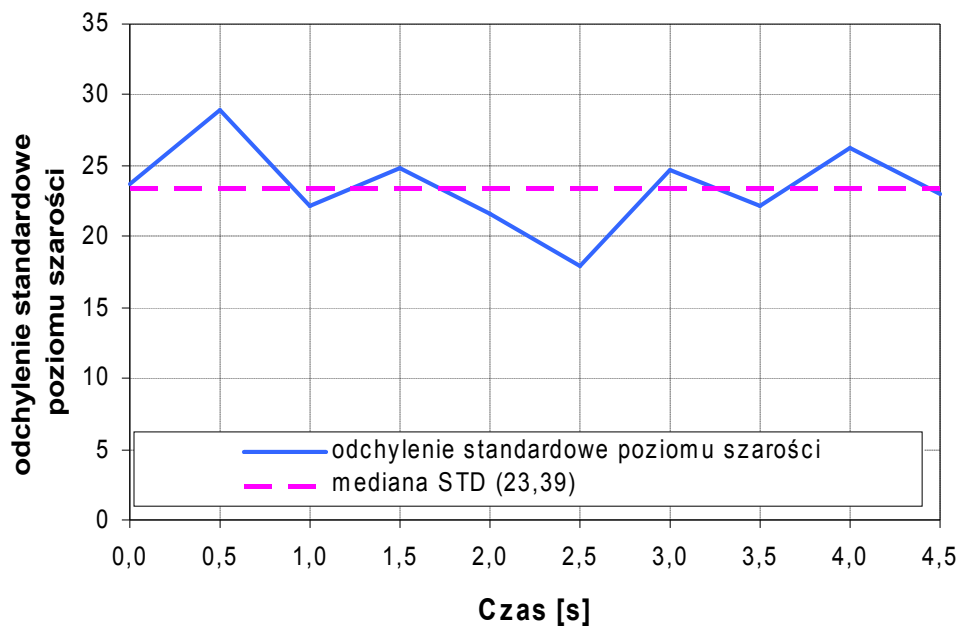
Jeżeli liczba serii znacznie różni się od oczekiwanej liczby odczytanej z tablic [7], wtedy hipoteza o stacjonarności powinna zostać odrzucona.

W prezentowanej pracy, analizie poddano wartość odchylenia standardowego z wybranego ciągu fluktuacji poziomu szarości (rys. 8.4). Sygnał o czasie trwania 4,48 s, podzielono na 9 równych odcinków o jednakowym czasie trwania (prawie 0,448 s). Dla poszczególnych odcinków wyznaczono kolejno odchylenia standardowe (STD), natomiast wartość mediany odchylenia standardowego została ustalona na poziomie 23,39.

Przyjmując hipotezę o stacjonarności procesu przepływu dwufazowego, dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, należy oczekiwać, iż liczba serii zaobserwowanych w ciągu odchyleń standardowych względem mediany (dla $N/2=5$), powinna przyjmować wartości z zakresu od 3 do 8. Z rys. 8.5 wynika, że takich serii jest 8, co przy 5-procentowym poziomie istotności powoduje, że hipoteza o stacjonarności jest spełniona.



Rys. 8.4. Przykładowy ciąg wartości poziomów szarości zmiennych w czasie



Rys. 8.5. Test stacjonarności na przykładzie wybranego ciągu zmian poziomu szarości

8.3. Dobór odpowiedniego obszaru badawczego

Cyfrowa analiza obrazu wymaga doboru reprezentatywnego dla badanego procesu obszaru gdyż zagadnienie to ma istotny wpływ na wyniki badań oraz dokładność analizy. Obszar badawczy może stanowić punkt, odcinek, powierzchnia lub objętość zatem wnioskowanie na temat struktury przepływu na podstawie dynamiki procesu wymaga wysokiej staranności podczas jego doboru [40], [95].

Istnieją dwie drogi doboru obszaru badawczego:

1. Dla pomiarów globalnych – stosuje się **obszary powierzchniowe**, które są rozmieszczone na całej powierzchni analizowanego obrazu.
2. Dla pomiarów lokalnych – stosuje się **obszary punktowe** umiejscowione w wybranym obszarze o powierzchni dopasowanej do wielkości badanych obiektów np. pęcherza gazowego.

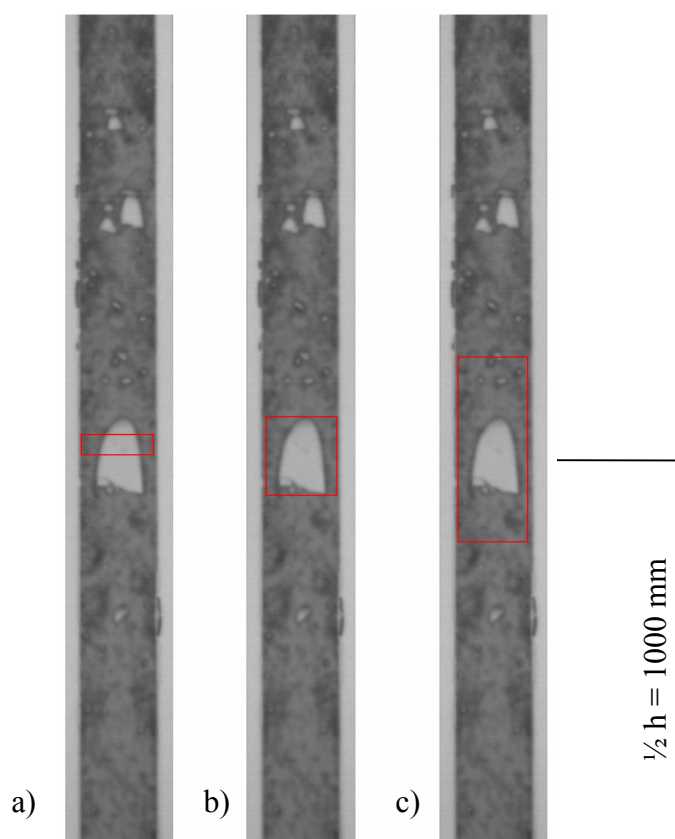
Stosując drugą drogę doboru obszaru, zazwyczaj umieszcza się kilka obszarów punktowych rozmieszczonych w równej odległości od siebie. Ta metoda pomimo wydłużonego czasu analizy uchodzi za najbardziej uniwersalną dlatego też w niniejszej pracy zastosowano punktowe obszary do analizy obrazu.

Dobór konkretnego obszaru jest zagadnieniem złożonym dlatego też decyzję o wielkości i kształcie obszaru pomiarowego podjęto na podstawie analizy eksperymentalnej na rzeczywistym stanowisku badawczym.

W celu uzyskania jak najdokładniejszych wyników analiz, przy danych wartościach przepływu analiza została przeprowadzona dla trzech obszarów badawczych. Do porównania służyły trzy obszary o wysokości: 10, 50 i 100 pikseli (rys. 8.6) oraz całej szerokości kanału.

W przypadku obszaru badawczego o szerokości 10 pikseli pomiar koncentracji faz nabrał charakter pomiaru lokalnego. Przy obszarze o szerokości 100 pikseli pomiar charakteryzował się wysokim współczynnikiem spłaszczenia (kurtoza) skupiając dane wokół średniej, czego efektem było wysmuklenie krzywej charakteryzującej koncentrację faz.

Do dalszych analiz dobrano obszar o wysokości 50 pikseli, który uznano za najbardziej reprezentatywny.



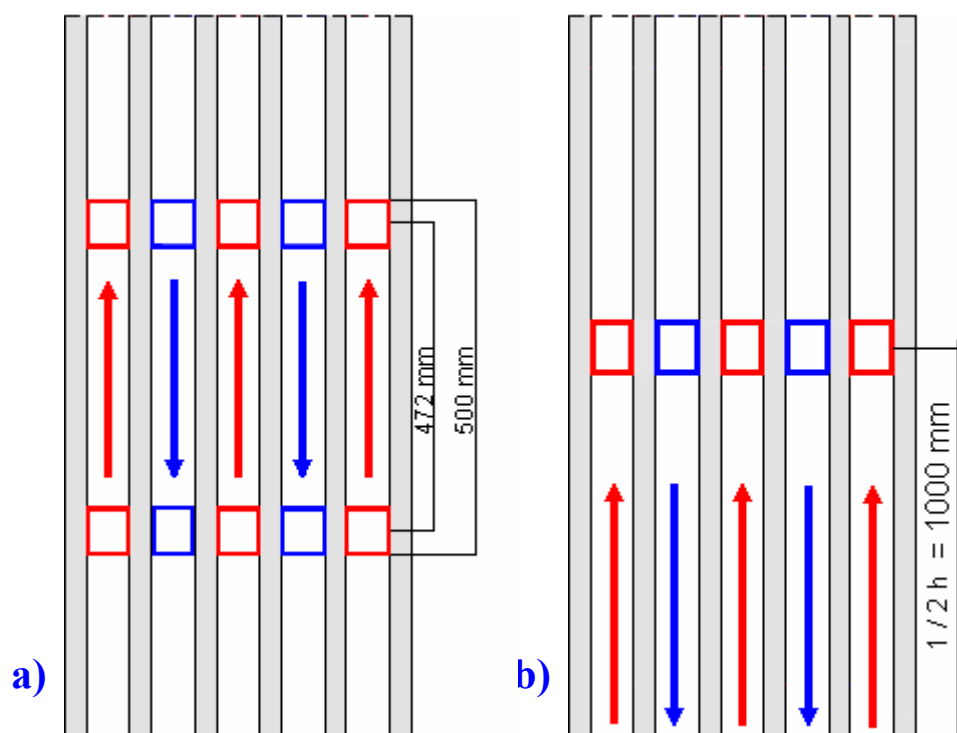
Rys. 8.6. Położenie obszarów badawczych na tle pojedynczego kanału w aparacie węzownicowym; a) 20 pikseli, b) 50 pikseli, c) 100 pikseli

Podczas doboru obszaru badawczego kierowano się również:

- rodzajem przepływu (gaz-ciecz, gaz-ciało stałe),
- parametrami fizycznymi przepływu (prędkość strumienia wymuszającego przepływ, stosunek ilościowy faz),
- rodzajem kanału (kształt, długość),
- charakterem prowadzonych badań (wyznaczanie parametrów lokalnych lub globalnych).

Dobrano dwa typy rozkładu obszarów pomiarowych:

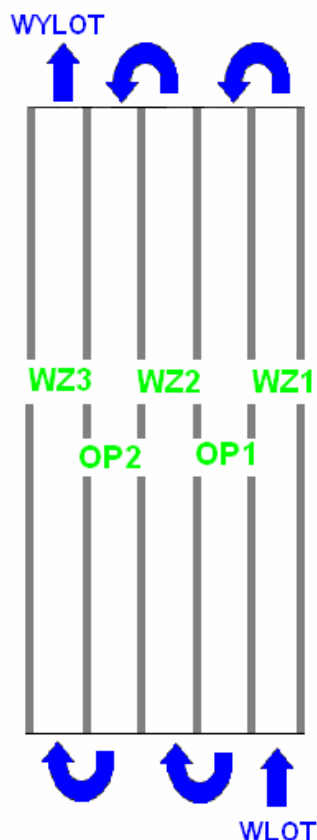
1. Równoległy ciąg pojedynczych obszarów umiejscowionych na środku kanału pomiarowego, w celu identyfikacji struktur przepływu na podstawie zmian poziomów szarości w czasie (rys. 8.7.b)
2. Dwa równoległe ciągi pojedynczych obszarów oddalone od siebie o 860 pikseli (472 mm), umiejscowione na środku kanału badawczego w celu wyznaczenia prędkości struktury gazowej (rys. 8.7.a)



Rys. 8.7. Rozmieszczenie obszarów pomiarowych do: a) wyznaczenia prędkości fazy gazowej, b) określania zmian poziomów szarości

W celu usystematyzowania wyników badań określono kolejne kanały (rys. 8.8) wznoszące za pomocą oznaczeń „WZ”. Zatem pierwszy kanał (wlotowy) opisano symbolem WZ 1 co oznacza „wznoszący pierwszy” i analogicznie kolejne dwa – „wznoszący drugi” (WZ 2) i „wznoszący trzeci” (WZ 3).

Podobnie jak dla kierunku wznoszącego oznaczono kolejne kanały opadające oznaczeniami „OP”. W tym przypadku pierwszy kanał, w którym występuje przepływ opadający oznaczono *OP 1* (opadający pierwszy) a kolejny *OP 2* (opadający drugi).



Rys. 8.8. Oznaczenie kolejnych kanałów aparatu węzowniczego

8.4. Analiza obrazu

Narzędzie wykorzystane do cyfrowej analizy obrazu stanowił program „Rozpoznawanie impulsów”. Program ten zlicza średni poziom szarości każdej z tysiąca klatek filmowych, w zadanym obszarze badawczym.

Podczas analizy obrazu program „Rozpoznawanie Impulsów” dokonuje przetwarzania informacji zawartych w obrazie i generuje wyniki w postaci plików zawierających dyskretny, czasowy zapis zmienności cechy, w postaci szeregów numerycznych [26].

W kolejnym etapie obróbki wyników badań, szeregi numeryczne umożliwiają zastosowanie analizy stochastycznej procesów zachodzących w aparacie węzownicowym.

8.4.1. Fluktuacje poziomu szarości

W celu określenia fluktuacji poziomów szarości analizowano w dziedzinie czasu, zgodnie z równaniem (8-6) średni udział powierzchniowy M , reprezentowany średnim poziomem szarości pikseli na powierzchni prostokątnego obszaru analizy o współrzędnych (l, m) , (n, o) .

Cecha M - stanowi wartość średnią z poziomów jasności pikseli znajdujących się wewnątrz badanego obszaru. Wartość ta zawsze mieści się w przedziale od 0 do 255 i można ją opisać za pomocą poniższej zależności:

$$M_k = \frac{1}{(n-l)(o-m)} \sum_{j=l}^n \sum_{i=m}^o p_{i,j}^k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (8 - 6)$$

gdzie:

(l, m) - współrzędne lewego górnego rogu strefy pomiarowej,

(n, o) - współrzędne prawego dolnego rogu strefy pomiarowej,

$p_{i,j}^k$ - wartość poziomu jasności piksela o współrzędnych (i, j) dla obrazu o numerze k będącego częścią sekwencji zawierającej N obrazów [40].

Cecha ta ma zastosowanie zarówno jako parametr lokalny, jak i globalny. W przypadku zastosowania lokalnego, tzn. dla stosunkowo małych obszarów, jest ona czuła na zjawiska mające niewielkie rozmiary (np. drobne pęcherze), jednak bardzo szybko większe obiekty (np. korek gazowy) są w stanie wprowadzić ten parametr w stan nasycenia [41]. Dla dużych obszarów występuje zjawisko silnego uśredniania, co powoduje wyraźne „spłaszczenie” wyników obserwacji.

9. Wyniki badań

9.1. Jednorodność przepływu mieszaniny dwufazowej w aparacie węzownicowym

W trakcie przepływu mieszaniny dwufazowej gaz – ciecz poprzez pięć równoległych, współpracujących kanałów gdzie naprzemiennie występuje przepływ wznoszący i opadający, w zależności od prędkości obu czynników, występują trzy główne pod względem jednorodności przypadki przepływu:

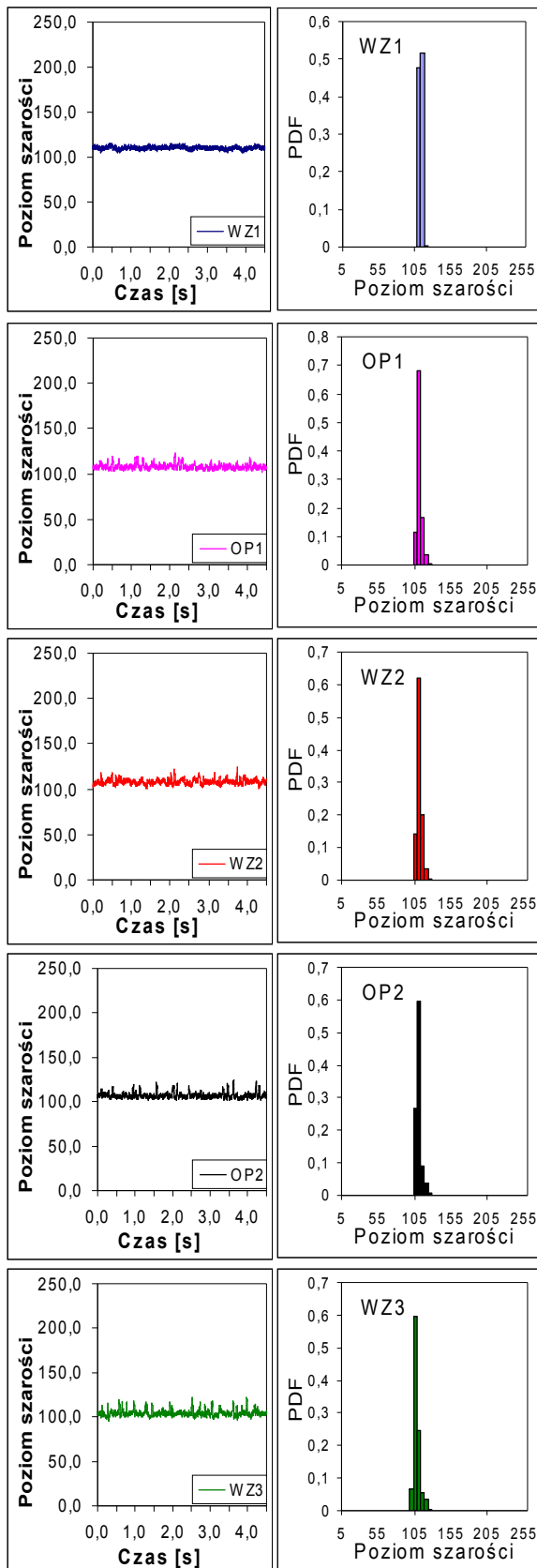
- **Przepływ w pełni jednorodny** – to przypadek, w którym we wszystkich kanałach występuje jednakowa struktura (rys. 9.1).
- **Przepływ stosunkowo jednorodny** – ma miejsce, gdy występuje jednakowa struktura jednakże odmienna w zależności od kierunku przepływu. Przykładowo w kanałach wznoszących występuje struktura korkowa a w opadających pęcherzykowo – filmowa (rys. 9.3).
- **Przepływ niejednorodny** – charakteryzuje się tym, że w każdym z pięciu kanałów występuje inna struktura.

Rodzaj występującego przypadku przepływu jest ściśle związany z prędkością czynników, ponieważ prędkości pozorne faz w kanale węzownicowym pozostają stałe jednak prędkości rzeczywiste struktur gazowych mogą ulegać zmianie i wtedy mieszanina dwufazowa może zmieniać swój charakter.

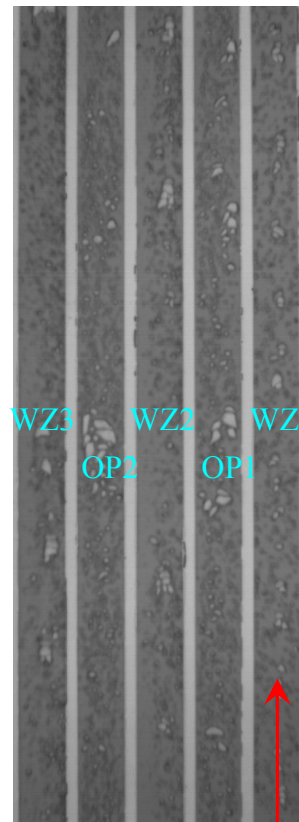
Istnieją również specyficzne przypadki jednorodności przepływu (rys. 9.5). Występują one na pograniczu przejścia pomiędzy jedną strukturą a drugą. Najbardziej obrazowym przykładem takiego zjawiska jest przejście struktury pęcherzykowej w korkową gdzie w kolejnych kanałach pęcherze powietrzne przybierają coraz większe rozmiary i opuszczają aparat węzownicowy w formie korków.

Przy średnich prędkościach gazu do przepływu jednorodnego i stosunkowo jednorodnego możemy zaliczyć przypadek, w którym w pierwszym kanale występuje odmienna struktura niż w pozostałych, ponieważ była ona wymuszana przez dystrybutor.

Przepływ w pełni jednorodny generalnie występuje przy wysokich prędkościach fazy ciekłej natomiast niejednorodny przy niskich prędkościach fazy gazowej. W pozostałym obszarze prędkości występuje przepływ stosunkowo jednorodny i jest zarazem najczęściej występującym przypadkiem niejednorodności przepływu.

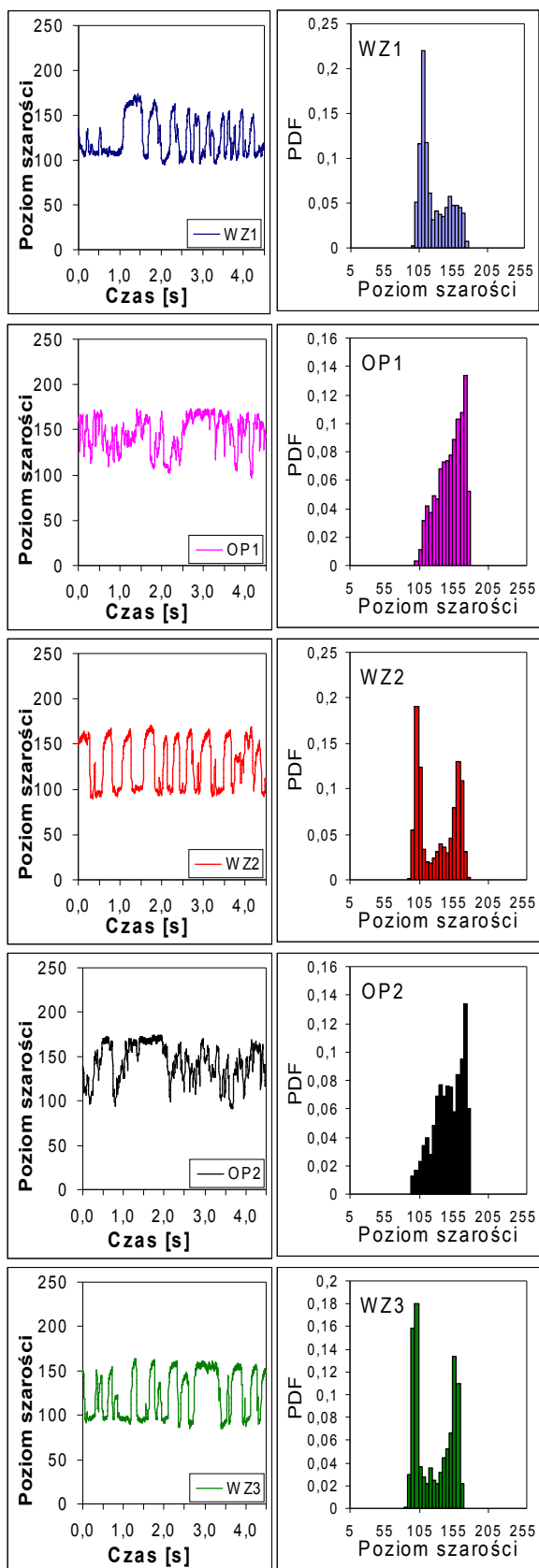


Rys. 9.2. Wykresy zmian przebiegu poziomu szarości w czasie oraz funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla $w_{G0} = 0,18 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$

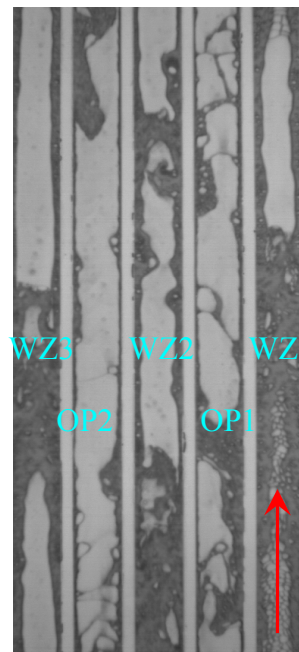


Rys. 9.1. Przepływ w pełni jednorodny, $w_{G0} = 0,18 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$

Przepływ pęcherzykowy jest typowym przykładem przepływu jednorodnego. Wynika to z faktu, że jest on ciągły i nie występują nagłe zmiany koncentracji faz. Ten fakt jest szczególnie istotny w łukach łączących sąsiadujące kanały. Jak widać na rysunku 9.2 zmiany poziomu szarości w czasie nie ulegają dużym wahaniom a kształty funkcji gęstości prawdopodobieństwa są wysoce zbliżone. Zarówno w przypadku przepływu wznoszącego i opadającego struktura pozostaje niezmienną.



Rys.9.4. Wykresy zmian przebiegu poziomu szarości w czasie oraz funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla $w_{G0} = 0,58 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,18 \text{ m/s}$

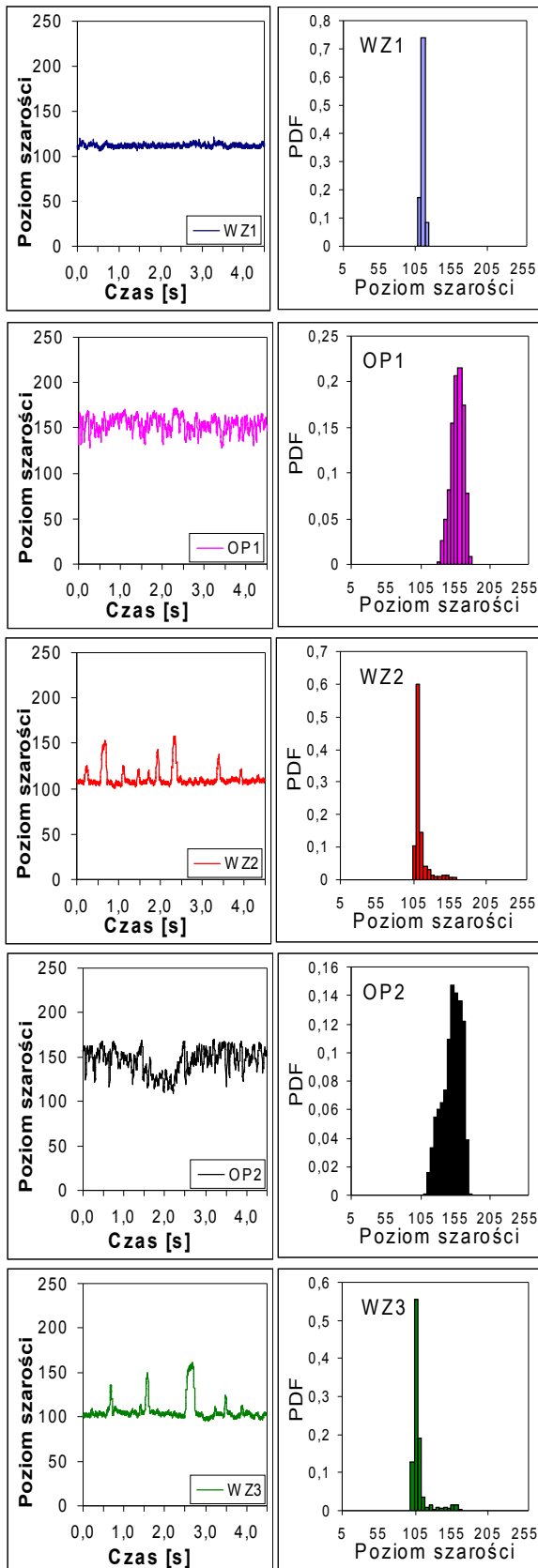


Rys. 9.3. Przepływ stosunkowo jednorodny, $w_{G0} = 0,58 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,18 \text{ m/s}$

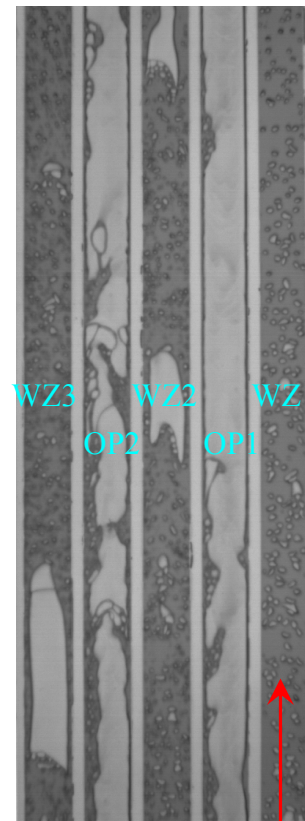
Na niniejszym przykładzie przedstawiono przepływ stosunkowo jednorodny. W kanałach wznoszących obserwowano strukturę korkową natomiast po zmianie kierunku, pęcherzykowo – filmową. W toku badań stwierdzono, że mogą się pojawić pewne charakterystyczne sekwencje, przedstawione w tabeli 9.1.

Tabela 9.1. Obserwowane sekwencje struktur w przepływie stosunkowo jednorodnym.

wznoszący	opadający
B	S
B	BF
P	BF
P	FF
F	S
F	FF
A	F
A	FF



Rys. 9.6. Wykresy zmian przebiegu poziomu szerokości w czasie oraz funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla $w_{G0} = 0,18 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,32 \text{ m/s}$



Rys. 9.5. Specyficzny przypadek przepływu, $w_{G0} = 0,18 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,32$

Na rysunku powyżej przedstawiono przykład specyficznego przypadku przepływu niejednorodnego. Klasyfikacja na podstawie obserwacji wizualnej została poparta analizą przebiegu zmian poziomu szerokości w czasie oraz kształtu widma rozkładu funkcji DPF (rys. 9.6).

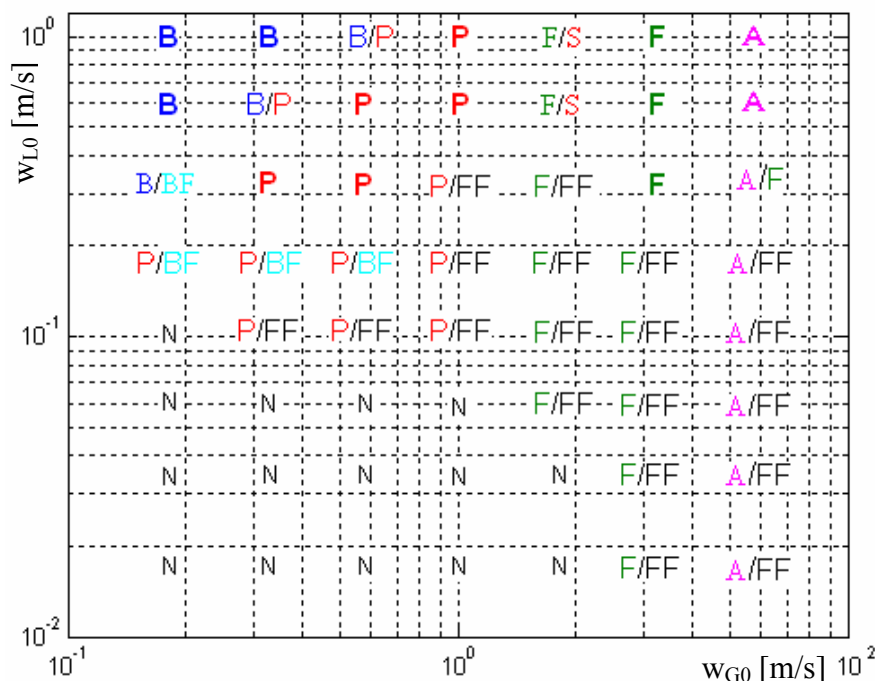
W kanałach wznoszących mieszanina dwufazowa ewoluuje od struktury pęcherzykowej do korkowej natomiast w kanałach opadających obserwowano dwie odmienne struktury: pęcherzykowo – filmową oraz rzutową.

Wyniki badań postanowiono przedstawić w postaci zbiorczej na mapach przepływu. Na poniższych rysunkach (9.7 - 9.9) przedstawiono zakresy występowania wszystkich rodzajów jednorodności przepływu w zależności od rodzaju dystrybutora fazy gazowej. Przepływ w pełni jednorodny oznaczano pojedynczym, pogrubionym symbolem natomiast stosunkowo jednorodny dwoma, przy czym po lewej oznaczano strukturę występującą przy przepływie wznoszącym a po prawej strukturę przepływu opadającego. Przepływ niejednorodny występuje w obszarze uznanym za tryb niepoprawnej pracy aparatu (N) dlatego też zaniechano nanoszenia punktów. Obszar ten, szczególnie z punktu widzenia realizacji poszczególnych procesów, jest niepożądany i nie stanowi przedmiotu zainteresowania w niniejszej pracy.

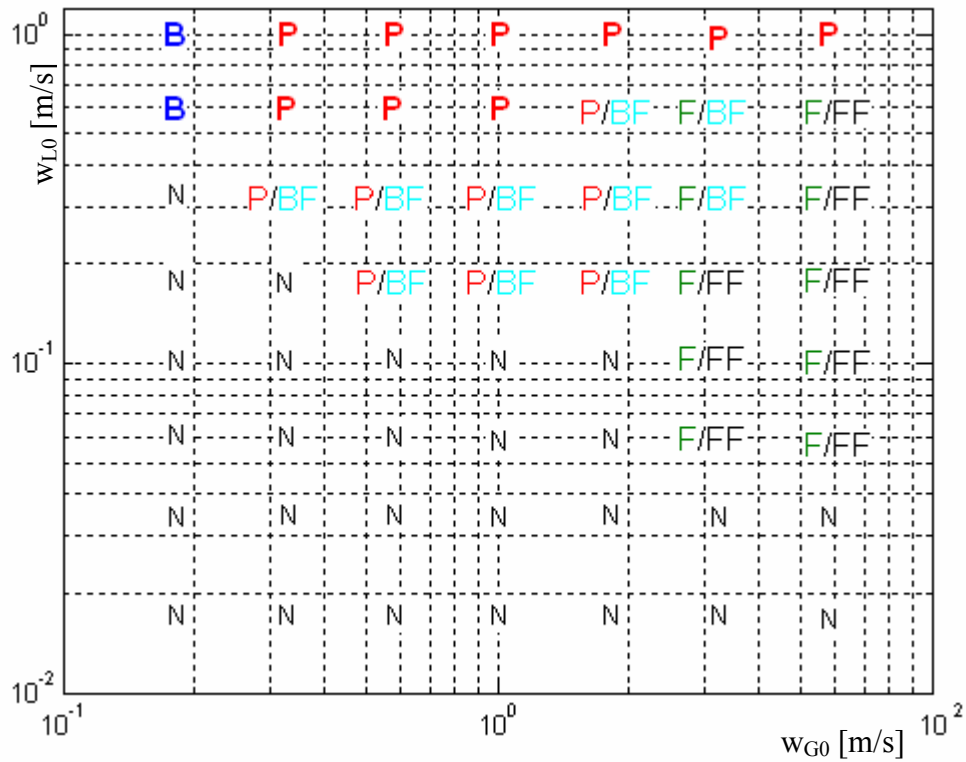
W tabeli 9.2 przedstawiono oznaczenia używane na wykresach w dalszej części rozdziału.

Tabela 9.2. Oznaczenia określające rodzaj struktur przepływu

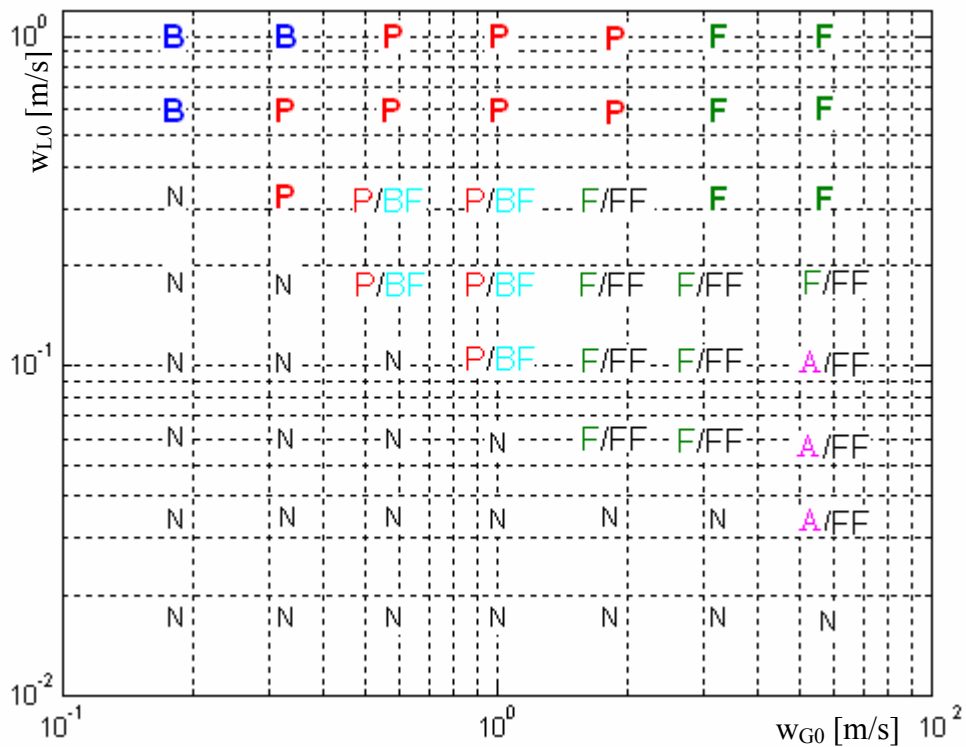
Struktura przepływu	
B	pęcherzykowa
P/S	korkowa / rzutowa
F	pianowa
A	pierścieniowa
BF	pęcherzykowo - filmowa
FF	spluwający film
N	niepoprawna praca aparatu



Rys. 9.7. Obszary występowania poszczególnych przypadków jednorodności przepływu w aparacie węzownicowym. Układ otworkowy.



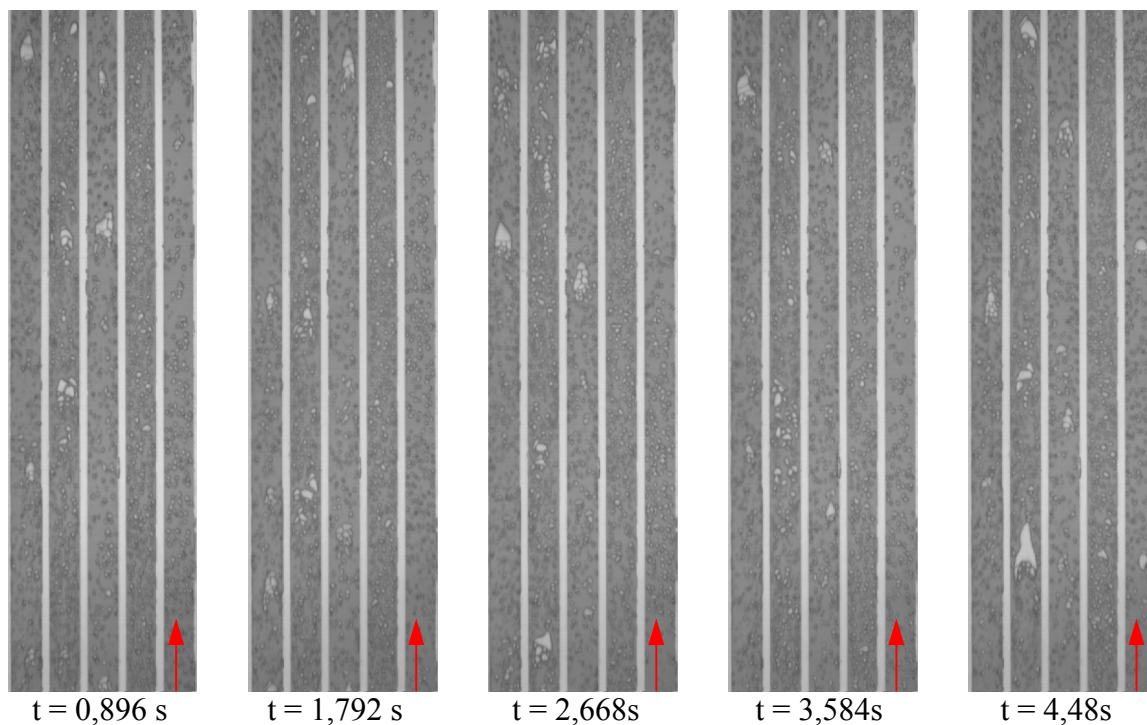
Rys. 9.8. Obszary występowania poszczególnych przypadków jednorodności przepływu w aparacie węzownicowym. Układ szczelinowy.



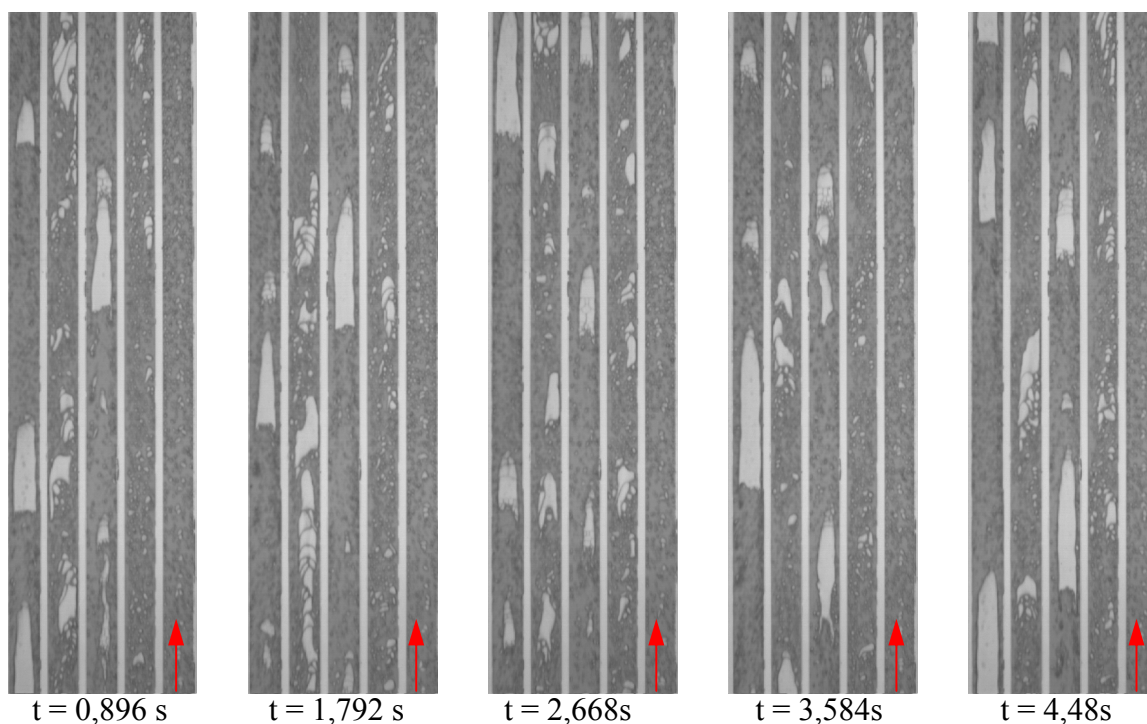
Rys. 9.9. Obszary występowania poszczególnych przypadków jednorodności przepływu w aparacie węzownicowym. Układ porowaty.

Na poniższych rysunkach (9.10 – 9.16) przedstawiono obserwowane zachowania mieszaniny dwufazowej w czasie. Obrazy struktur przedstawiono z odstępem $\tau = 0,896s$

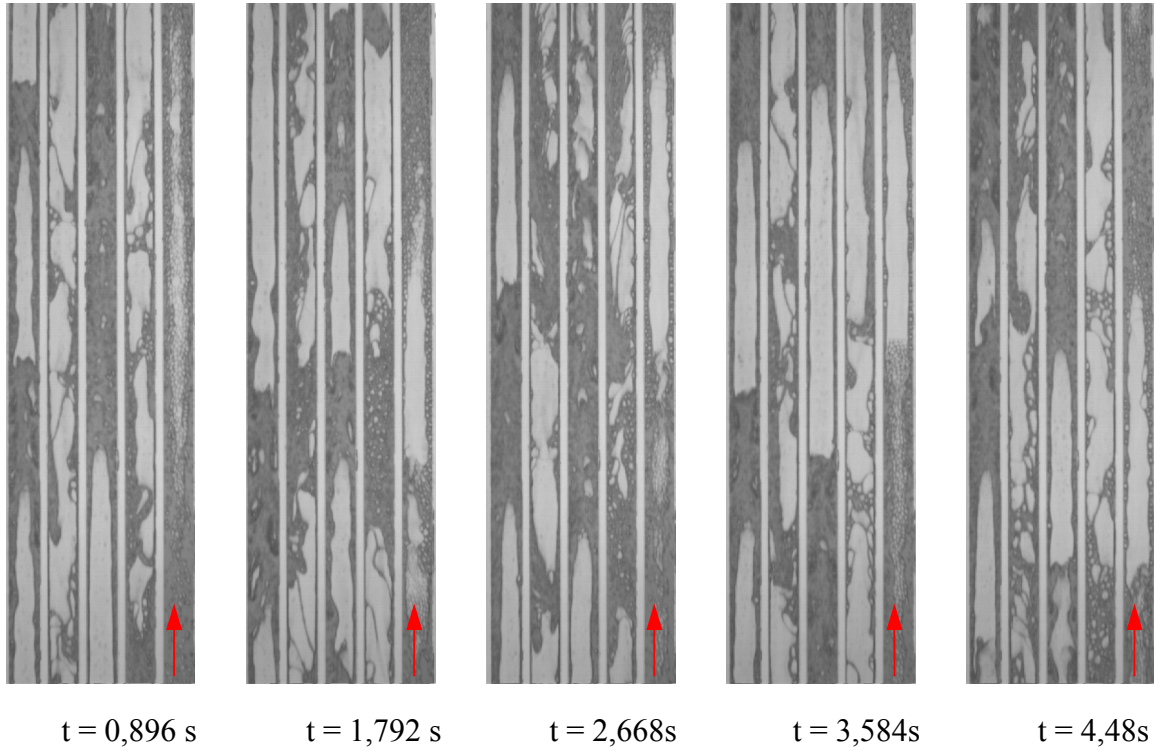
(co 200 klatek) w celu pokazania charakteru zmian podczas całego okresu rejestracji. Czerwoną strzałką oznaczano wlot do aparatu.



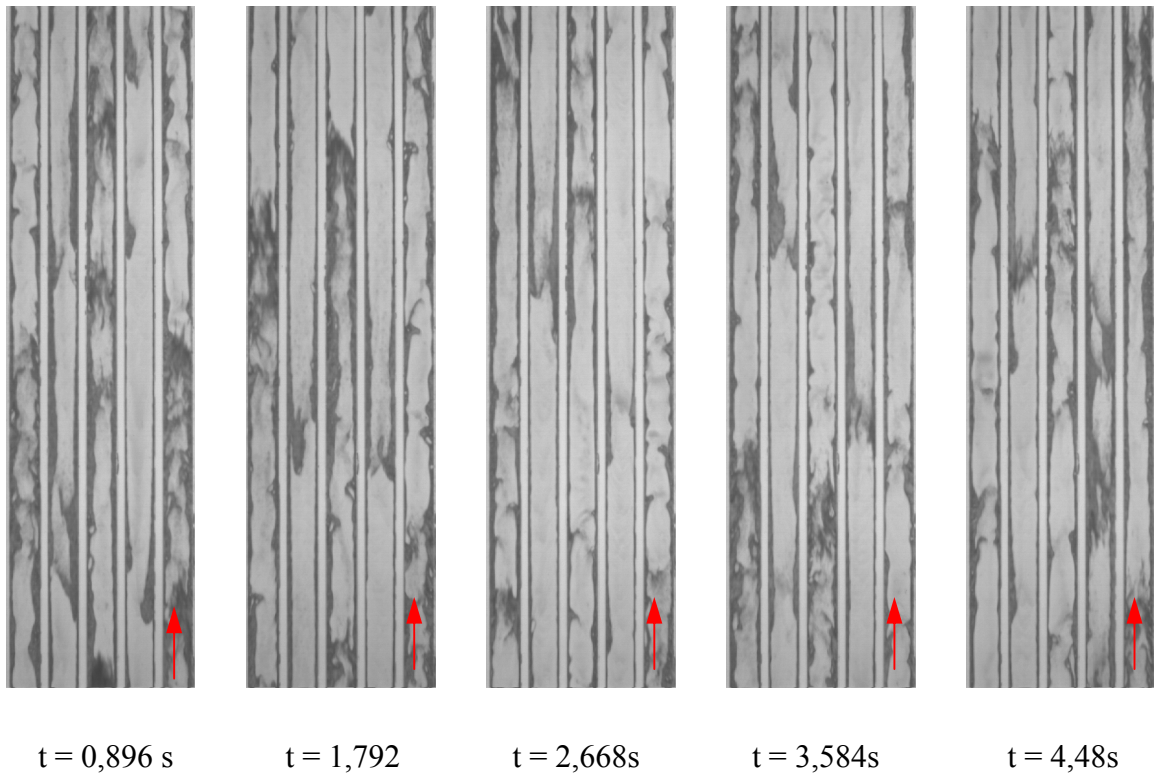
Rys. 9.10. Ewolucja mieszaniny dwufazowej w czasie. Przepływ pęcherzykowy w pełni jednorodny; $w_{G0} = 0,58 \text{ m/s}$, $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$



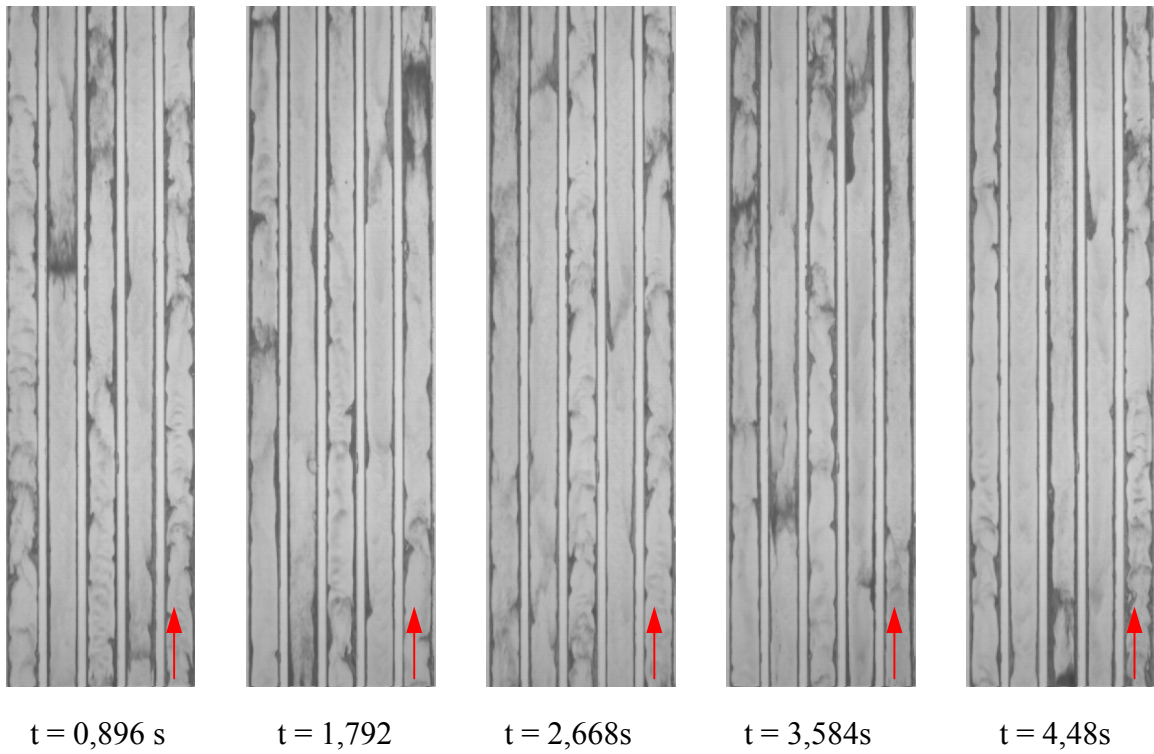
Rys. 9.11. Ewolucja mieszaniny dwufazowej w czasie. Przepływ pęcherzykowy przechodzący w korkowy; $w_{G0} = 0,32 \text{ m/s}$, $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$



Rys. 9.12. Ewolucja mieszaniny dwufazowej w czasie. Przepływ korkowy w pełni jednorodny;
 $w_{G0} = 1 \text{ m/s}$, $w_{L0} = 0,58 \text{ m/s}$



Rys. 9.13. Ewolucja mieszaniny dwufazowej w czasie. Przepływ pianowy w pełni jednorodny;
 $w_{G0} = 3,2 \text{ m/s}$, $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$



$t = 0,896 \text{ s}$

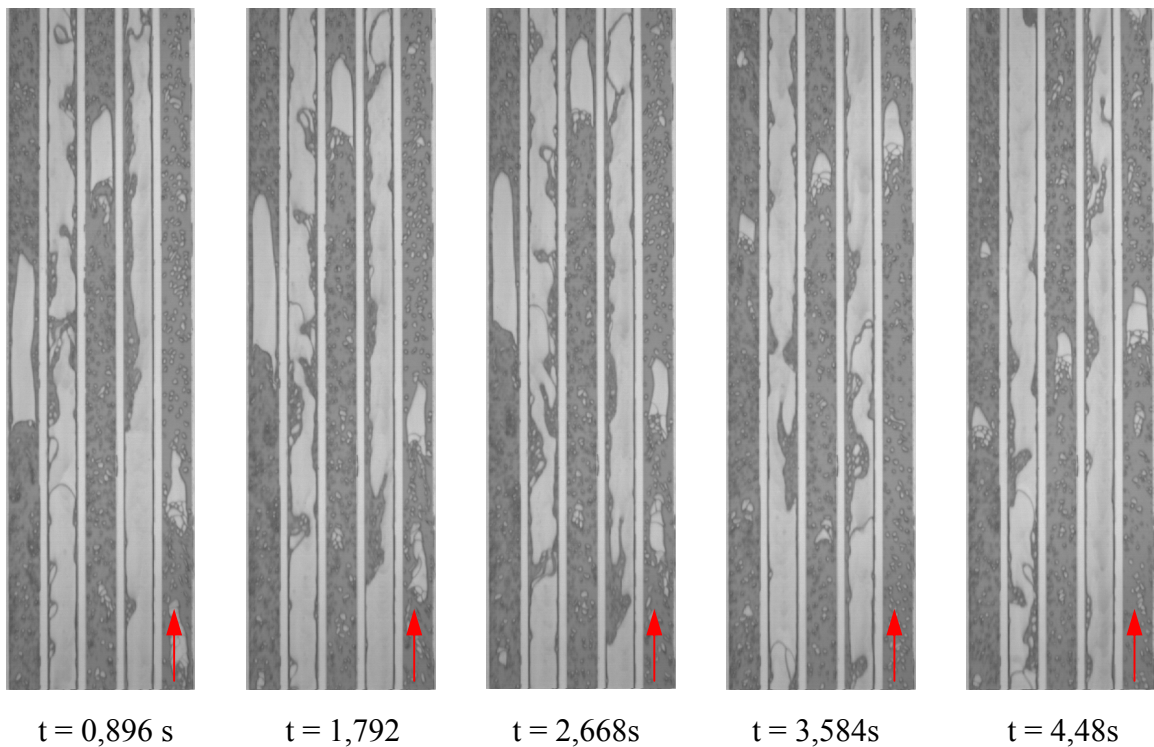
$t = 1,792$

$t = 2,668 \text{ s}$

$t = 3,584 \text{ s}$

$t = 4,48 \text{ s}$

Rys. 9.14. Ewolucja mieszaniny dwufazowej w czasie. Przepływ pierścieniowy w pełni jednorodny; $w_{G0} = 5,8 \text{ m/s}$, $w_{L0} = 0,58 \text{ m/s}$



$t = 0,896 \text{ s}$

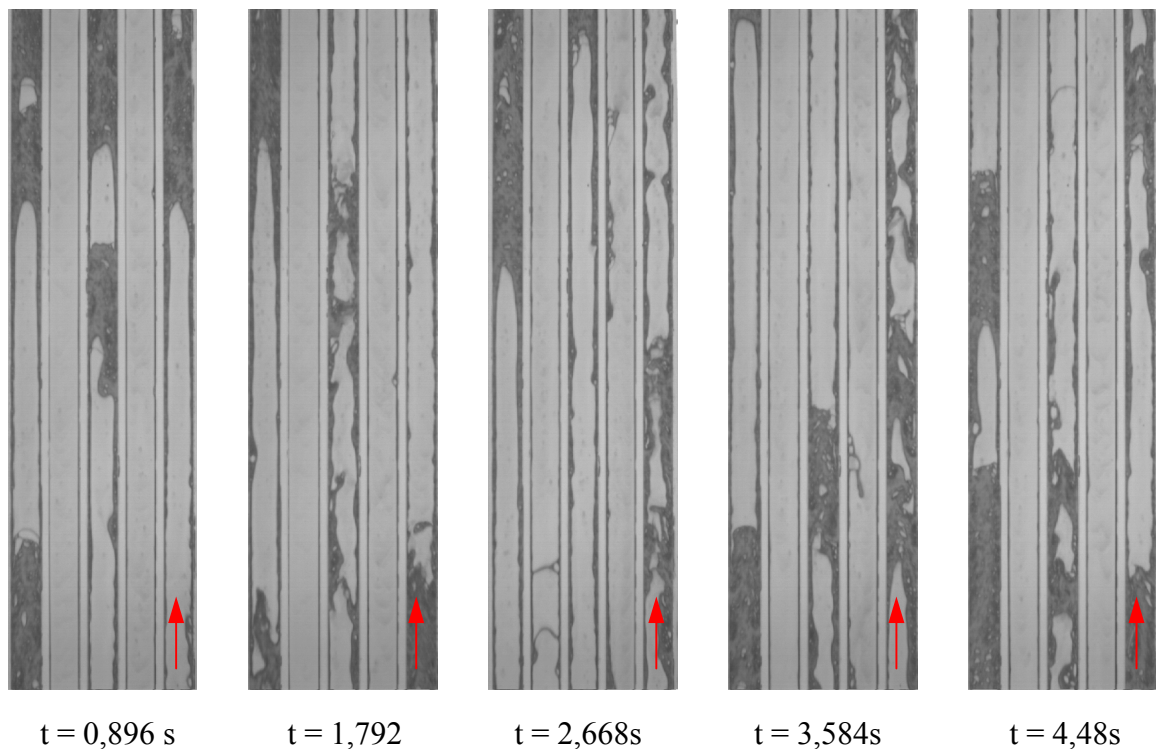
$t = 1,792$

$t = 2,668 \text{ s}$

$t = 3,584 \text{ s}$

$t = 4,48 \text{ s}$

Rys. 9.15. Ewolucja mieszaniny dwufazowej w czasie. Przepływ stosunkowo jednorodny, wznoszący; korkowy, opadający: pęcherzykowo – filmowy; $w_{G0} = 0,58 \text{ m/s}$, $w_{L0} = 0,18 \text{ m/s}$



Rys. 9.16. Ewolucja mieszaniny dwufazowej w czasie. Przepływ stosunkowo jednorodny, wznoszący: korkowy, opadający: spływający film; $w_{G0} = 1 \text{ m/s}$, $w_{L0} = 0,1 \text{ m/s}$

Na przykładzie przepływu pęcherzykowego (rys. 9.10) można zauważyć, że oprócz drobnych pęcherzyków występują również małe korki gazowe. W niniejszej pracy taki przepływ klasyfikowano jako typowo pęcherzykowy ponieważ występowanie tych nielicznych korków o nieznacznych rozmiarach jest spowodowane łączeniem się pęcherzyków w większe formacje (ze względu na ich dużą ilość) a nie tym, iż jest to struktura przejściowa. Podczas przepływu korkowego (rys. 9.11, 9.12, 9.15) występują obiekty gazowe o różnych rozmiarach, może być to powodowane łączeniem się lub pękaniem korków. Widać również różnicę pomiędzy korkiem wznoszącym i opadającym, który ma znacznie bardziej nieregularny kształt, z tego też względu nie można jednoznacznie sklasyfikować struktury jako korkową i proponuje się dla przepływu opadającego używać terminu struktura rzutowa. Barnea [2] klasyfikuje struktury przepływu opadającego jako pierścieniowe w niniejszej pracy rozgraniczono jednak ten rodzaj przepływu na pierścieniowy, pęcherzykowo - filmowy i spływający film ponieważ jak zostało to przedstawione na rysunkach 9.15 i 9.16 struktury te różnią się pomiędzy sobą i w przypadku przepływu pęcherzykowo - filmowego powierzchnia międzyfazowa jest dużo bardziej zafalowana aniżeli w przypadku spływającego filmu czy też przepływu pierścieniowego (rys. 9.14)

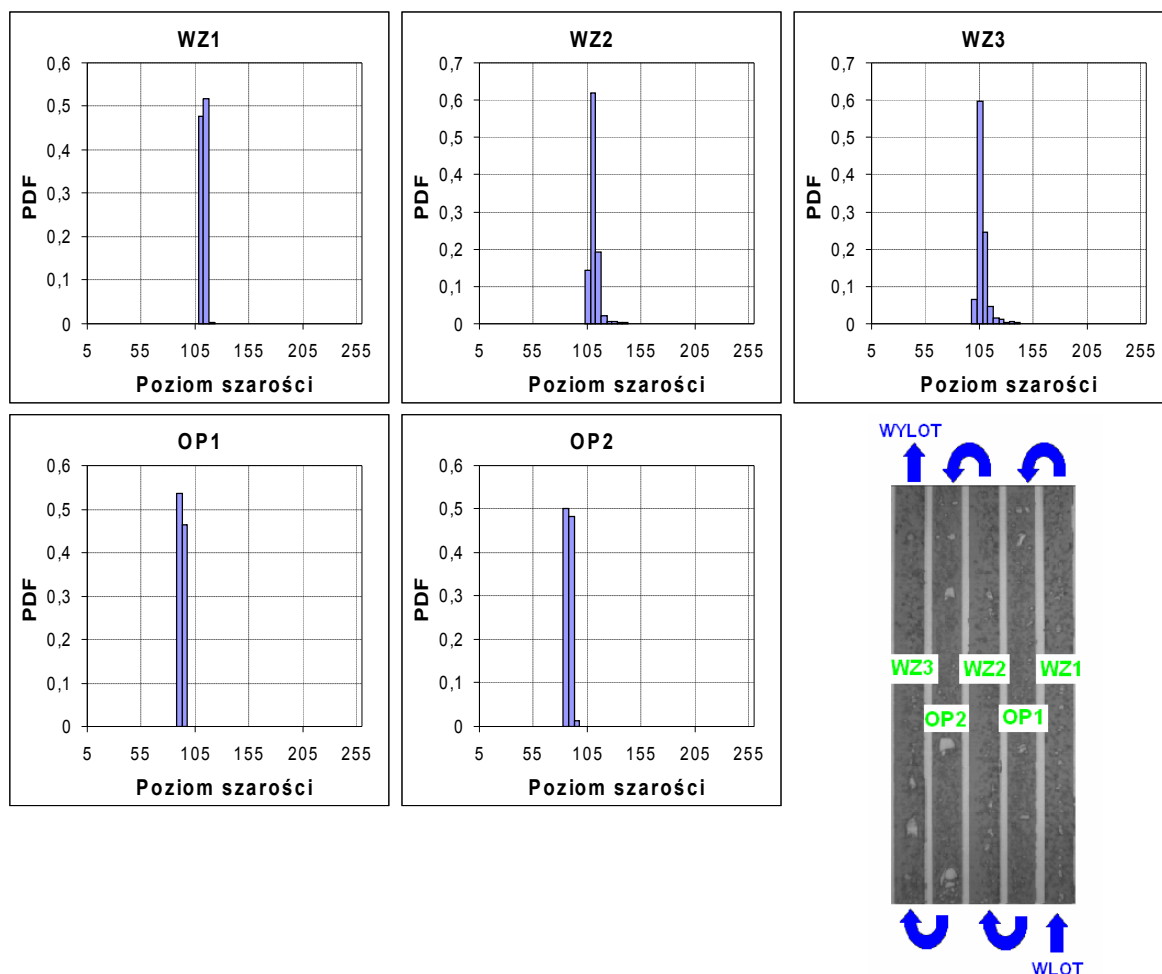
9.2. Identyfikacja struktur przepływu za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa.

W prezentowanej pracy do rozpoznawania struktur zastosowano funkcję stochastyczną, bazującą na przestrzeni probabilistycznej i wartościach mierzalnych. Dziedziną, na której definiowano funkcję był poziom szarości a przedziały histogramu ustalono na szerokości 5. Zatem odcinek 255 skali szarości został podzielony na 51 równych części, w których zliczano prawdopodobieństwo zdarzeń. Wynikiem tego algorytmu obliczeniowego były rozkłady gęstości prawdopodobieństwa, których kształt pozwalał na identyfikację struktur przepływu dwufazowego. Rozkłady te pojawiają się już wcześniej na rysunkach 9.4 - 9.6 ale z uwagi na nieco inny aspekt zamieszczonej tam analizy nie komentowano szczegółowo funkcji PDF.

Metodę tą zastosowano dla wszystkich przebadanych układów dystrybucji co pozwoliło ocenić ich wpływ na charakterystykę hydrodynamiczną zjawisk zachodzących w aparacie.

Do pełnej identyfikacji struktur przepływu bazowano głównie na funkcji PDF, sprawdzano również zgodność z obserwacją wizualną. W przypadku przepływu wznoszącego zgodność wynosiła powyżej 90% co uznawano za wynik bardzo satysfakcjonujący. Jednakże w przypadku przepływu opadającego występowała większa trudność ponieważ zgodność kreowała się na poziomie 75 – 83% w zależności od układu dystrybucji. Za pewnik przyjęto obliczeniową metodę identyfikacji struktur, i mapy przepływu wyznaczono na podstawie analizy funkcji gęstości prawdopodobieństwa a obserwację wizualną traktowano jako potwierdzenie poprawności otrzymanego wyniku.

Poniżej przedstawiono przykładowe rozkłady gęstości prawdopodobieństwa, których poszczególne kształty widm przyporządkowane zostały do odpowiednich struktur.

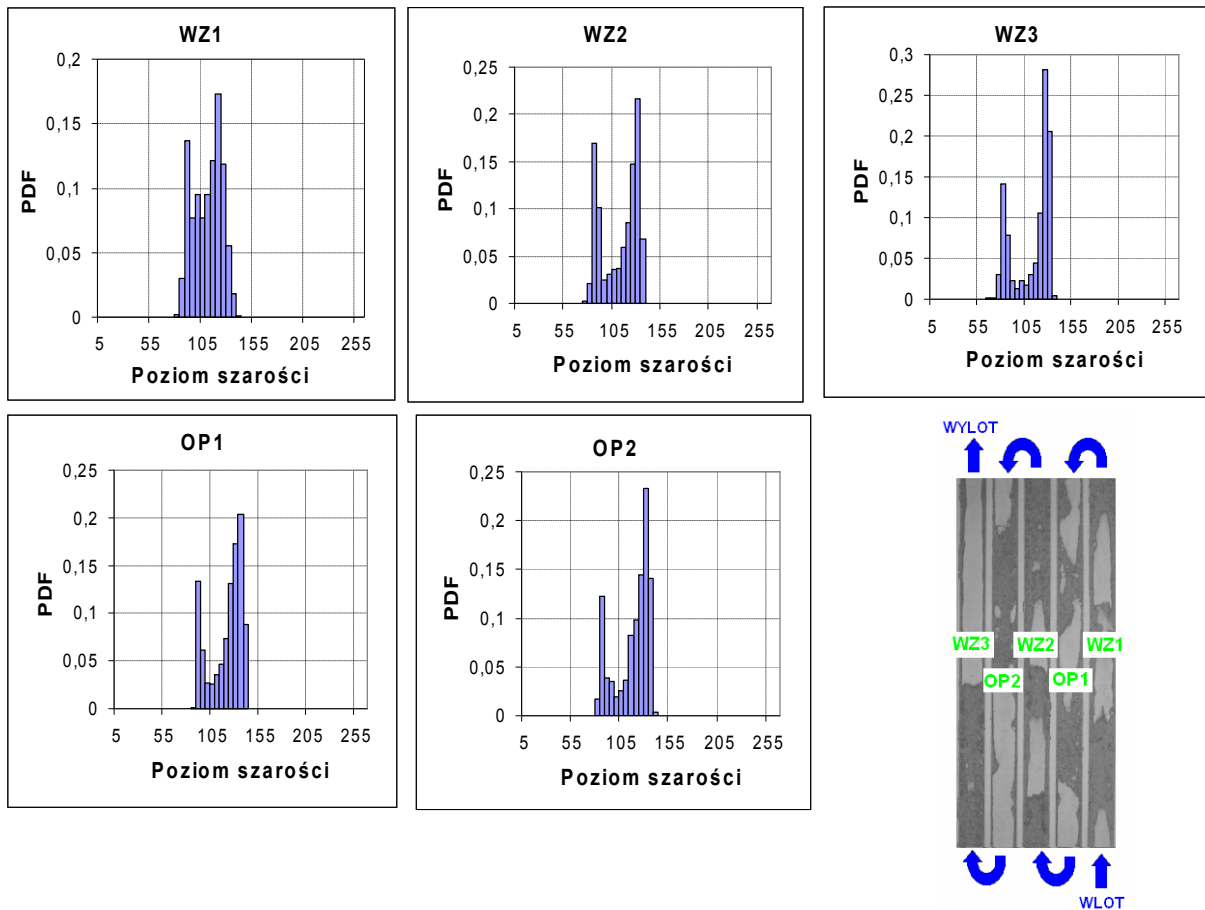


Rys. 9.17. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla kolejnych kanałów aparatu węzownicowego ($w_{G0} = 0,18 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$). STRUKTURA PĘCHERZYKOWA

Struktura pęcherzykowa charakteryzuje się pojedynczym lokalnym maksimum i wąskim zakresem widma.

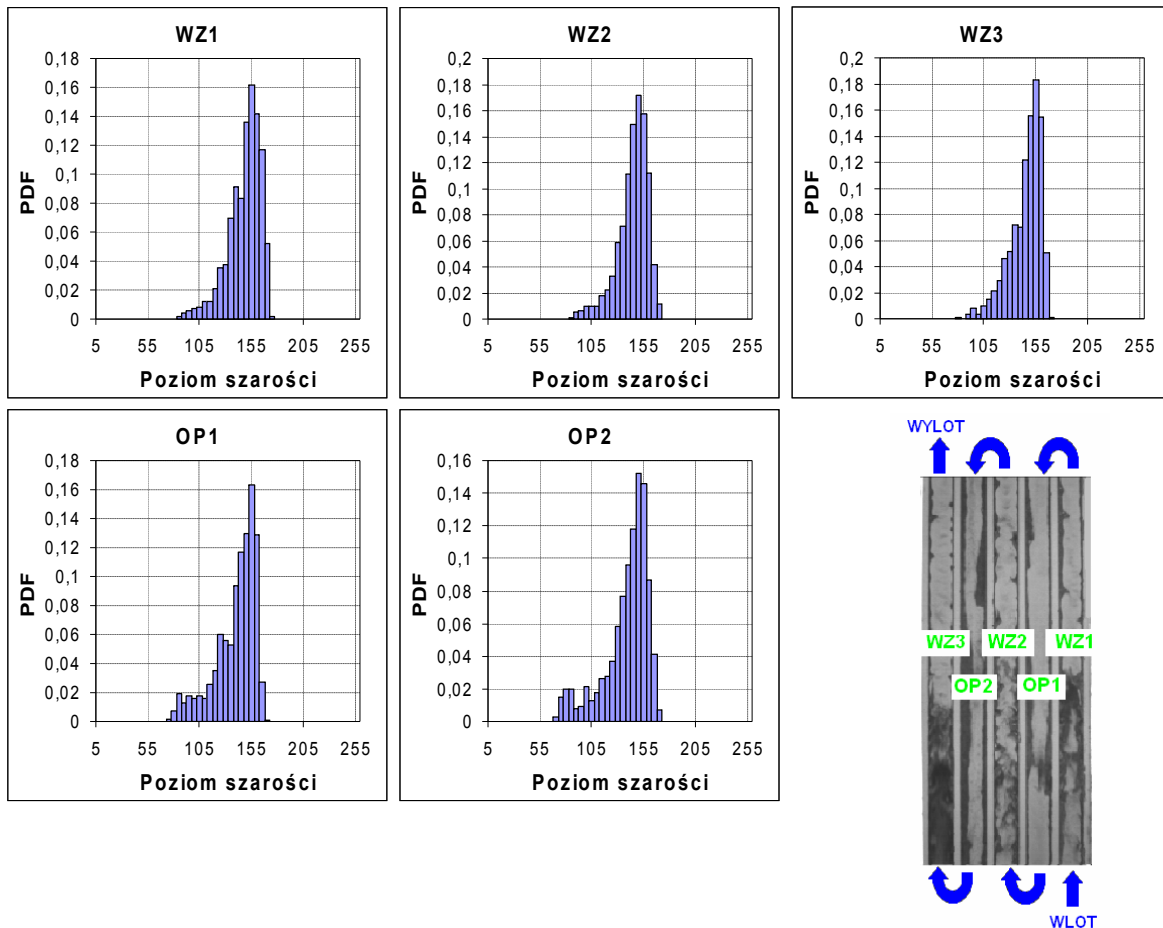
Wysokie piki na histogramie świadczą o występowaniu równomiernej dużej ilości małych pęcherzy. Na rysunku 9.17 dla drugiego i trzeciego kanału wznoszącego oprócz wysokiego maksimum występują również mniejsze piki. Jest to spowodowane tym, że oprócz małych pęcherzy występują również większe formacje gazowe.

Przepływ pęcherzykowy jest najbardziej stabilnym przepływem pod względem zmiany kierunku przepływu. Kształt pęcherzyków oraz ich koncentracja nie ulegają zmianie. Kształt histogramu przepływu opadającego i wznoszącego jest niemal jednakowy.



Rys. 9.18. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla kolejnych kanałów aparatu węzownicowego ($w_{G0} = 0,32 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$). STRUKTURA KORKOWA/RZUTOWA

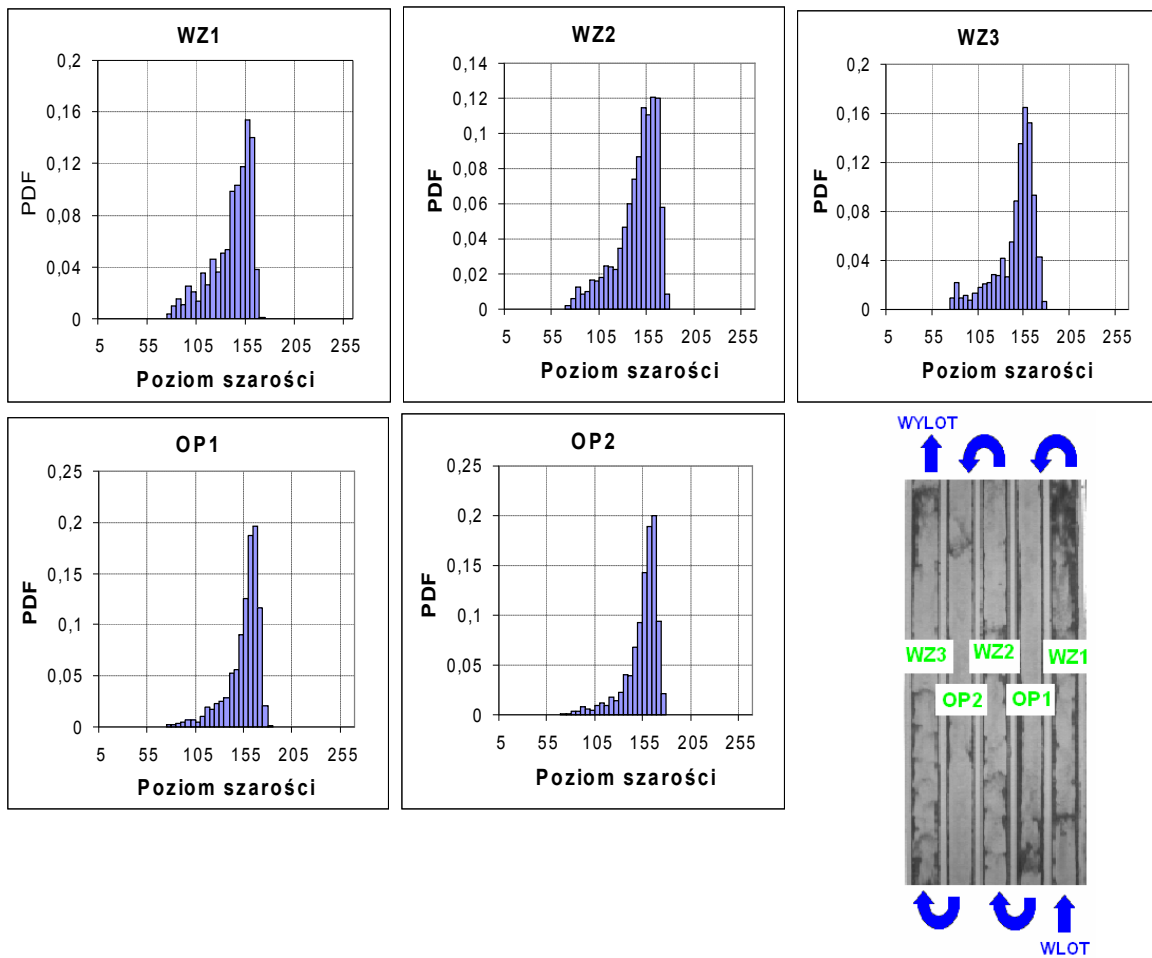
Struktura korkowa charakteryzuje się dwoma maksimami lokalnymi funkcji. Na wykresach przebiegów funkcji (rys. 9.18) są wysokie i niskie piki co świadczy o występowaniu małych i dużych korków o różnej wielkości rozdzielonych porcjami cieczy oraz drobnych pęcherzy. W pracy rozgraniczono charakter przepływu jako korkowy i odniesiono go do przepływu wznoszącego oraz rzutowy odnośnie przepływu opadającego. Nazewnictwo to ma na celu wyostrenie różnicy kształtu obiektów gazowych, które w przepływie opadającym nie mają tak regularnego kształtu jak korki w przepływie wznoszącym. Odzwierciedleniem tego zjawiska są powyższe przebiegi funkcji PDF. Zostaje zachowana forma histogramu, który w dalszym ciągu posiada dwa maksima lokalne jednak istnieje duża różnica pomiędzy ich wartościami.



Rys. 9.19. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla kolejnych kanałów aparatu węzownicowego ($w_{G0} = 3,2 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$). STRUKTURA PIANOWA

Struktura pianowa charakteryzuje się pojedynczym prawostronnym maksimum funkcji oraz szerokim widmem o łagodnym narastającym przebiegu.

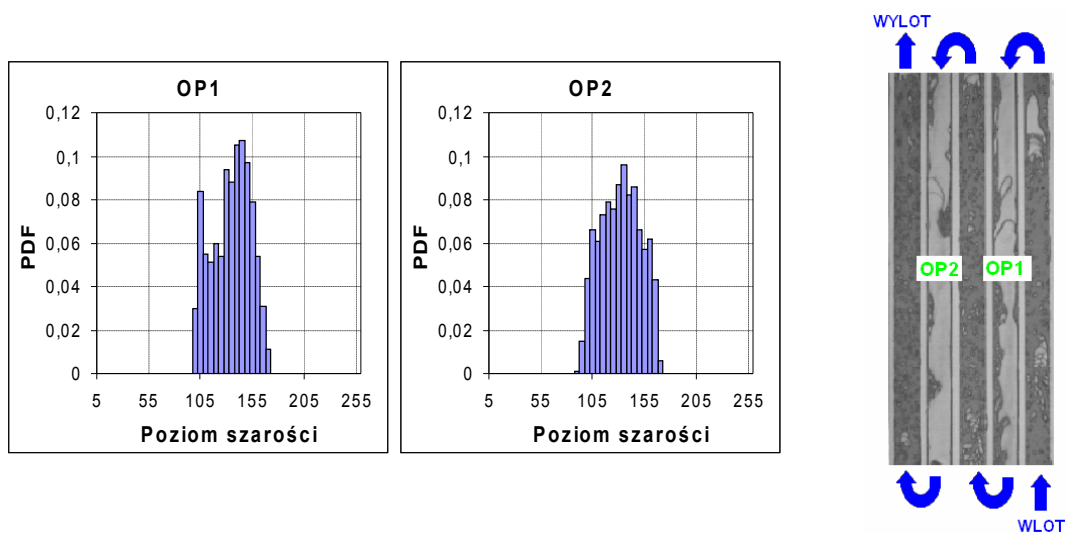
Łagody narastający kształt widma (rys. 9.19) świadczy o występowaniu struktur gazowych o różnej wielkości oraz ich silnych pulsacjach.



Rys. 9.20. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla kolejnych kanałów aparatu węzownicowego ($w_{G0} = 5,8$ m/s; $w_{L0} = 1$ m/s). STRUKTURA PIERŚCIENIOWA

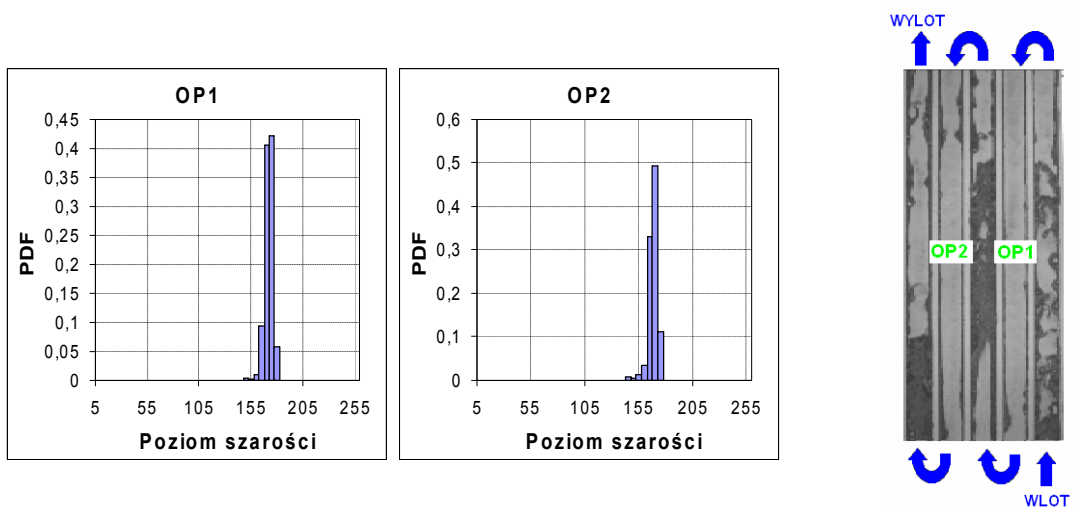
Struktura pierścieniowa charakteryzuje się pojedynczym prawostronnym maksimum. Podczas identyfikacji struktur za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa istnieje trudność w rozpoznawaniu pomiędzy strukturą pierścieniową i pianową. Dlatego też posłużono się tutaj dodatkowo obserwacją wizualną w celu wyjaśnienia wątpliwości co do klasyfikacji struktury (rys. 9.20).

Na poniższych rysunkach (9.21, 9.22) przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa dla pozostałych struktur przepływu opadającego mieszaniny dwufazowej.



Rys. 9.21. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla kolejnych kanałów opadających aparatu węzowniczowego ($w_{G0} = 0,18$ m/s; $w_{L0} = 0,32$ m/s).
STRUKTURA PECHERZYKOWO - FILMOWA

Struktura pęcherzykowo – filmowa charakteryzuje się nieregularnym choć skupionym widmem rozkładu. Duża ilość pików świadczy o występowaniu mnogiej ilości pęcherzy różnicowanych pod względem rozmiaru.



Rys. 9.22. Rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla kolejnych kanałów opadających aparatu węzowniczowego ($w_{G0} = 1$ m/s; $w_{L0} = 0,18$ m/s).
STRUKTURA SPŁYWAJĄCEGO FILMU

Struktura spływającego filmu charakteryzuje się wąskim widmem rozkładu z jednym lokalnym maksimum. W odróżnieniu od struktury pęcherzykowej widmo spływającego filmu leży w wyższym przedziale poziomu szerokości co świadczy o mniejszym udziale objęściowym fazy ciekłej, która w rzeczywistości spływa po ścianie kanału.

9.3. Ocena wpływu układu dystrybucji na podstawie map przepływu

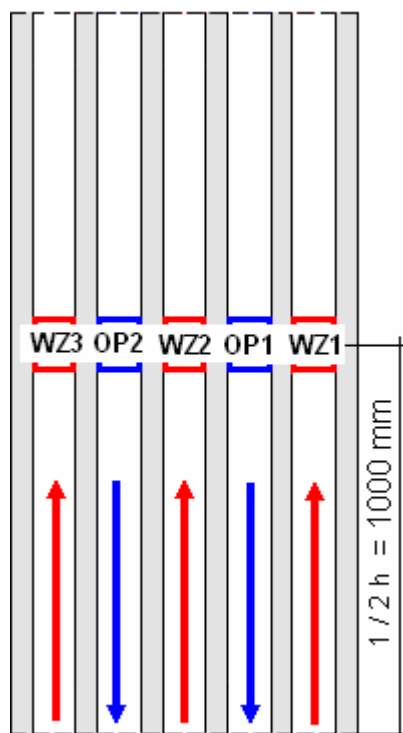
W niniejszym rozdziale przedstawiono ocenę wpływu układu dystrybucji fazy gazowej na hydrodynamikę przepływu dwufazowego w oparciu o mapy przepływu. Prędkości obu czynników zmieniano podczas badań w postępie geometrycznym w celu równomiernego rozłożenia węzłów prędkości na mapach, które zwykle są prezentowane w układzie podwójnie logarytmicznym gdzie na osi odciętych naniesiono prędkości pozorne gazu a na osi rzędnych prędkości pozorne cieczy. Pod pojęciem *węzła* należy rozumieć punkt na mapie, którego współrzędne to konkretne wartości prędkości gazu i cieczy (w_{G0} , w_{L0}).

Analizę porównawczą przeprowadzono dla trzech układów dystrybucji: otworkowego, szczelinowego i szczelinowego wypełnionego materiałem porowatym w oparciu o obserwację wizualną oraz analizę kształtu histogramu funkcji gęstości prawdopodobieństwa.

Mapy przepływu sporządzono oddzielnie dla przepływu wznoszącego i opadającego (rys. 9.23) gdyż charakter obu przepływów jest zróżnicowany. Ponieważ istnieją obszary prędkości, w których niezależnie od rodzaju dystrybutora występuje ten sam rodzaj przepływu, sporządzono ujednoliconą mapę przepływu, jako zalecany obszar eksploatacji aparatu węzownicowego.

Jeżeli we wszystkich kanałach wznoszących występowała jednakowa struktura przepływu to na mapie przepływu umieszczano pełny punkt. W przypadku gdy tylko w dwóch kanałach występowała jednakowa struktura to taką 66% zgodność oznaczano punktem bez wypełnienia.

W przypadku kanałów opadających, jeżeli w obu występowała jednakowa struktura to nanoszono jeden pełny punkt. Natomiast jeżeli występowały dwie różne struktury to nanoszono dwa punkty, odpowiednio pierwszy punkt od lewej oznaczał strukturę w kanale OP1 a kolejny w OP2.



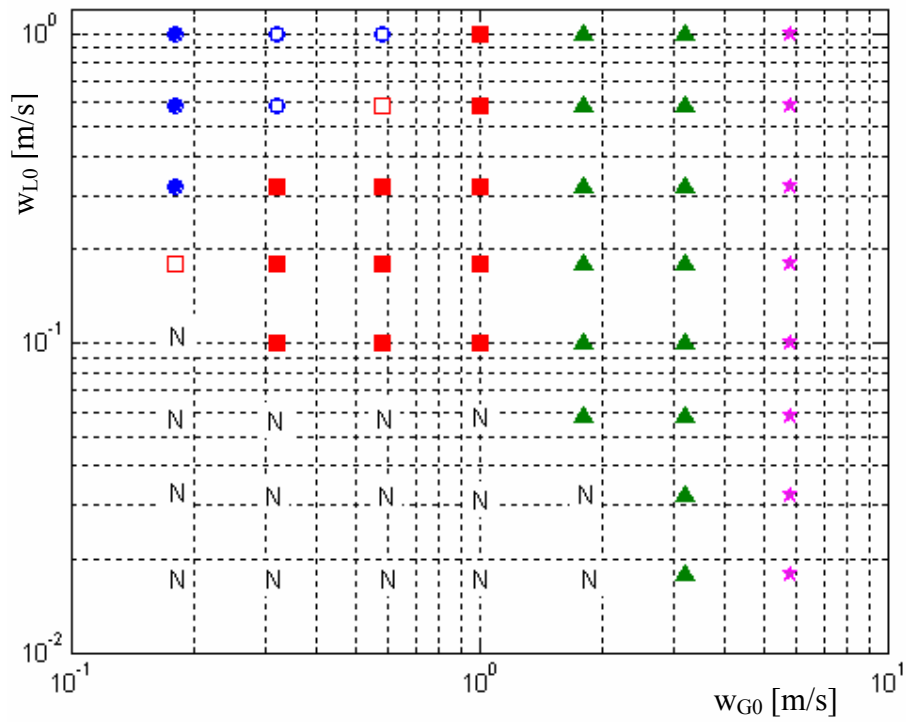
Rys. 9.23. Rozmieszczenie obszarów badawczych, w których klasyfikowano rodzaj przepływu.

Przed przystąpieniem do analizy usystematyzowano oznaczenia wprowadzając symbole graficzne dla poszczególnych struktur przepływu (tab. 9.3) Czerwony kwadrat został przypisany do dwóch struktur - struktura korkowa w przepływie wznoszącym oraz struktura rzutowa w przepływie opadającym.

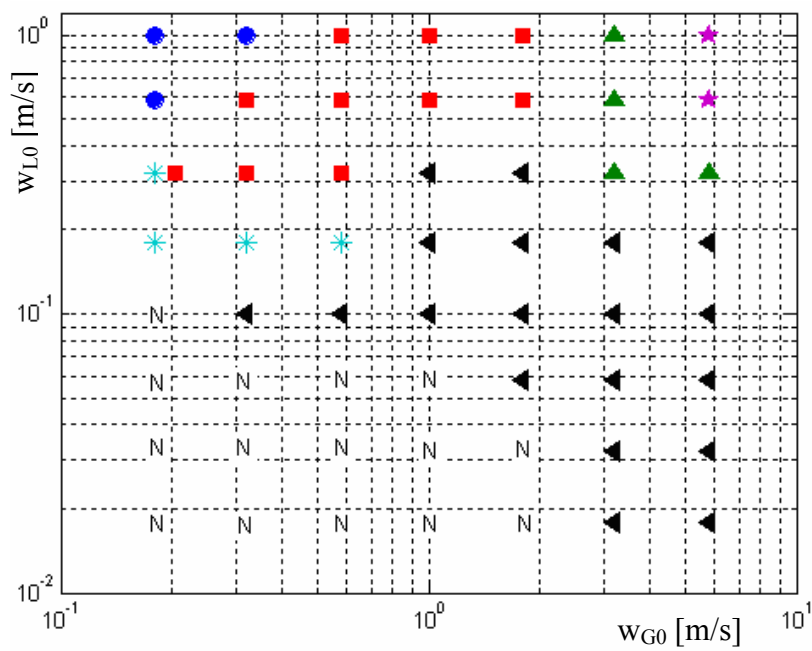
Tabela 9.3. Przyjęte symbole określające rodzaj struktur przepływu

Symbol	Struktura przepływu	
●	B	pęcherzykowa
□	P/S	korkowa / rzutowa
**	F	pianowa
☞	A	pierścieniowa
τ	BF	pęcherzykowo - filmowa
◀	FF	spływający film
N	N	niepoprawna praca aparatu

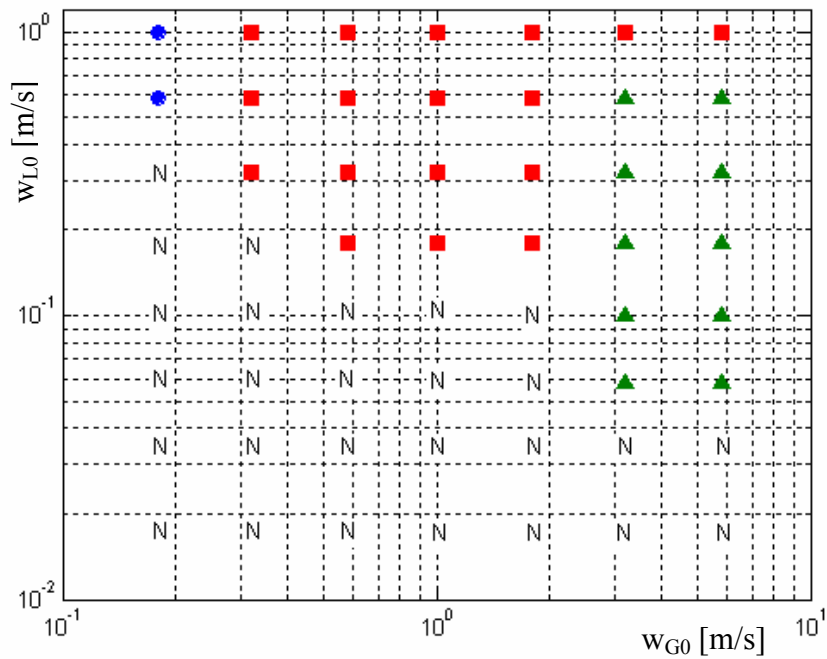
Na rysunkach 9.24 – 9.29 przedstawiono rozkłady struktur przepływu trzech układów dystrybucji dla przepływu wznoszącego i opadającego na podstawie obserwacji wizualnej.



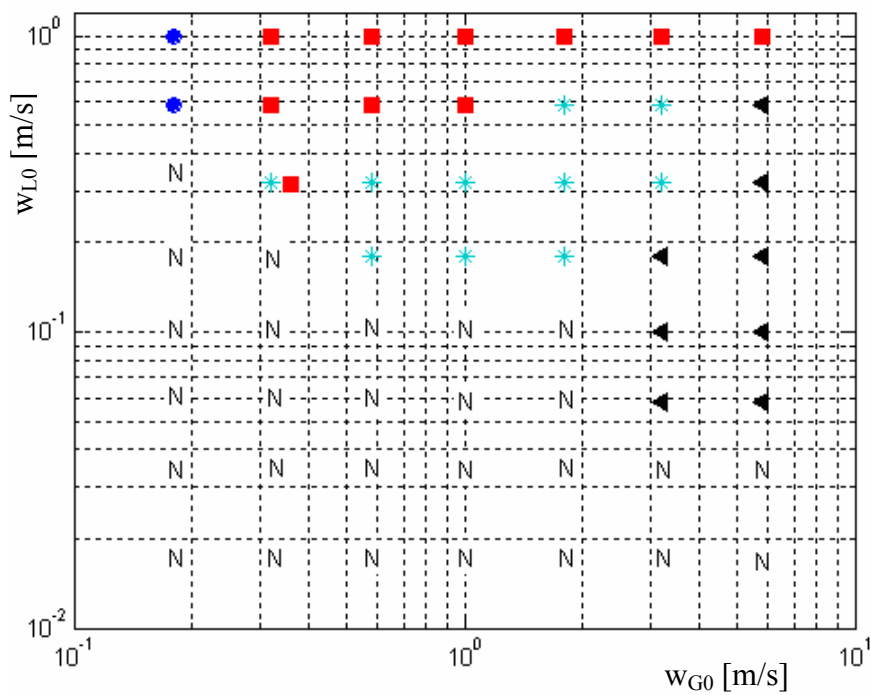
Rys. 9.24. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie obserwacji wizualnej dla przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie dystrybucji fazy gazowej



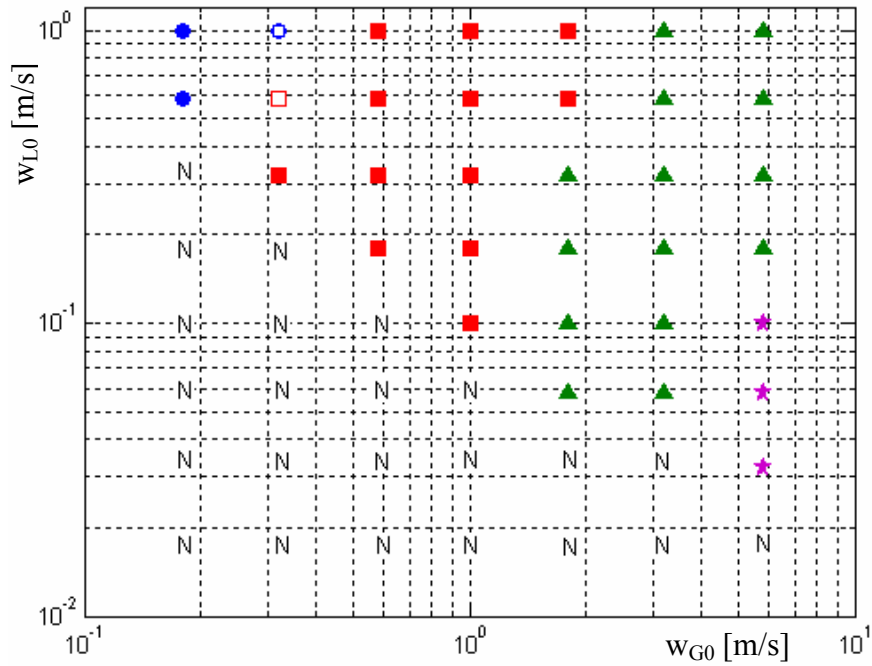
Rys. 9.25. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie obserwacji wizualnej dla przepływu opadającego przy otworkowym układzie dystrybucji fazy gazowej



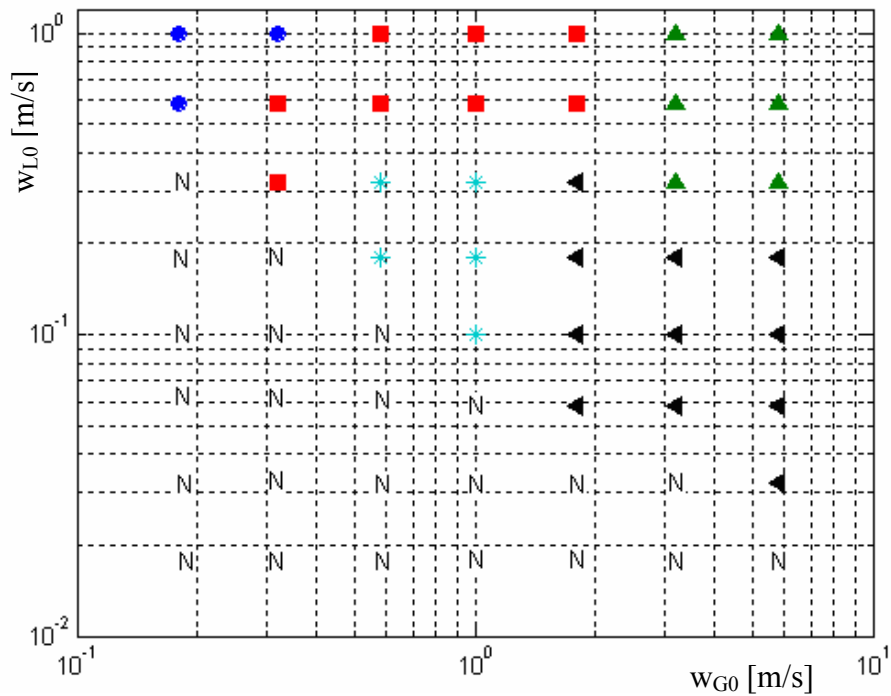
Rys. 9.26. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie obserwacji wizualnej dla przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.27. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie obserwacji wizualnej dla przepływu opadającego przy szczelinowym układzie dystrybucji fazy gazowej

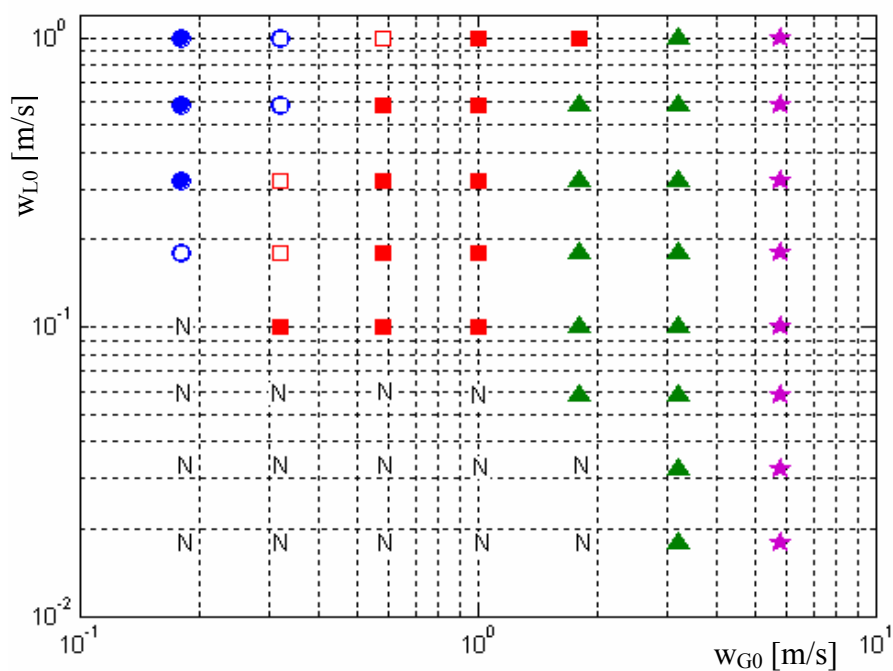


Rys. 9.28. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie obserwacji wizualnej dla przepływu wznoszącego przy porowatym układzie dystrybucji fazy gazowej

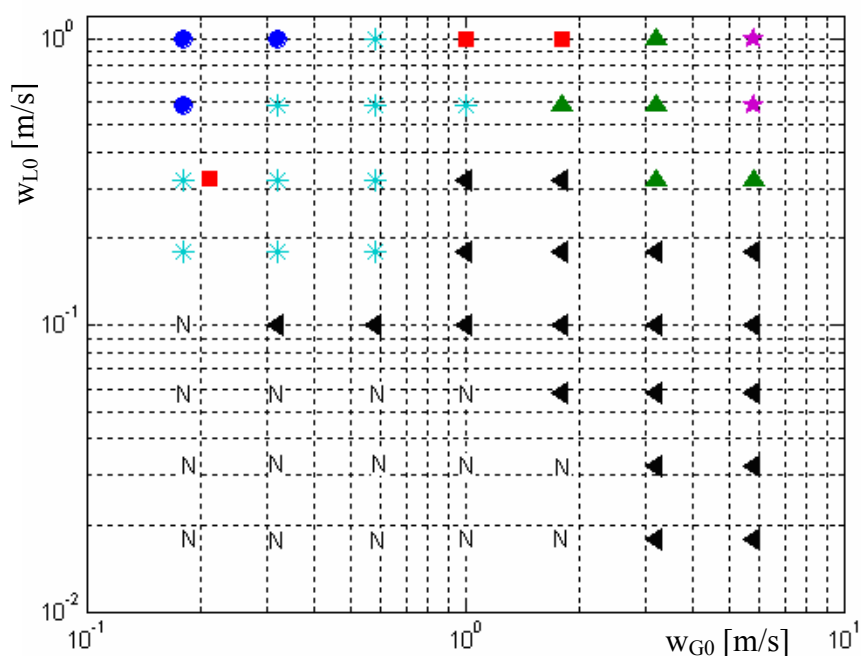


Rys. 9.29. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie obserwacji wizualnej dla przepływu opadającego przy porowatym układzie dystrybucji fazy gazowej

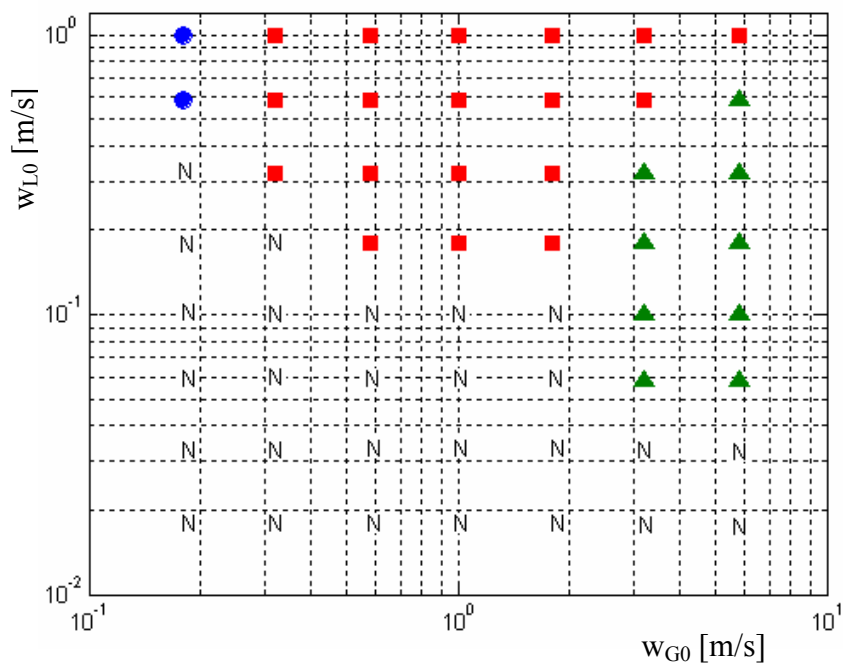
Na rysunkach 9.30 – 9.35 przedstawiono rozkłady struktur przepływu trzech układów dystrybucji na podstawie analizy kształtu histogramu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego i opadającego.



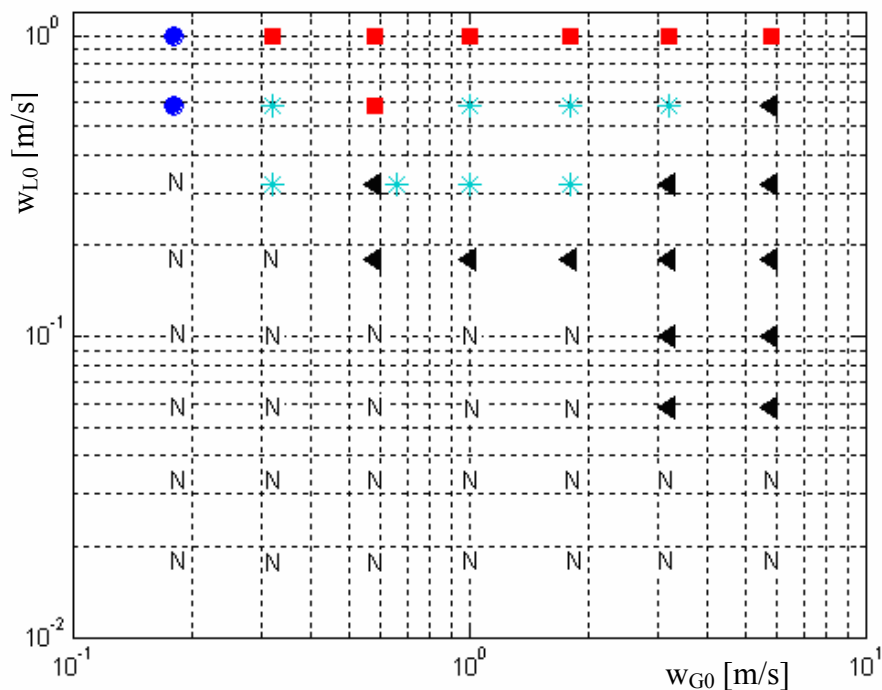
Rys. 9.30. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie dystrybucji fazy gazowej



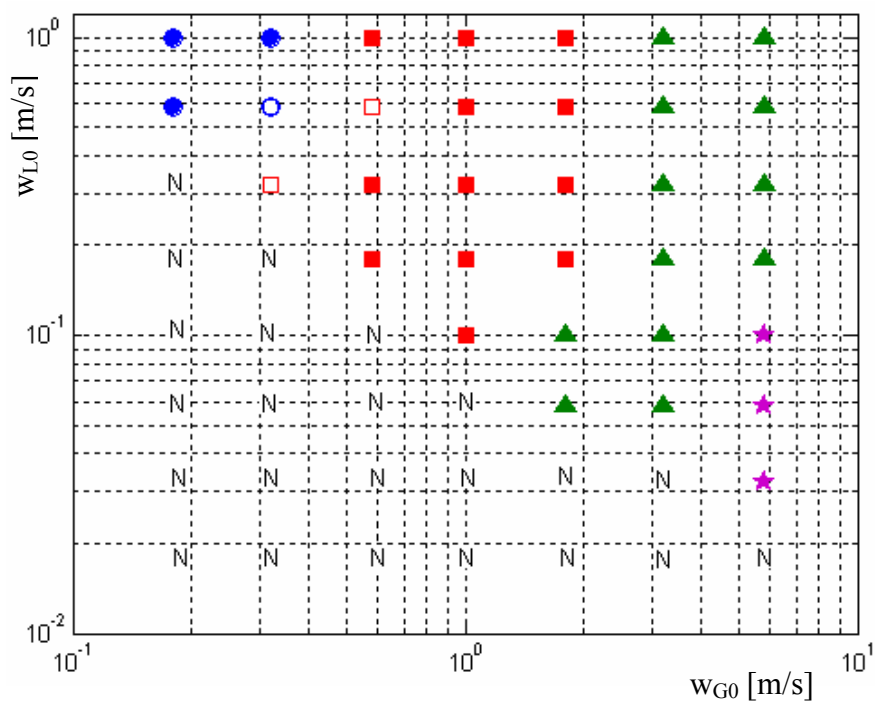
Rys. 9.31. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu opadającego przy otworkowym układzie dystrybucji fazy gazowej



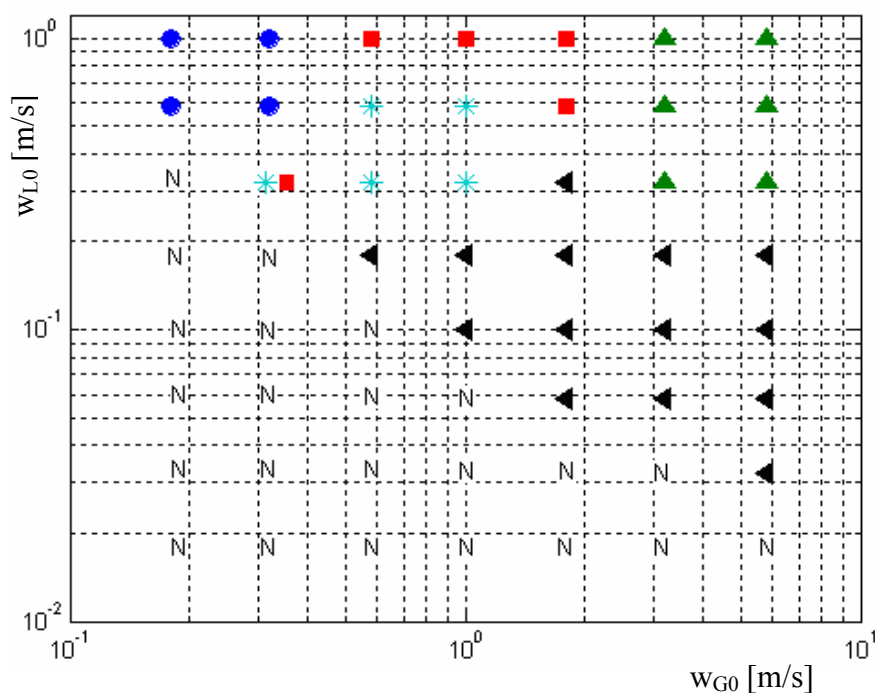
Rys. 9.32. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.33. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu opadającego przy szczelinowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.34. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego przy porowatym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.35. Rozkład struktur przepływu wyznaczonych na podstawie kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu opadającego przy porowatym układzie dystrybucji fazy gazowej

W celu porównania zgodności powyższych sposobów identyfikacji struktur przepływu w poszczególnych węzłach, wyznacza się zwykle macierze (tab. 9.4 – 9.9), w których za miarę zgodności przyjmuje się iloraz sumy otrzymanej na głównej przekątnej odniesionej do łącznej ilości prowadzonych obserwacji.

Przykładowo w tabeli 9.4 z obserwacji wizualnej wynika iż węzłów o charakterze pęcherzykowym jest w sumie 6. Natomiast na podstawie analizy funkcji PDF wyznaczono 5 węzłów pęcherzykowych. Z tego wynika, że zgodność dla przepływu pęcherzykowego pomiędzy tymi dwiema metodami wynosi 83,3%. Ten jeden niezgodny punkt wynika z tego, że na podstawie obserwacji wizualnej został sklasyfikowany jako węzeł pęcherzykowy a na podstawie analizy funkcji PDF jako korkowy.

Analogicznie postępowano z pozostałymi obszarami danych struktur przepływu. Powyższy przykład stanowi jedynie algorytm postępowania gdyż w celu porównania zgodności sposobów identyfikacji analizowano równocześnie wszystkie rodzaje przepływów występujących na mapie.

W tabelach 9.4 – 9.6 dokonano porównania zgodności pomiędzy strukturą wyznaczoną na podstawie obserwacji wizualnej i wyznaczonej za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla trzech układów dystrybucji podczas przepływu wznoszącego. Najwyższą zgodnością charakteryzował się układ szczelinowy, w którym ukształtowała się ona na poziomie 96,5%. Rozpatrując wszystkie trzy rodzaje dystrybutora najmniejszą zgodność wykazuje przepływ pianowy (89,5%) a najwyższą pęcherzykowy (94,4%).

W przypadku przepływu opadającego (tabele 9.7 – 9.9) najwyższą zgodność zaobserwowano dla układu otworkowego, w którym wyniosła 82,9%.

Tabela 9.4. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie zasilania

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF				
		B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona na podstawie obserwacji wizualnej	B	5	1	0	0	6
	P	1	12	0	0	13
	F	0	1	13	0	14
	A	0	0	0	8	8
	Σ	6	14	13	8	41
Zgodność					92,7%	

Tabela 9.5. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie zasilania

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF				
		B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona na podstawie obserwacji wizualnej	B	2	0	0	0	2
	P	0	17	0	0	17
	F	0	1	9	0	10
	A	0	0	0	0	0
	Σ	2	18	9	0	29
Zgodność					96,5%	

Tabela 9.6. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego przy porowatym układzie zasilania

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF				
		B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona na podstawie obserwacji wizualnej	B	3	0	0	0	3
	P	1	12	0	0	13
	F	0	2	12	0	14
	A	0	0	0	3	3
	Σ	4	14	12	3	33
Zgodność					90,9%	

Tabela 9.7. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu opadającego przy otworkowym układzie zasilania

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF						
		B	P	F	A	BF	FF	Σ
Struktura wyznaczona na podstawie obserwacji wizualnej	B	3	0	0	0	0	0	3
	P	0	2	1	0	6	0	9
	F	0	0	4	0	0	0	4
	A	0	0	0	2	0	0	2
	BF	0	0	0	0	4	0	4
	FF	0	0	0	0	0	19	19
	Σ	3	2	5	2	10	16	41
Zgodność							82,9%	

Tabela 9.8. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu opadającego przy szczelinowym układzie zasilania

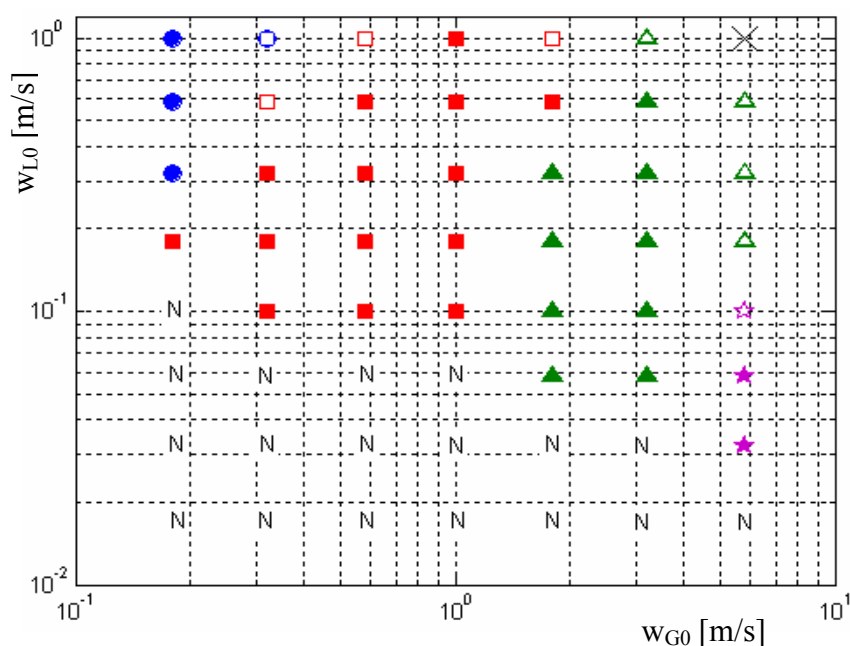
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF						
		B	P	F	A	BF	FF	Σ
Struktura wyznaczona na podstawie obserwacji wizualnej	B	2	0	0	0	0	0	2
	P	0	7	0	0	2	0	9
	F	0	0	0	0	0	0	0
	A	0	0	0	0	0	0	0
	BF	0	0	0	0	5	5	10
	FF	0	0	0	0	0	8	8
	Σ	2	7	0	0	7	13	29
Zgodność							75,9%	

Tabela 9.9. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu opadającego przy porowatym układzie zasilania

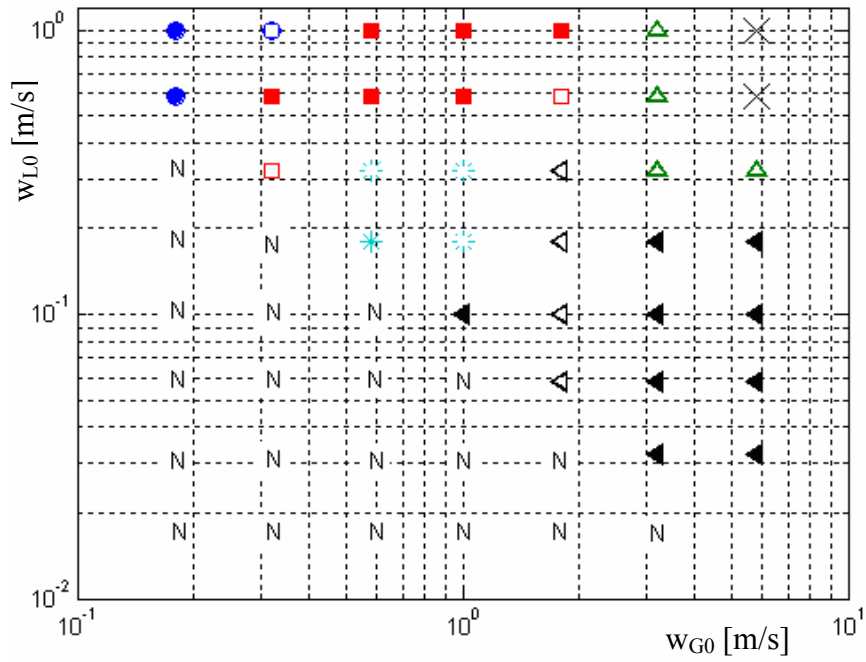
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF						
		B	P	F	A	BF	FF	Σ
Struktura wyznaczona na podstawie obserwacji wizualnej	B	3	0	0	0	0	0	3
	P	1	5	0	0	2	0	8
	F	0	0	6	0	0	0	6
	A	0	0	0	0	0	0	0
	BF	0	0	0	0	2	3	5
	FF	0	0	0	0	0	11	11
	Σ	4	5	6	0	4	14	33
Zgodność							81,8%	

Na podstawie wyżej wyznaczonych map, które przedstawiają reżimy przepływu, oddzielnie dla wszystkich układów dystrybucji, postanowiono wyznaczyć ujednoczoną mapę przepływu. Podczas klasyfikacji struktury w danym węźle kierowano się 66,6% zgodnością pomiędzy układami. Przykładowo jeżeli dla układu otworkowego i szczelinowego występował przepływ pęcherzykowy a dla układu porowatego przepływ korkowy, to na ujednoczonej mapie zaznaczano przepływ pęcherzykowy niewypełnionym punktem. Dla 100% zgodności oznaczano pełny punkt. Jeżeli w danym węźle dla wszystkich układów dystrybucji występowała zupełnie inna struktura to taki węzeł oznaczano „X” jako przepływ nierównomierny.

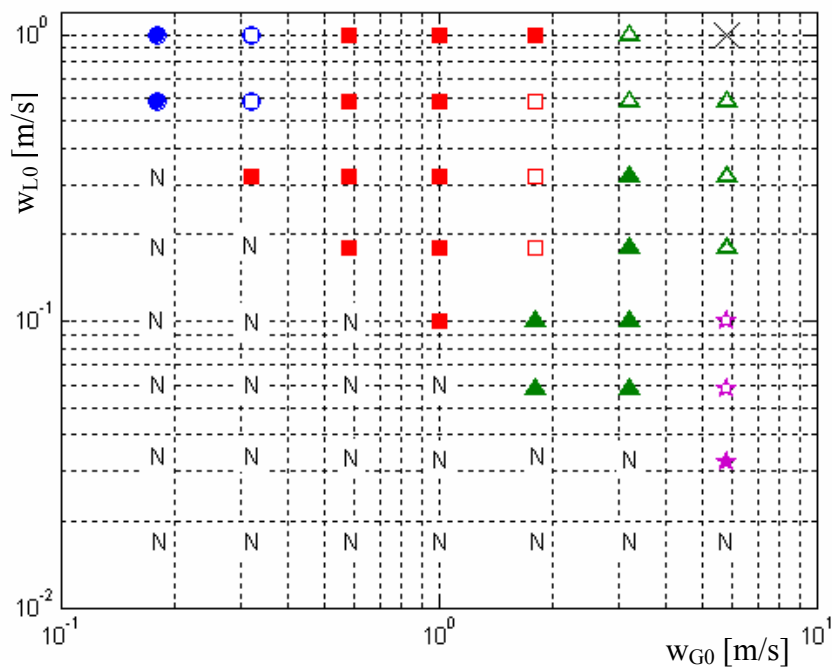
Dla przepływu wznoszącego zarówno dla obserwacji wizualnej (rys. 9.36) jak i dla analizy kształtu histogramu PDF (rys. 9.37) wystąpił na mapie jeden węzeł o charakterze niezidentyfikowanym i w obu przypadkach miał te same współrzędne ($w_{G0} = 5,8$, $w_{L0} = 1$). Natomiast dla przepływu opadającego dla obserwacji wizualnej (rys. 9.38) wystąpiły dwa niezidentyfikowane węzły a trzy dla analizy PDF (rys. 9.39). Tu również nastąpiło pokrycie się węzłów o współrzędnych ($w_{G0} = 5,8$, $w_{L0} = 1$) oraz ($w_{G0} = 5,8$, $w_{L0} = 0,58$).



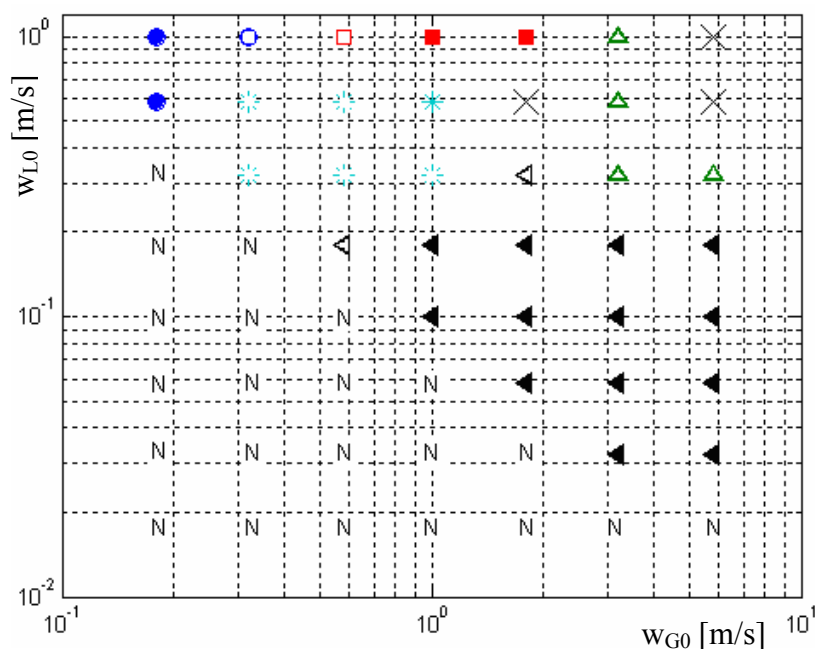
Rys. 9.36. Ujednoczona mapa przepływu dla trzech układów dystrybucji fazy gazowej wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej dla przepływu wznoszącego, X – przepływ nierównomierny



Rys. 9.37. Ujednolicona mapa przepływu dla trzech układów dystrybucji fazy gazowej wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej dla przepływu opadającego, X – przepływ nierównomierny



Rys. 9.38. Ujednolicona mapa przepływu dla trzech układów dystrybucji fazy gazowej wyznaczona za pomocą kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu wznoszącego, X – przepływ nierównomierny



Rys. 9.39. Ujednolicona mapa przepływu dla trzech układów dystrybucji fazy gazowej wyznaczona za pomocą kształtu funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla przepływu opadającego, X – przepływ nierównomierny

W tabelach 9.10 – 9.11 przedstawiono zgodność sposobów identyfikacji przepływu dwufazowego dla ujednoliconych map przepływu. Dla przepływu wznoszącego zgodność ta była większa niż dla przepływu opadającego. Analogicznie jak podczas porównania rozdzielnych map najniższą zgodność podczas przepływu wznoszącego obserwowano w zakresie struktury pianowej (84,6%) a najwyższą dla struktury pęcherzykowej 100%. Przepływ opadający wykazał najniższą zgodność w obrębie struktur: rzutowej (42,8%) i pęcherzykowo - filmowej (50%) a najwyższą dla struktur: pęcherzykowej, pianowej oraz spływającego filmu (100%).

Generalnie prezentowane sposoby identyfikacji przepływu osiągają zgodność na bardzo zadawalającym poziomie, wyższym niż 80% oprócz jednego przypadku jakim jest przepływ opadający przy szczelinowym układzie zasilania i wynosi 76%.

Tabela 9.10. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla ujednocionej mapy - przepływ wznoszący

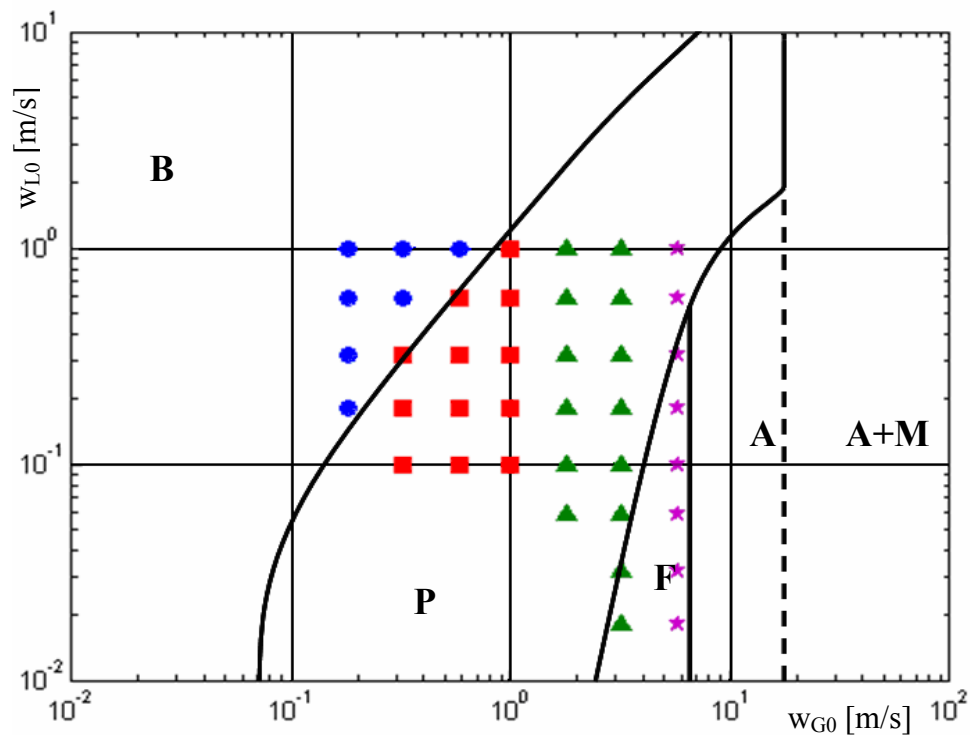
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF				
		B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona na podstawie obserwacji wizualnej	B	3	0	0	0	3
	P	1	12	0	0	13
	F	0	2	11	0	13
	A	0	0	0	3	3
	Σ					29
Zgodność						87,9%

Tabela 9.11. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla ujednocionej mapy - przepływ opadający

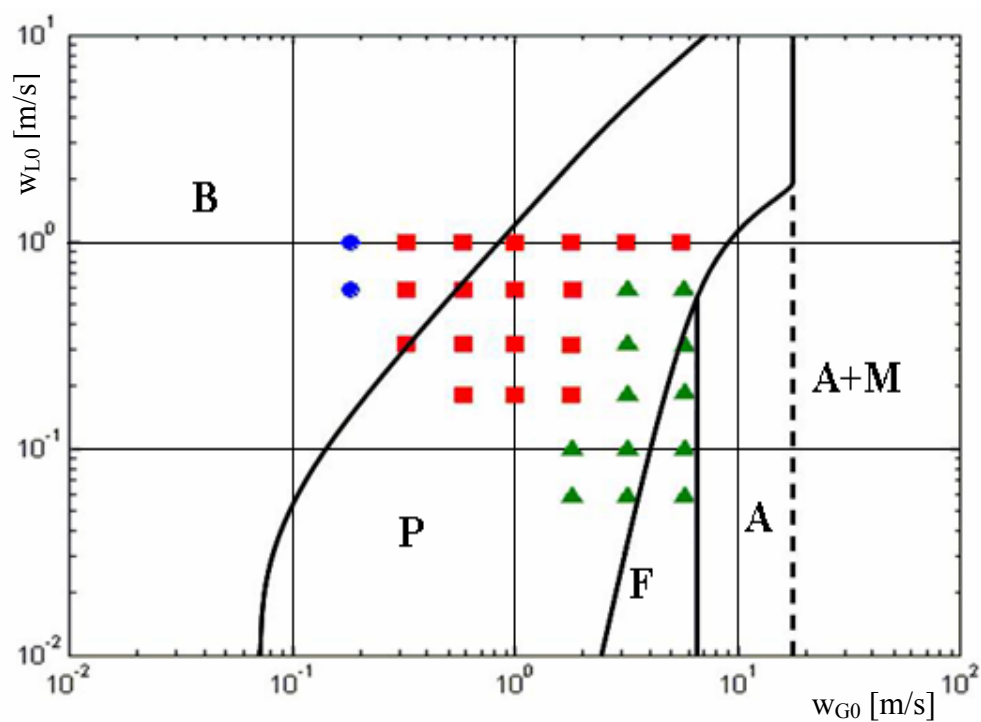
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą PDF						
		B	P	F	A	BF	FF	Σ
Struktura wyznaczona na podstawie obserwacji wizualnej	B	3	0	0	0	0	0	3
	P	0	3	0	0	4	0	7
	F	0	0	4	0	0	0	4
	A	0	0	0	0	0	0	0
	BF	0	0	0	0	2	2	4
	FF	0	0	0	0	0	13	13
	Σ	3	3	4	0	6	15	25
Zgodność							80,1%	

9.3. Porównanie wyników badań własnych z istniejącymi mapami

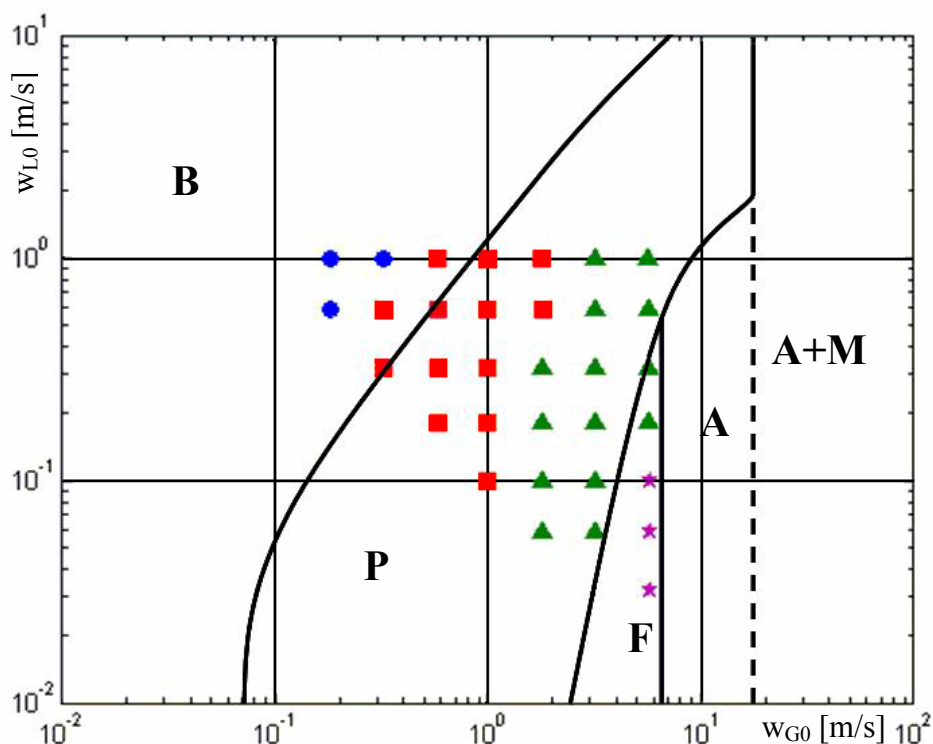
Po dokonaniu przeglądu literaturowego z zakresu map przepływu dwufazowego wznoszącego wybrano dwie przytaczane wcześniej uniwersalne mapy, do których przyrównano wyniki badań własnych. Pierwszą prezentowaną mapą była mapa wg. Mishima i Ishi [52]. Analizy dokonano w zakresie przepływu wznoszącego dla trzech układów dystrybucji fazy gazowej (rys. 9.40 – 9.42)



Rys. 9.40. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg. Mishima i Ishi [52] dla przepływu wznoszącego przy otwórkowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.41. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg. Mishima i Ishi [52] dla przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.42. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg. Mishima i Ishi [52] dla przepływu wznoszącego przy porowatym układzie dystrybucji fazy gazowej

W stosunku do prezentowanej mapy punkty reprezentujące badania własne zajmują wąski obszar, jest to spowodowane mniejszym zakresem zmian prędkości fazy gazowej w porównaniu do pozostałych badaczy. Ponieważ na prezentowanej mapie zakres prędkości fazy gazowej jest szeroki, badacze przewidzieli dodatkowy obszar „A+M”, który stanowią struktury pierścieniowa i dyspersyjna.

Analiza porównawcza wyników badań własnych z mapą wg Mishima i Ishii została zestawiona w tabelach (9.12 – 9.14). Dla układu otworkowego uzyskano zgodność na poziomie 49% a dla układów szczelinowego i porowatego 52%.

Najmniejszą zgodność obserwowano dla przepływu korkowego (51,8%) a największą dla pęcherzykowego (62,5%). Wynik tego porównania należy uznać za niezadowalający.

Tabela 9.12. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Mishima i Ishi dla przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie zasilania

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej				
		B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona wg.: Mishima i Ishi	B	7	1	0	0	8
	P	0	11	12	2	25
	F	0	1	2	6	8
	A	0	0	0	0	0
	Σ	7	12	14	8	41
Zgodność					49%	

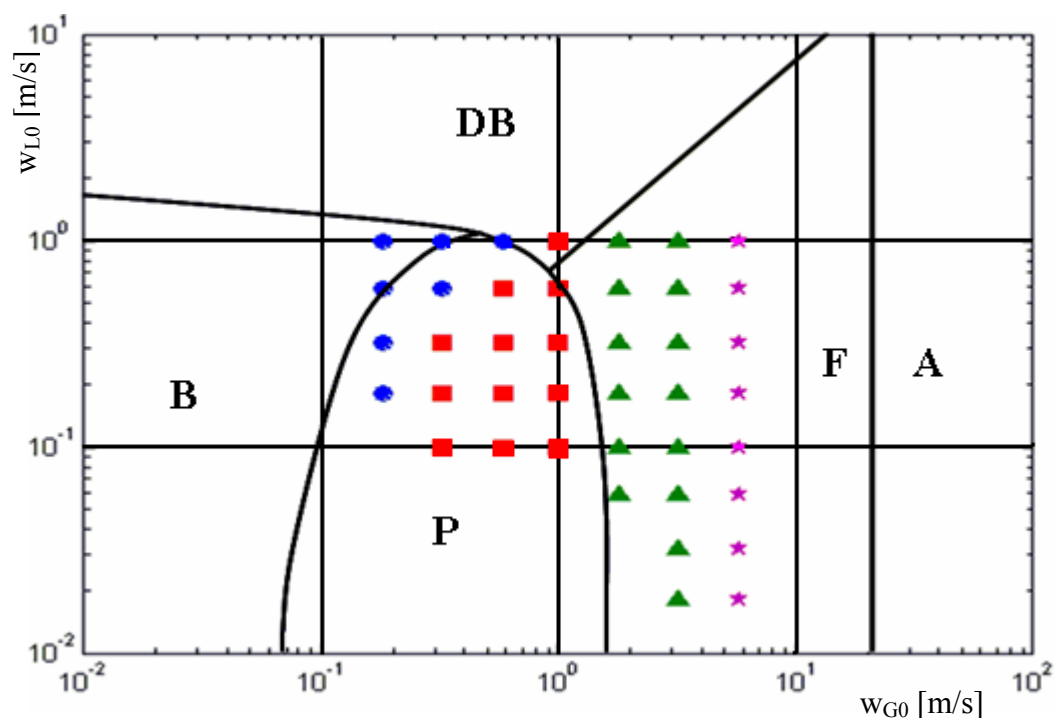
Tabela 9.13. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Mishima i Ishi dla przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie zasilania

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej				
		B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona wg.: Mishima i Ishi	B	2	3	0	0	5
	P	0	14	8	0	22
	F	0	0	4	0	4
	A	0	0	0	0	0
	Σ	2	17	12	0	31
Zgodność					52%	

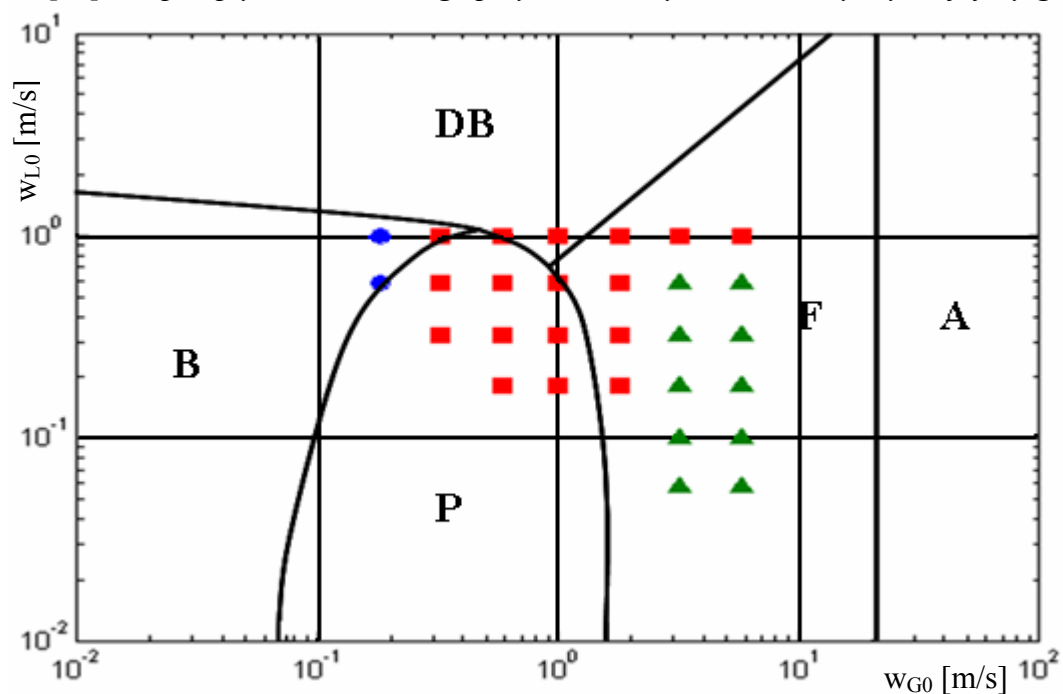
Tabela 9.14. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Mishima i Ishi dla przepływu wznoszącego przy porowatym układzie zasilania

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej				
		B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona wg.: Mishima i Ishi	B	3	2	0	0	5
	P	0	11	12	0	23
	F	0	0	2	3	5
	A	0	0	0	0	0
	Σ	3	13	14	3	33
Zgodność					52%	

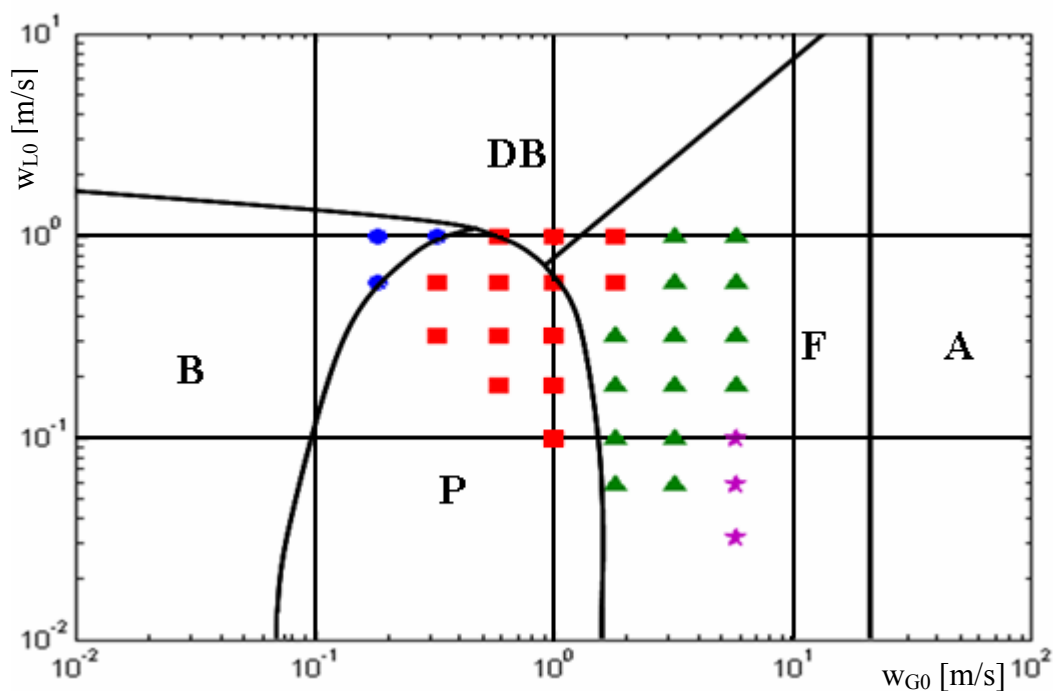
Ze względu na niską zgodność postanowiono dokonać porównania także z mapą Taitel'a i innych [85] (rys. 9.43 – 9.45). Choć jest to mapa opracowana dla przepływu w rurze uznano ją za najbardziej uniwersalną.



Rys. 9.43. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg. Taitel'a i innych [85] dla przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.44. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg. Taitel'a i innych [85] dla przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.45. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg. Taitel'a i innych [85] dla przepływu wznoszącego przy porowatym układzie dystrybucji fazy gazowej

Ponieważ badacze uwzględnili szeroki zakres prędkości fazy ciekłej na mapie widnieje obszar „DB”, który stanowi reżim przepływu pęcherzykowo – dyspersyjnego.

W tabelach 9.15 – 9.17 zaprezentowano zgodność pomiędzy wynikami badań własnych na podstawie obserwacji wizualnej z mapą zaprezentowaną wg. Taitel'a i innych dla trzech układów dystrybucji fazy gazowej. Najwyższą zgodnością charakteryzował się porowaty układ zasilania (79%) a najniższą otworkowy (68%).

Najmniejszą zgodność zaobserwowano dla przepływu pianowego (66,6%) a największą dla korkowego (92,8%). Zgodnie z McQuillan'em [51] zgodność na poziomie 70% jest uznawana za zadowalającą. Ponieważ tylko w jednym przypadku (układ porowaty – 79%) zgodność ta jest wyższa postanowiono wyznaczyć własną mapę przepływu.

Tabela 9.15. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Taitel, Barnea, Dukler dla przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie zasilania

Liczna punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej					
		DB	B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona wg. : Taitel, Barnea, Dukler	DB	0	1	1	0	0	2
	B	0	3	0	0	0	3
	P	0	3	11	0	0	14
	F	0	0	0	14	8	22
	A	0	0	0	0	0	0
	Σ	0	7	12	14	8	41
Zgodność							68%

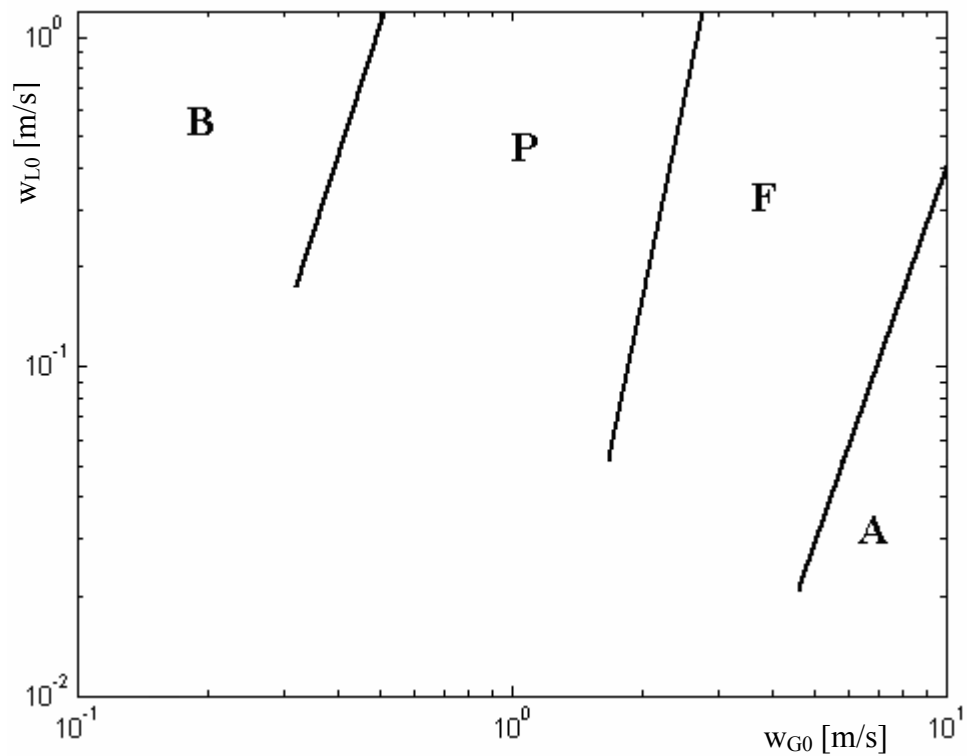
Tabela 9.16. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Taitel, Barnea, Dukler dla przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie zasilania

Liczna punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej					
		DB	B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona wg. : Taitel, Barnea, Dukler	DB	0	0	2	0	0	2
	B	0	2	1	0	0	3
	P	0	0	8	0	0	8
	F	0	0	6	10	0	16
	A	0	0	0	0	0	0
	Σ	0	2	17	10	0	29
Zgodność							69%

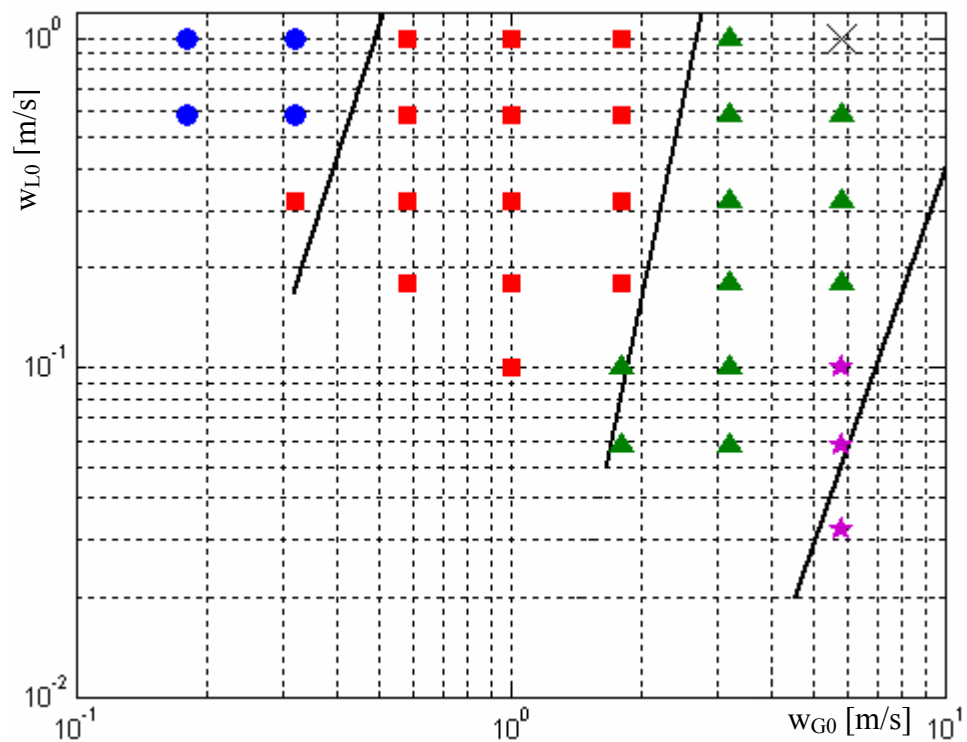
Tabela 9.17. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Taitel, Barnea, Dukler dla przepływu wznoszącego przy porowatym układzie zasilania

Liczna punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej					
		DB	B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona wg. : Taitel, Barnea, Dukler	DB	0	0	2	0	0	2
	B	0	3	0	0	0	3
	P	0	0	9	0	0	9
	F	0	0	2	14	3	19
	A	0	0	0	0	0	0
	Σ	0	3	13	14	3	33
Zgodność							79%

Proponowana mapa przepływu została wyznaczona na podstawie ujednocnionej mapy aby jej charakter był uniwersalny bez względu na rodzaj dystrybutora fazy gazowej.



Rys.9.46. Proponowana mapa przepływu dla aparatu węzownicowego – przepływ wznoszący



Rys. 9.47. Porównanie proponowanej mapy z wynikami badań własnych

Tabela 9.18. Analiza porównawcza struktur przepływu wyznaczonych za pomocą obserwacji wizualnej oraz proponowanej mapy przepływu wznoszącego

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej				
		B	P	F	A	Σ
Struktura wyznaczona za pomocą proponowanej mapy przepływu	B	4	1	0	0	5
	P	0	13	1	0	14
	F	0	2	10	2	12
	A	0	0	0	1	1
	Σ	4	14	11	3	32
Zgodność						87,5%

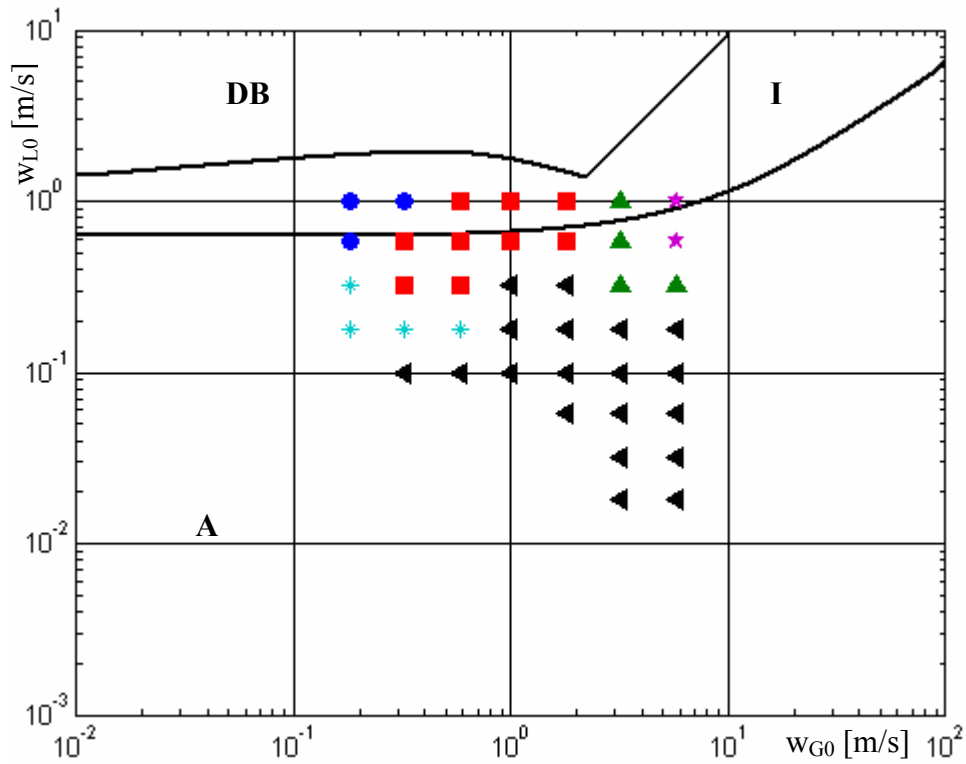
W tabeli 9.18 przedstawiono porównanie zaproponowanej mapy przepływu z wynikami badań własnych i uzyskano zgodność rzędu 87,5%. Pomimo tego że zgodność mapy jest wysoka nie wyklucza się stosowania mapy wg. Taitla gdyż jest ona oparta na modelu teoretycznym co zwiększa zakres jej stosowalności.

Analogicznie jak dla przepływu wznoszącego wykonano porównanie wyników badań własnych dla przepływu opadającego z mapą przepływu opadającego zaprezentowaną przez Barnea [2].

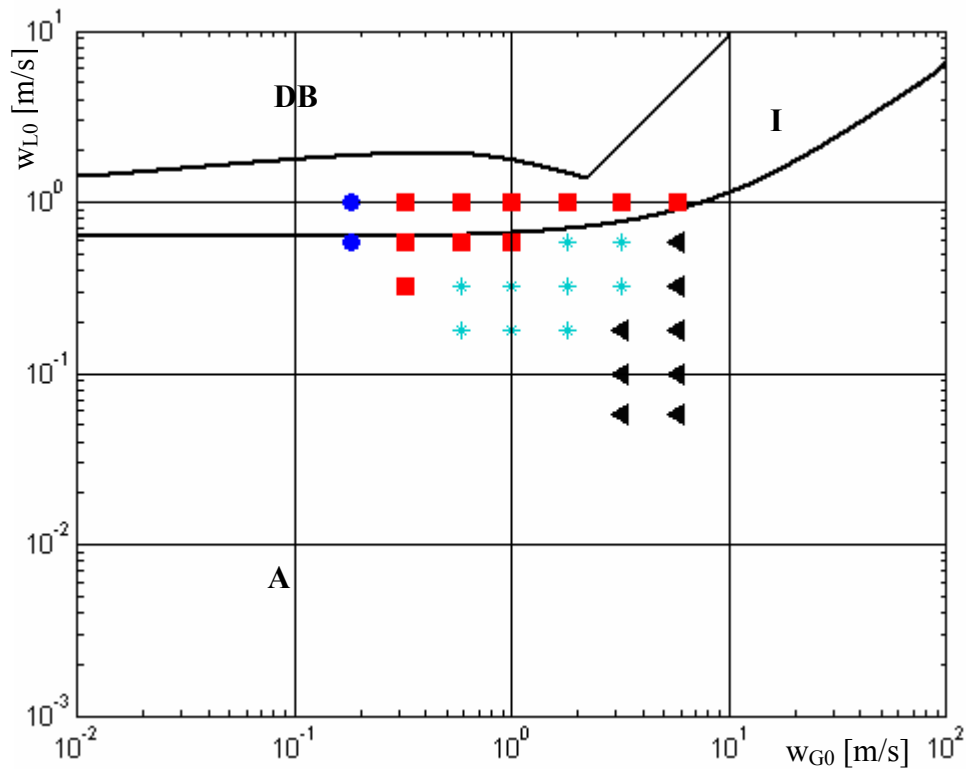
Ponieważ autor mapy używa odmiennej klasyfikacji struktur aniżeli przedstawione w niniejszej pracy postanowiono porównać:

- a) przepływ przejściowy (intermitentny = korki + wydłużone pęcherze) z rzutowym
- b) przepływ pierścieniowy z pęcherzykowo - filmowym + spływający film

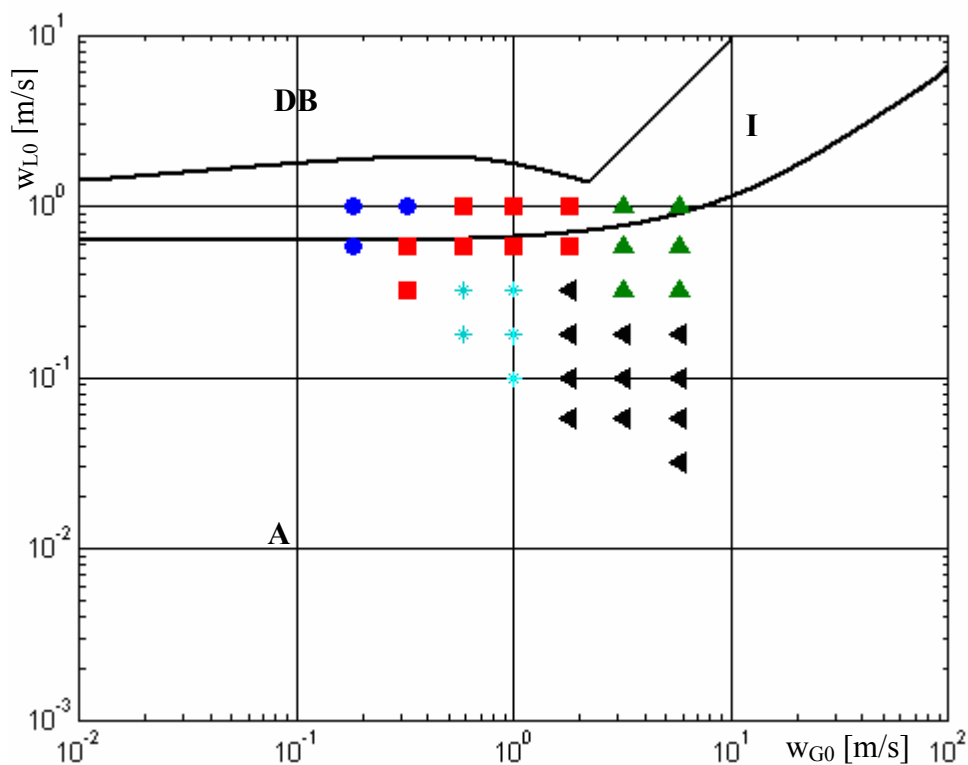
Na poniższych rysunkach (9.47 - 9.49) naniesiono wyniki badań własnych na mapę wg.: Barnea [2] dla trzech układów dystrybucja fazy gazowej.



Rys. 9.47. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg. : Barnea [2] dla przepływu opadającego przy otworkowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.48. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg.: Barnea[2] dla przepływu opadającego przy szczelinowym układzie dystrybucji fazy gazowej



Rys. 9.49. Porównanie wyników badań własnych z mapą zaprezentowaną wg.: Barnea [2] dla przepływu opadającego przy porowatym układzie dystrybucji fazy gazowej

W poniższych tabelach (9.19 – 9.21) przedstawiono porównanie wyników badań własnych dla przepływu opadającego z mapą wg. Barnea[2].

Tabela 9.19. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Barnea dla przepływu opadającego przy otworkowym układzie zasilania

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej					
		DB	B	I	F	A+FF+BF	Σ
Struktura wyznaczona wg.: Barnea	DB	0	0	0	0	0	0
	B	0	0	0	0	0	0
	I	0	2	3	1	1	7
	F	0	0	0	0	0	0
	A	0	1	6	3	24	34
	Σ	0	3	9	4	25	27
Zgodność							66%

Tabela 9.20. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Barnea dla przepływu opadającego przy szczelinowym układzie zasilania

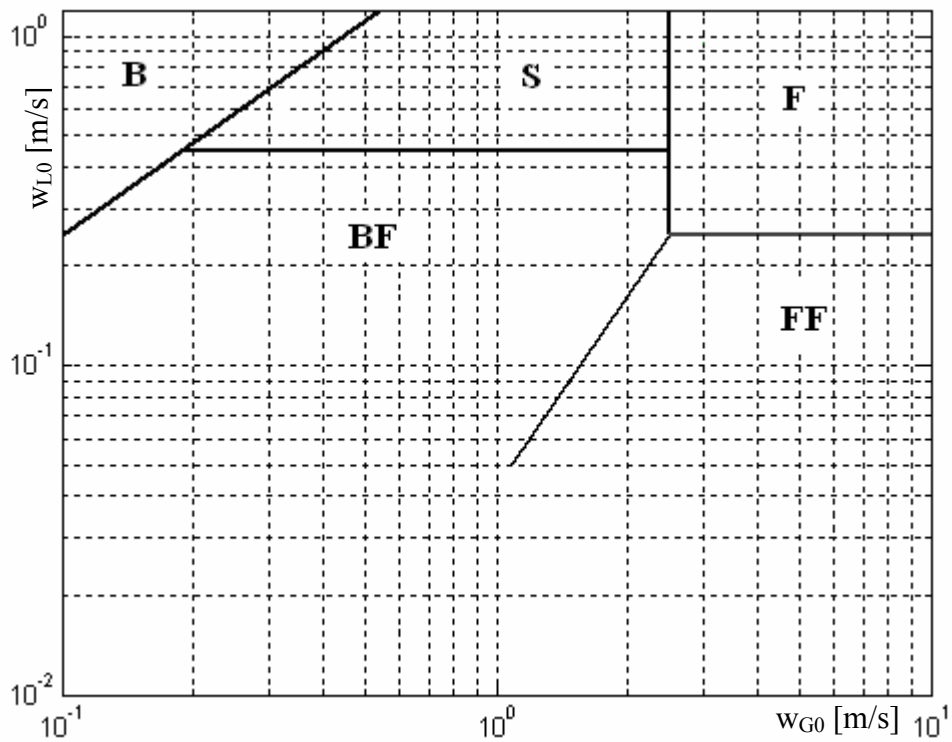
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej				
		DB	B	P	FF+BF	Σ
Struktura wyznaczona wg.: Barnea	DB	0	0	0	0	0
	B	0	0	0	0	0
	I	0	1	6	0	7
	A	0	1	4	17	22
	Σ	0	2	10	17	23
	Zgodność					80%

Tabela 9.21. Analiza porównawcza struktur przepływu obserwowanych wizualnie i wyznaczonych wg. Barnea dla przepływu opadającego przy porowatym układzie zasilania

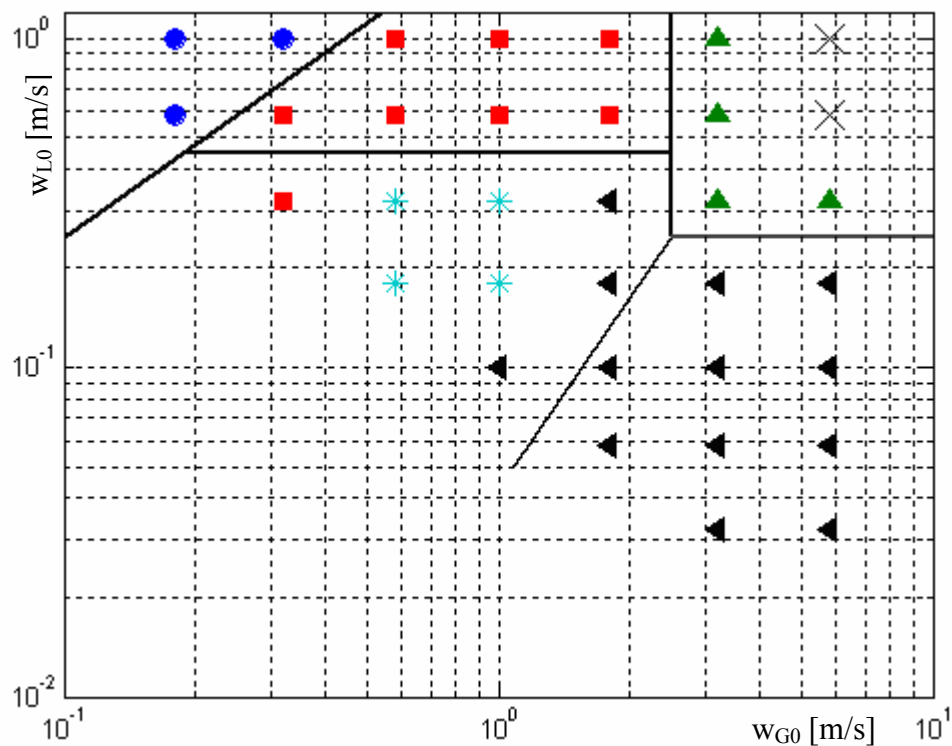
Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej					
		DB	B	I	F	FF+BF	Σ
Struktura wyznaczona wg.: Barnea	DB	0	0	0	0	0	0
	B	0	0	0	0	0	0
	I	0	2	3	2	0	7
	F	0	0	0	0	0	0
	A	0	1	5	4	16	26
	Σ	0	3	8	6	16	19
Zgodność					58%		

W tabelach 9.19 – 9.21 przedstawiono porównania wyników badań własnych z mapą wg. Barnea. Największą zgodność uzyskano dla szczelinowego układu dystrybucji (80%) a najmniejszą dla porowatego (58%). Tak niska zgodność wynika z faktu iż autor mapy nie uzyskał w swoich badaniach struktury pianowej a pęcherzykową traktuje jako strukturę przejściową i umieszcza w obszarze przepływu korkowego.

Podobnie jak w przypadku przepływu wznoszącego opracowano proponowaną mapę dla przepływu opadającego a następnie wyznaczono zgodność.



Rys. 9.50. Proponowana mapa przepływu dla aparatu węzownicowego – przepływ opadający



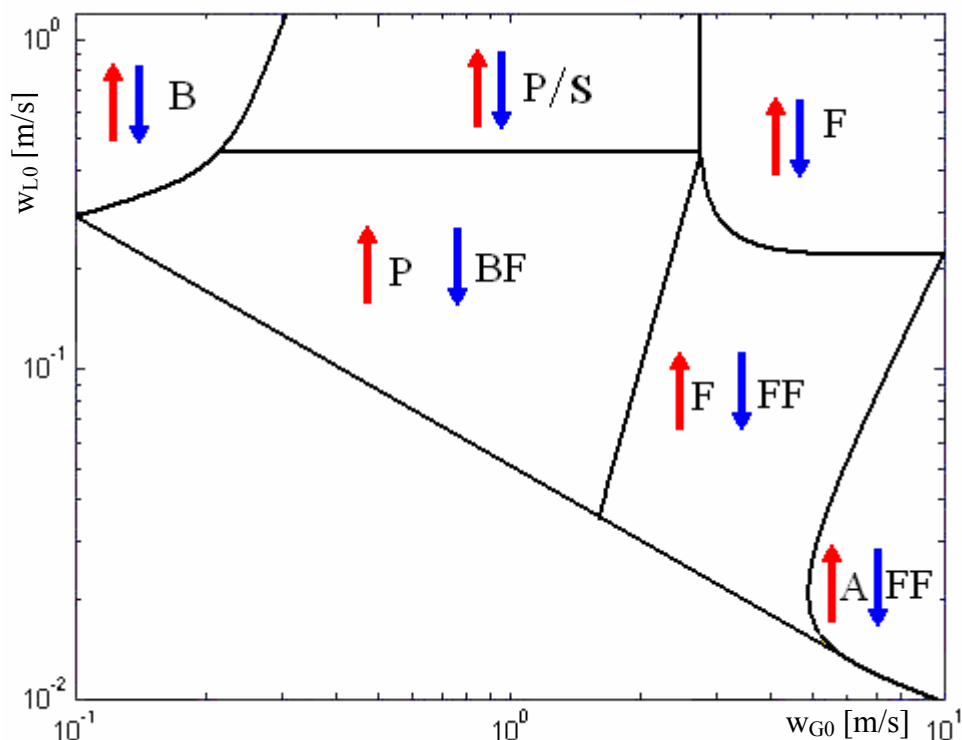
Rys. 9.51. Porównanie proponowanej mapy z wynikami badań własnych

W tabeli 9.22 przedstawiono porównanie wyników badań własnych oraz proponowanej mapy przepływu opadającego i uzyskano zgodność na poziomie 87,5%

Tabela 9.22. Analiza porównawcza struktur przepływu wyznaczonych za pomocą obserwacji wizualnej oraz proponowanej mapy przepływu opadającego

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą obserwacji wizualnej					
		B	P	F	FF	BF	Σ
Struktura wyznaczona za pomocą proponowanej mapy przepływu	B	3	0	0	0	0	3
	P	0	7	0	0	0	7
	F	0	0	4	0	0	4
	FF	0	0	0	10	0	10
	BF	0	1	0	3	4	8
	Σ	3	8	4	13	4	28
	Zgodność						87,5%

W ramach podsumowania zebrano wyniki wszystkich badań własnych przedstawione w rozdziałach 9.1 oraz 9.3 oraz uwzględniając porównania wyników badań z innymi badaczami postanowiono zaproponować obszary poprawnej pracy aparatu z równoczesnym, wznoszącym i opadającym przepływem mieszanki dwufazowej gaz ciecz w prostokątnym, pionowym kanale węzownicowym.



Rys. 9.52. Obszary poprawnej pracy aparatu z równoczesnym, wznoszącym i opadającym przepływem mieszanki dwufazowej gaz ciecz w prostokątnym, pionowym kanale węzownicowym

Tabela 9.23. Analiza porównawcza struktur przepływu wyznaczonych za pomocą proponowanych map przepływu oraz obszarów poprawnej pracy aparatu węzowniczego

Liczba punktów		Struktura wyznaczona za pomocą proponowanych map przepływu									
		B↑	B↓	P	S	F↑	F↓	A	BF	FF	Σ
Struktura wyznaczona w oparciu o obszary poprawnej pracy aparatu węzowniczego	B↑	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	B↓	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3
	P	0	0	14	0	0	0	0	0	0	14
	S	0	0	0	7	0	0	0	1	0	8
	F↑	0	0	0	1	10	0	0	0	0	11
	F↓	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4
	A	0	0	0	0	2	0	1	0	0	3
	BF	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4
	FF	0	0	0	0	0	0	0	3	10	13
	Σ	4	3	14	8	12	4	1	8	10	57
ZGODNOŚĆ										89%	

W tabeli 9.23 przedstawiono porównanie wyników badań własnych przedstawionych na rysunkach 9.47 i 9.51 w odniesieniu do obszarów poprawnej pracy aparatu węzowniczego (rys. 9.52) i uzyskano zgodność równą 89%. Tak wysoka zgodność potwierdza założenie, iż dla badanego aparatu węzowniczego warunki poprawnej pracy można określać zgodnie z rysunkiem 9.52.

9.4. Ewolucja prędkości fazy gazowej w aparacie węzowniczym

Wyznaczenie rzeczywistej prędkości fazy gazowej jest niezbędne do oceny charakteru zmian hydrodynamiki przepływu dwufazowego. Prędkość rzeczywista faz zależy od właściwości cieczy oraz od parametrów geometrycznych aparatu a jej wartości mogą być zmienne lub stałe podczas przepływu wznoszącego i opadającego. W tym celu do oceny tych zjawisk wykorzystano funkcje korelacji własnej oraz korelacji wzajemnej. Otrzymane wartości prędkości rzeczywistej przeważnie są poddawane analizie i porównaniu z funkcjonującym dla hydrodynamiki mieszanin wielofazowych modelem poślizgu faz. Analizie poddano przepływ korkowy gdyż jego charakter jest najbardziej zdeterminowany

spośród występujących struktur przepływu. Występują ponadto wyraźne przemieszczenia porcji gazu co ułatwia wyznaczenie czasu przepływu pomiędzy wybranymi punktami pomiarowymi.

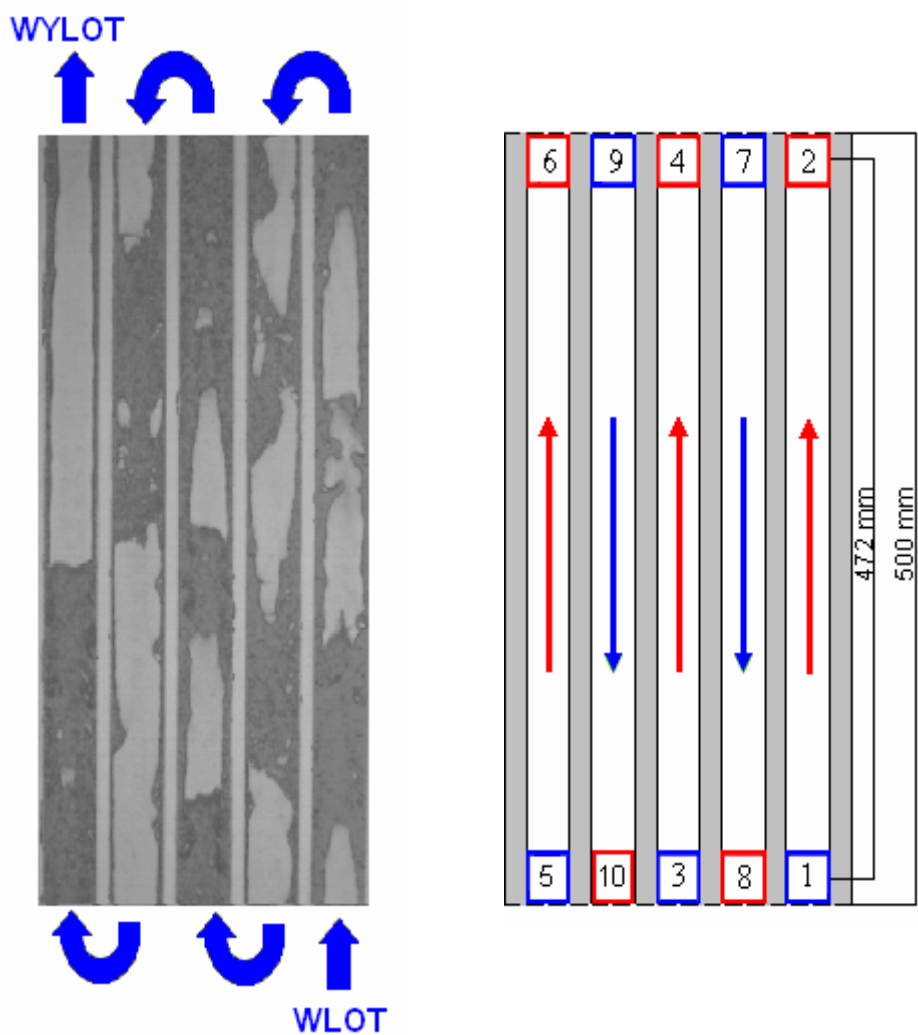
Obszary badawcze zostały rozmieszczone parami kolejno we wszystkich kanałach a ich środki były oddalone od siebie o 472 mm. Przed przystąpieniem do analizy korelacyjnej w obszarach badawczych wyznaczono czasowe przebiegi zmian poziomu szarości. Widma zmian poziomów szarości w funkcji czasu miały zbliżony kształt i były przesunięte względem siebie. Nakładanie się widm jest niezbędnym warunkiem do wyznaczenia związku korelacyjnego o dużej zgodności pomiędzy punktami badawczymi.

Okresowy charakter funkcji autokorelacji świadczy o występowaniu struktur o charakterze periodycznym.

W trakcie analizy stwierdzono, że widma funkcji korelacji wzajemnej charakteryzują się występowaniem „listków bocznych”, które zniekształcają ich przebieg. W celu wytlumienia tych zakłóceń zastosowano funkcję „okna” Hamminga. Wybór tej metody został oparty o prace [26], [62], w których badacze stwierdzają iż ten rodzaj okna jest najczęściej stosowany w przypadku funkcji autokorelacji.

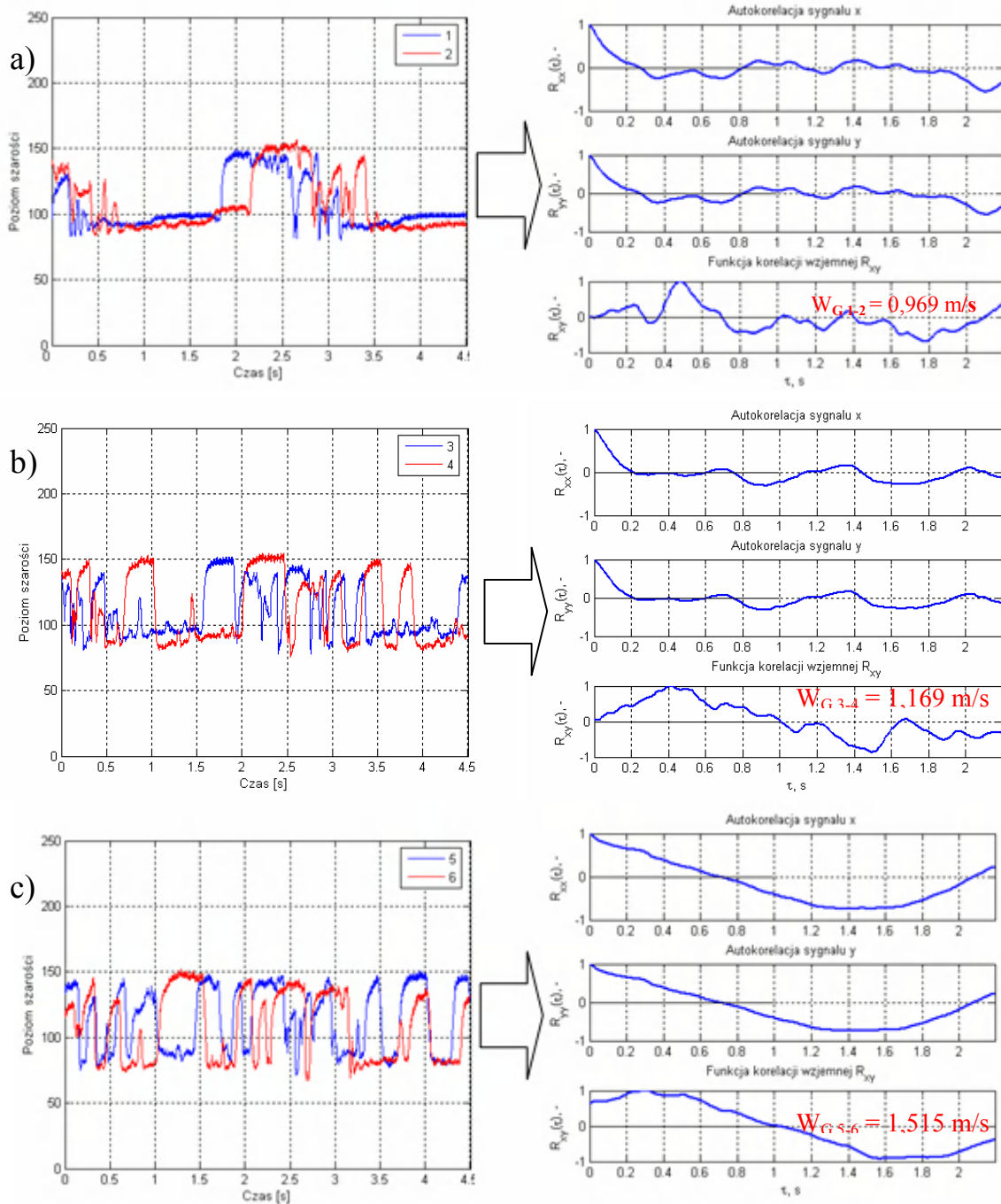
Na podstawie pracy [70] zaniechano analizę przepływu pierścieniowego, który jest przykładem rozdzielonego przepływu i model poślizgu w tym przypadku nie ma zastosowania. Postacie widma korelacji wzajemnej były rozmyte i nie występowało jedno wyraźne maksimum co świadczy o tym, że charakterystyczne formacje gazowe i cieczowe przemieszczały się z różnymi prędkościami. Przepływ porcji gazu i cieczy był chaotyczny a charakter przepływu niezdeterminowany.

Ponieważ zmiany orientacji przepływu w aparacie węzownicowym pociągają za sobą zmiany oddziaływujących sił oraz zmiany w hydrodynamice przepływu dlatego też w kierunku wznoszącym i opadającym występują często odmienne struktury dla tych samych prędkości pozornych. Z tego względu analizę korelacyjną przeprowadzono oddzielnie dla poszczególnych kierunków. Obszary badawcze (rys. 9.53) dla przepływu wznoszącego zostały oznaczone cyframi 1 - 2, 3 - 4, 5 - 6 a dla przepływu opadającego 7 - 8, 9 - 10. Ponadto aby zobrazować wpływ rodzaju dystrybutora fazy gazowej pod kątem warunków pracy aparatu, badaniom prędkości za pomocą funkcji korelacji wzajemnej poddano układ otworkowy, szczelinowy oraz ze ścianką porowatą.



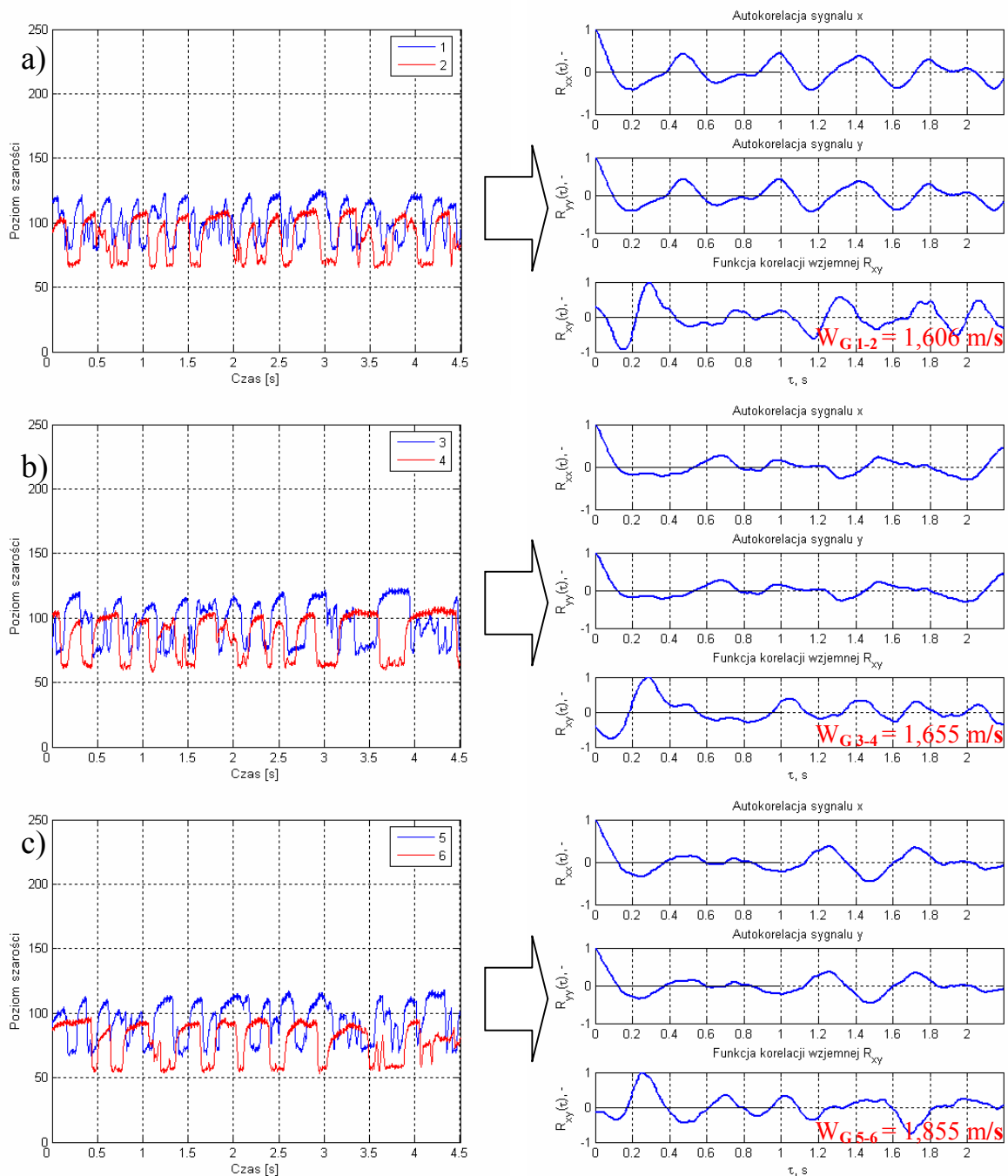
Rys. 9.53. Rozmieszczenie obszarów badawczych

Na poniższych rysunkach przedstawiono przebiegi zmian poziomów szarości w czasie oraz funkcji korelacji własnej i wzajemnej dla trzech przykładowych prędkości pozornych. Analiza ta objęła trzy kolejne kanały wznoszące w wyznaczonych obszarach badawczych zgodnie z rys. 9.53 dla trzech układów dystrybucji fazy gazowej.



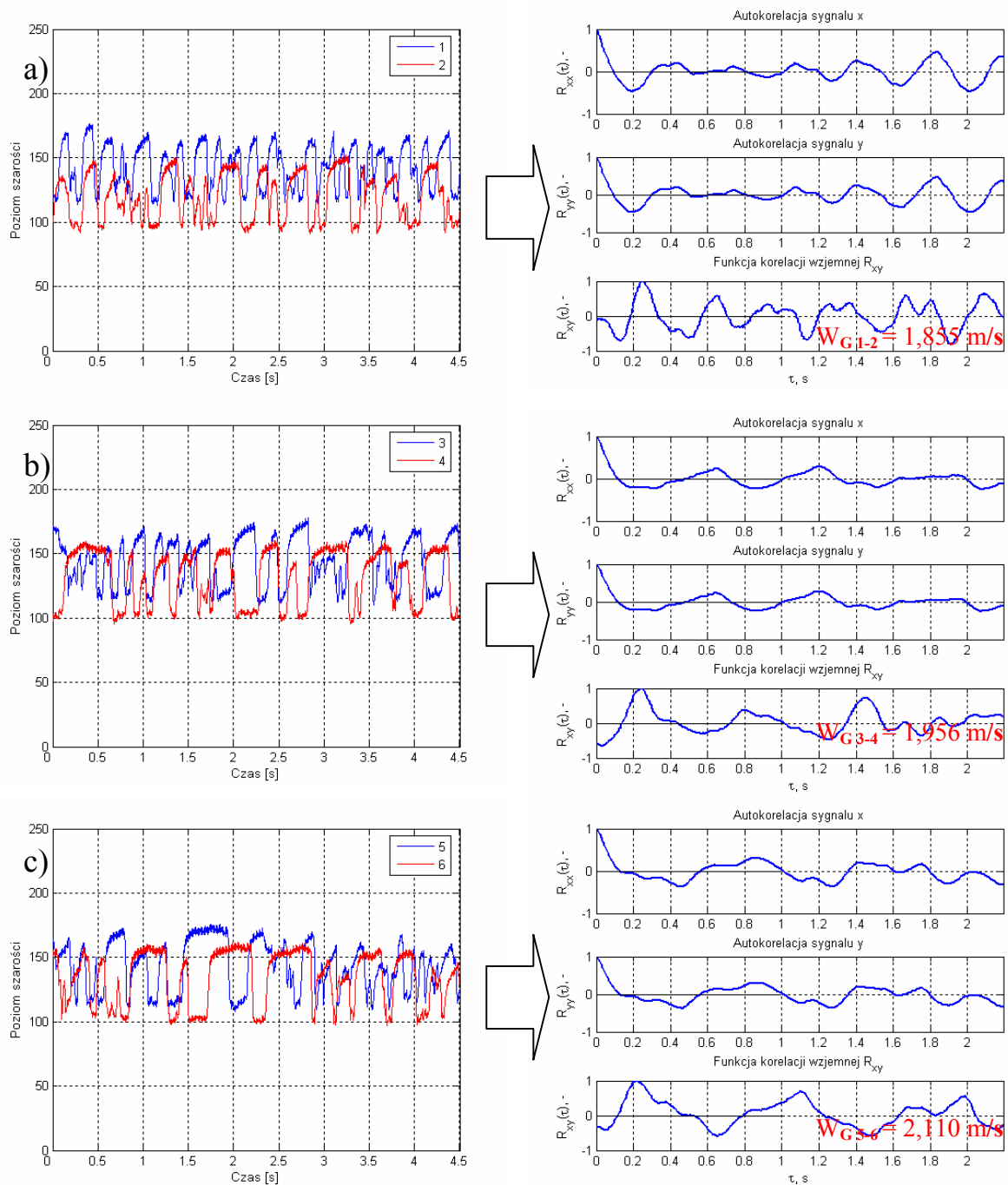
Rys. 9.54. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,32 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

Na rysunku 9.54 można zauważyć że w kolejnych kanałach wznoszących występuje coraz więcej pęcherzy gazowych o czym świadczy większa liczba pików na wykresach zmian poziomu szarości w czasie. Świadczy to o tym, że prędkość przepływu rośnie a w obszarach badawczych wychwytywanych jest coraz więcej korków powietrznych.



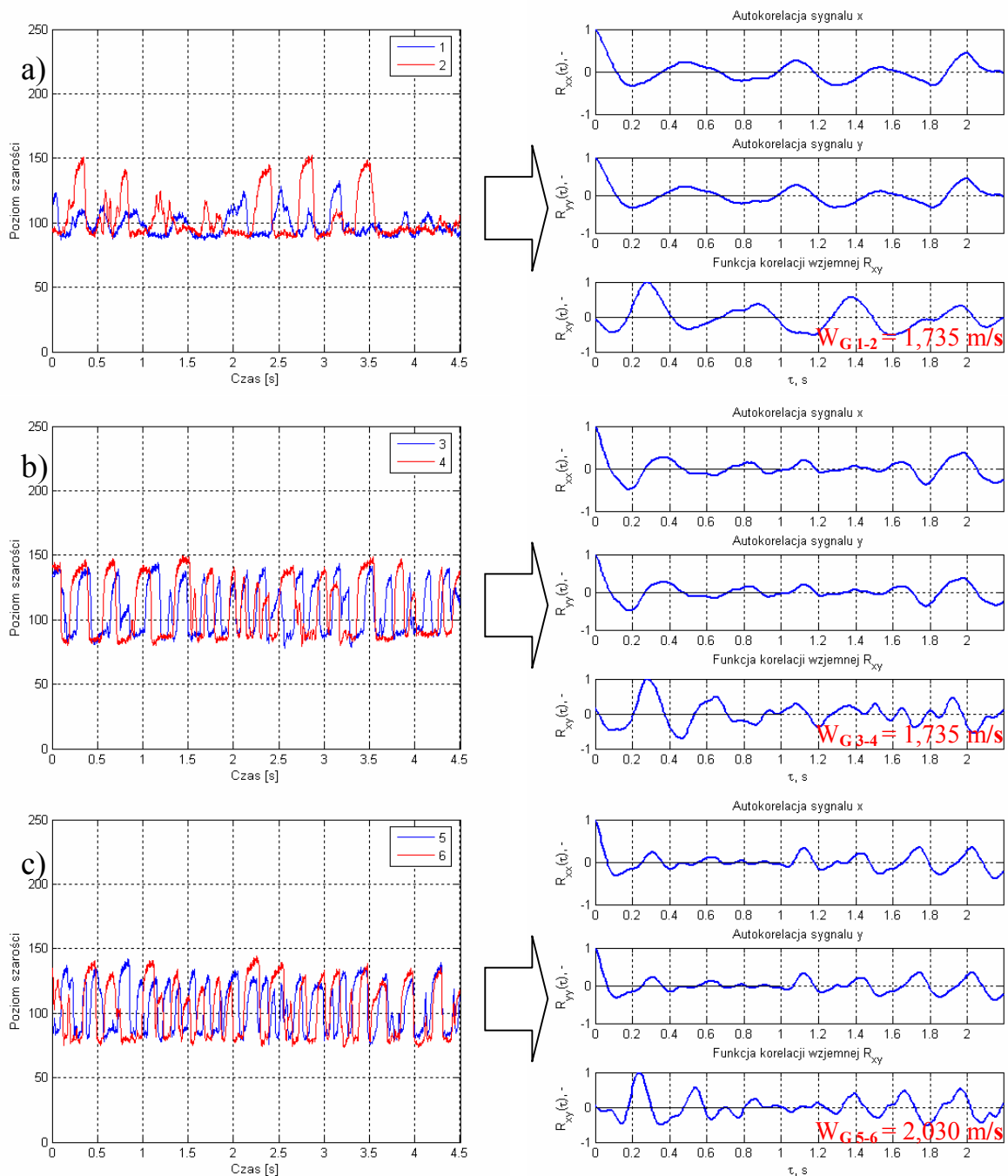
Rys. 9.55. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,32 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

Z wykresów zmian poziomów szarości w czasie (rys. 9.55) można odczytać, że korki gazowe są mniejsze w przypadku układu szczelinowego niż w układzie otworkowym. Świadczy o tym węższy zakres widma na osi odciętych. Różnice prędkości pomiędzy kolejnymi kanałami są również mniejsze aniżeli w przypadku układu otworkowego a pomiędzy pierwszym i drugim kanałem prędkość wzrasta tylko o $0,05 \text{ m/s}$.



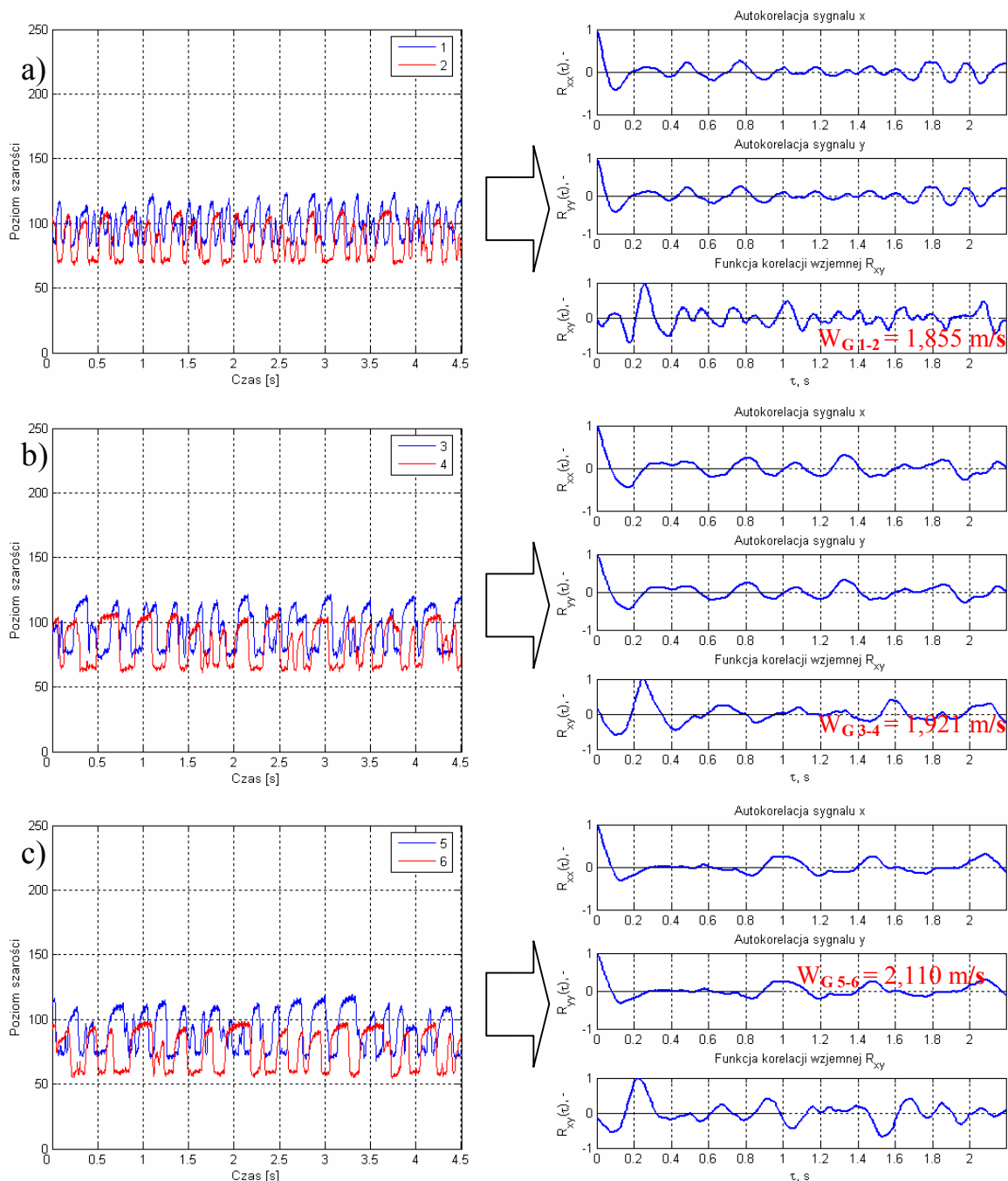
Rys. 9.56. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,32 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy porowatym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

Z analizy powyższego rysunku (9.56) wynika, że mniejsze korkowe formacje gazowe przechodzą w coraz większe. Jest to wywołane wpływem zmian kierunku przepływu na mieszaninę dwufazową oraz wzrostem prędkości rzeczywistej. Również i w tym przypadku różnica prędkości pomiędzy drugim i trzecim kanałem wznoszącym jest większa niż pomiędzy pierwszym a drugim.



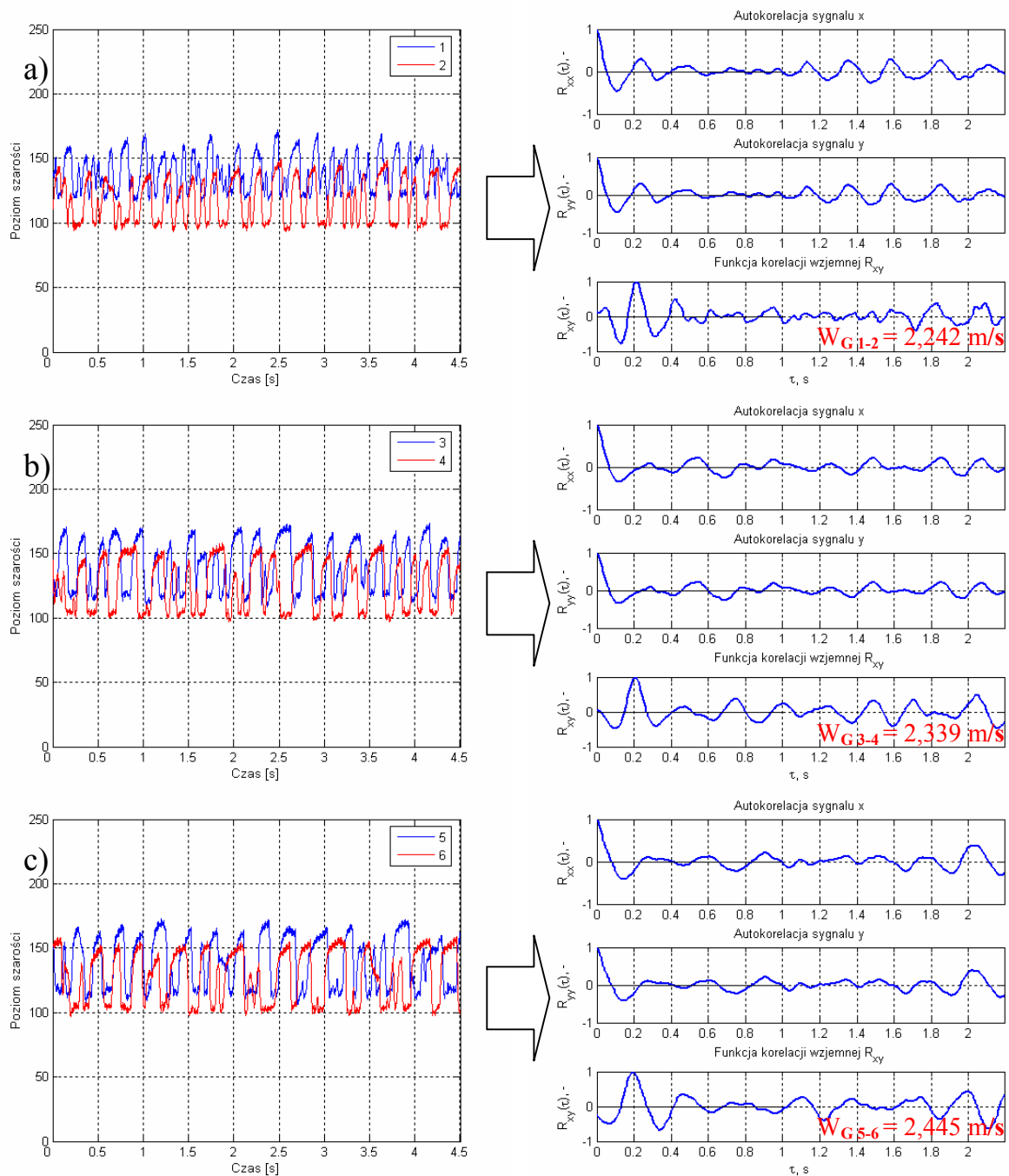
Rys. 9.57. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,58 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

Dla powyższego przypadku prędkość pomiędzy pierwszym a drugim kanałem pozostaje bez zmian natomiast zmianie ulega rodzaj przepływu. Zmianę charakteru przepływu można dostrzec już na pierwszym wykresie przebiegu zmian poziomu szarości w czasie (rys. 9.57.a) gdzie w pierwszym oknie pomiarowym występuje przepływ pęcherzykowo - korkowy natomiast w drugim korkowy. W kolejnym kanale przepływ jest już typowo korkowy w obu obszarach badawczych a w kanale wylotowym występuje większa ilość mniejszych korków co spowodowane jest ich pękaniem.



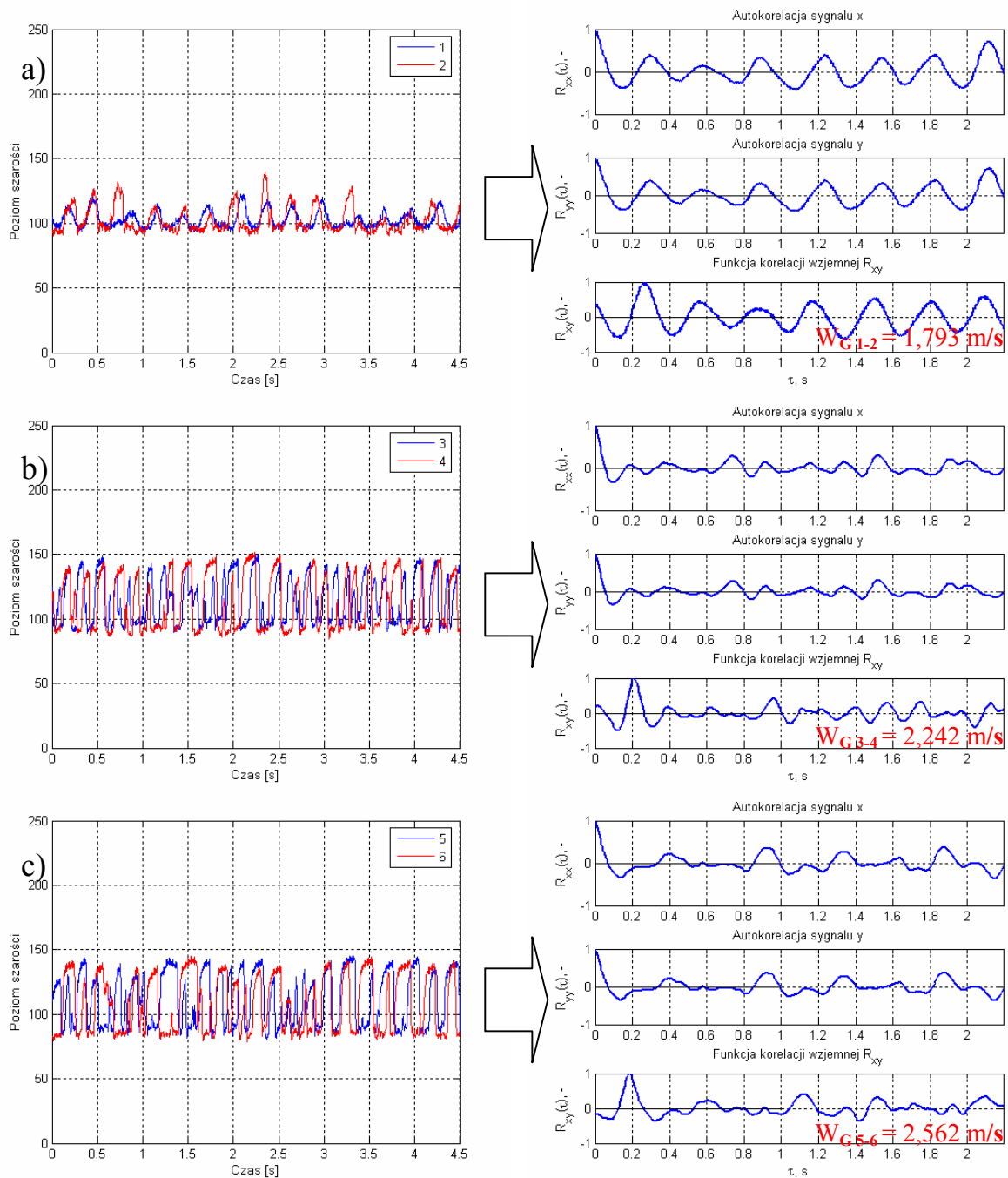
Rys. 9.58. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,58 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

Przy wyższej prędkości pozornej fazy ciekłej w pierwszym kanale wznoszącym (rys. 9.58. a) często występuje przepływ pęcherzykowo – korkowy a dopiero w kolejnych kanałach pomiarowych (rys. 9.58. b i c) przepływ stabilizuje się czego następstwem jest wytworzenie się struktury korkowej. Na to zjawisko nieodzowny wpływ ma prędkość, która wzrastając powoduje łączenie się mniejszych pęcherzyków w korki.



Rys.9.59. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 0,58 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy porowatym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

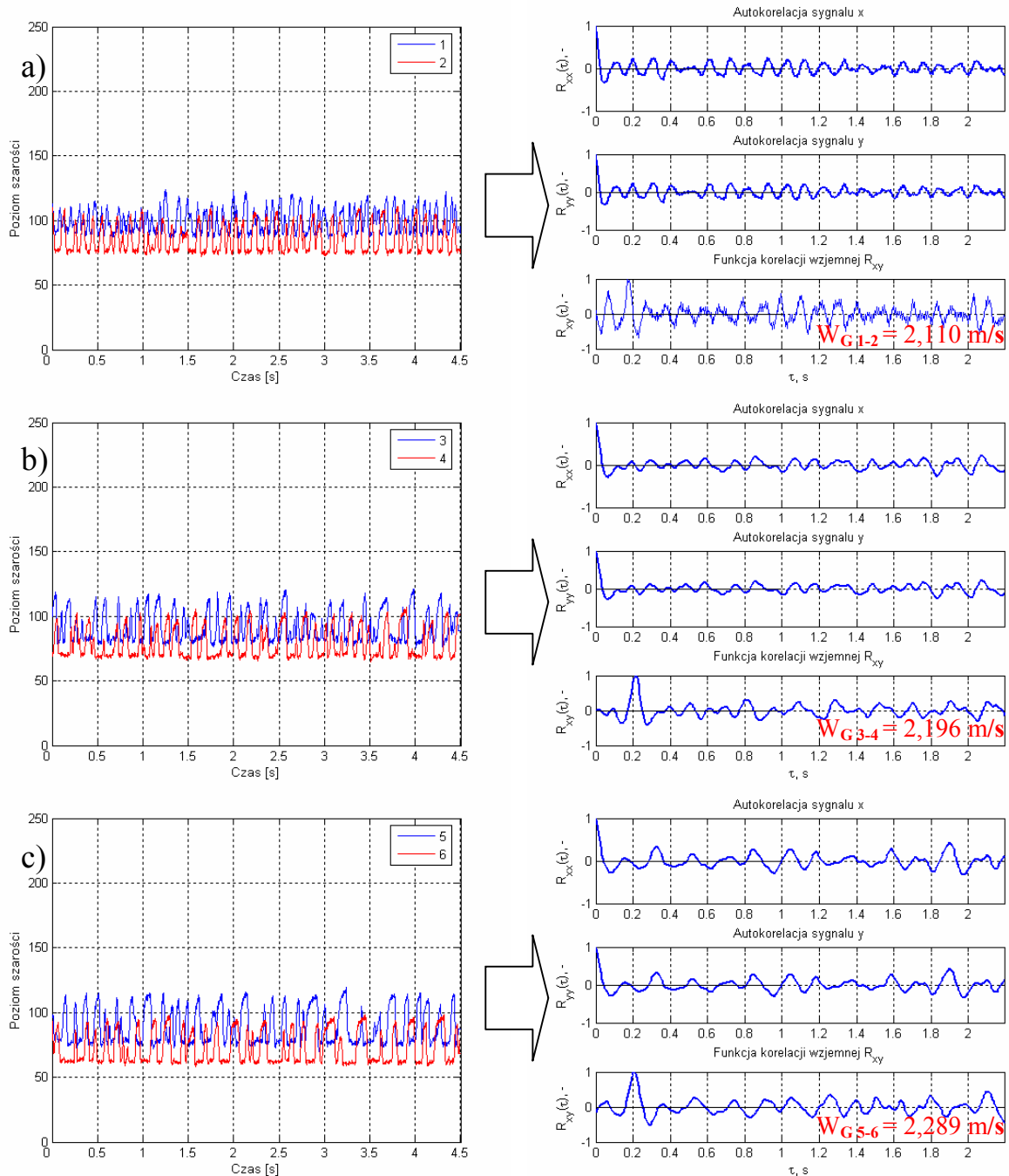
Obserwując powyższy rysunek 9.59 można zauważyć, że widma zmian poziomu szarości w czasie słabo nakładają się na siebie względem osi odciętych jednak ta różnica zmniejsza się w kierunku kanału wylotowego. Podstawowym warunkiem poprawnej analizy korelacyjnej jest nakładanie się na siebie kształtu widm względem osi OX przesuniętych w czasie $t + \tau$, zatem niewielkie różnice względem osi OY nie dyskwalifikują danego przypadku.



Rys. 9.60. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy otworkowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

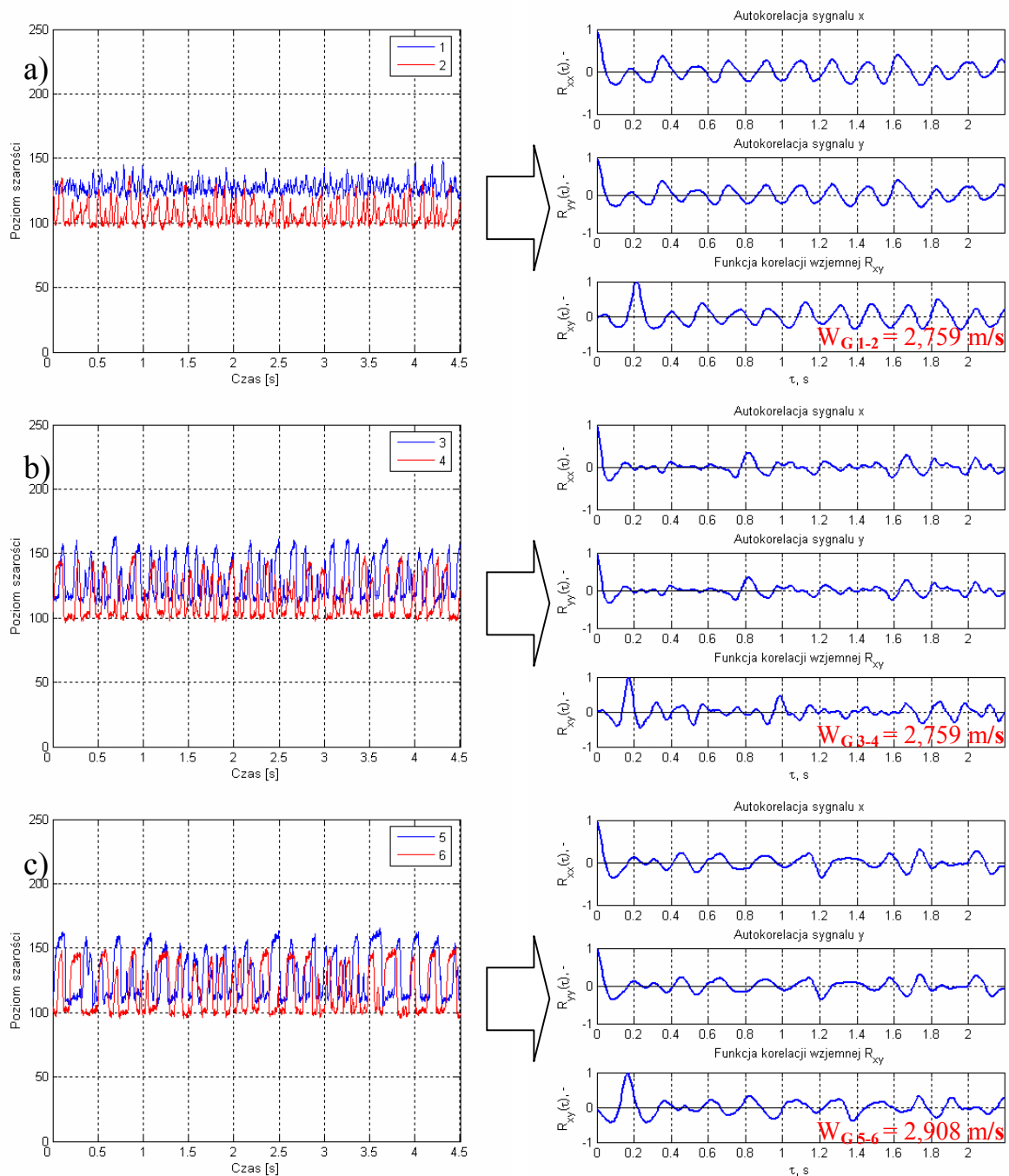
W tym przypadku wyjątkowo różnica prędkości pomiędzy pierwszym a drugim kanałem wznoszącym (rys. 9.60. a i b) jest wyższa aniżeli pomiędzy drugim a wylotowym (rys. 9.60. b i c). Jest to spowodowane tym, że w pierwszym kanale wystąpiła struktura typowo pęcherzykowa a nagle przejście do struktury korkowej wywołało wysoki wzrost prędkości. Kanał wlotowy charakteryzuje się tym, że występują w nim najmniejsze opory

przepływu a rodzaj występującej w nim struktury jest w niewielkim ale istotnym stopniu kształtowany przez rodzaj dystrybutora.



Rys. 9.61. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy szczelinowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

Dla tej samej prędkości pozornej w przypadku układu otworkowego (rys. 9.60) we wszystkich kanałach wystąpiła struktura korkowa. Przy szczelinowym układzie (rys. 9.61), w pierwszym kanale wystąpiła struktura pęcherzykowa a w pozostałych korkowa.

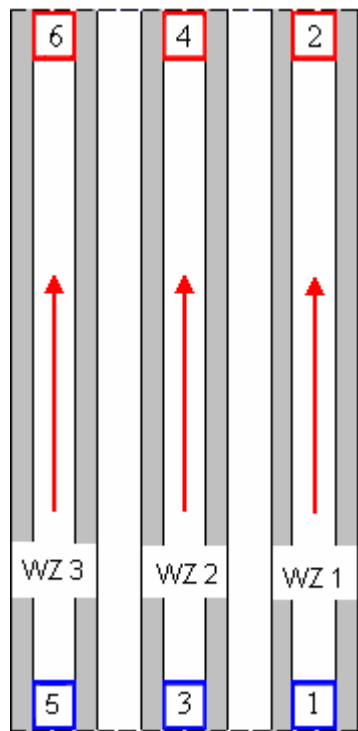


Rys. 9.62. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu wznoszącego przy porowatym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 1-2, b) 3-4, c) 5-6

Na powyższym przykładzie (rys. 9.62) we wszystkich przypadkach przepływ miał charakter pęcherzykowo – korkowy z tendencją do coraz większych formacji gazowych.

W poniższej tabeli (9.24) zebrano wyniki badań nad ewolucją prędkości fazy gazowej podczas przepływu wznoszącego w aparacie węzownicowym.

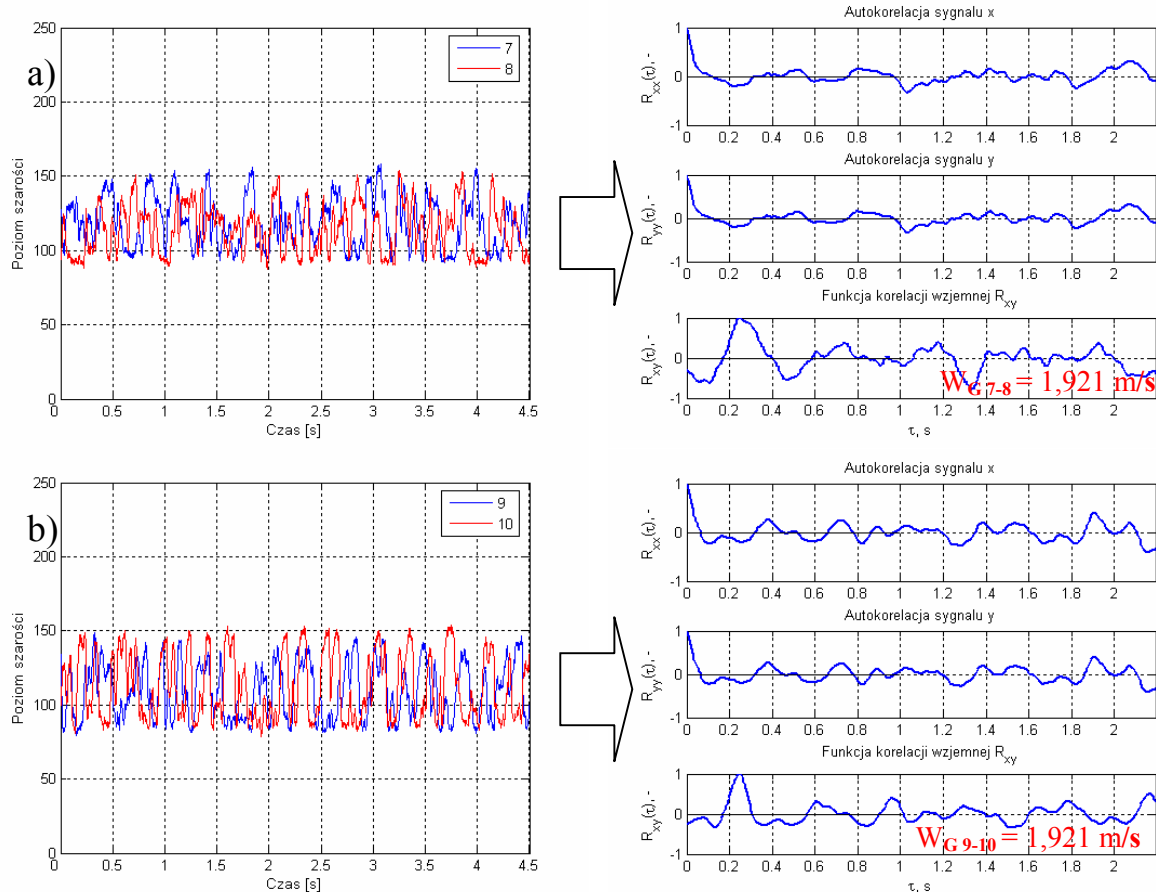
Tabela 9.24. Tabela zbiorcza wyników badań nad ewolucją prędkości dla przepływu wznoszącego



Prędkość pozorna [m/s]	Rodzaj dystrybutora fazy gazowej	Kanał	Czas przepływu [s]	Prędkość [m/s]
$W_{G0} = 1$ $W_{L0} = 0,32$	otworkowy	WZ 1	0,486	0,969
		WZ 2	0,403	1,169
		WZ 3	0,293	1,515
	szczelinowy	WZ 1	0,293	1,606
		WZ 2	0,285	1,655
		WZ 3	0,254	1,855
	ze ścianką porowatą	WZ 1	0,254	1,855
		WZ 2	0,241	1,956
		WZ 3	0,223	2,110
$W_{G0} = 1$ $W_{L0} = 0,58$	otworkowy	WZ 1	0,271	1,735
		WZ 2	0,271	1,735
		WZ 3	0,232	2,030
	szczelinowy	WZ 1	0,254	1,855
		WZ 2	0,245	1,921
		WZ 3	0,223	2,110
	ze ścianką porowatą	WZ 1	0,210	2,242
		WZ 2	0,201	2,339
		WZ 3	0,192	2,455
$W_{G0} = 1$ $W_{L0} = 1$	otworkowy	WZ 1	0,263	1,793
		WZ 2	0,210	2,242
		WZ 3	0,184	2,562
	szczelinowy	WZ 1	0,223	2,110
		WZ 2	0,214	2,196
		WZ 3	0,206	2,289
	ze ścianką porowatą	WZ 1	0,171	2,759
		WZ 2	0,171	2,759
		WZ 3	0,162	2,908

Na podstawie powyższej tabeli zaobserwowano, że prędkość przepływu w kolejnych kanałach wznoszących rośnie a w dwóch przypadkach jest stała ale tylko w pierwszych dwóch kolumnach WZ 1 i WZ 2. Przyrost wartości prędkości nigdy nie jest wyższy od 19,4% pomiędzy kolejnymi kanałami. Ponadto prędkość nigdy nie przybiera wartości malejących podczas przepływu mieszaniny dwufazowej przez aparat zatem można stwierdzić iż ewolucja zjawisk hydrodynamicznych ma charakter zorientowany. Rozkład koncentracji faz sprawia, że przy tych samych prędkościach pozornych faz następuje mniejsze rozproszenie fazy gazowej i wzrost prędkości rzeczywistej struktur gazowych. Pomimo tych samych zadanych prędkości pozornych w trzech układach dystrybucji fazy gazowej, układ otworkowy charakteryzował się najniższymi prędkościami natomiast ze ścianką porowatą najwyższymi.

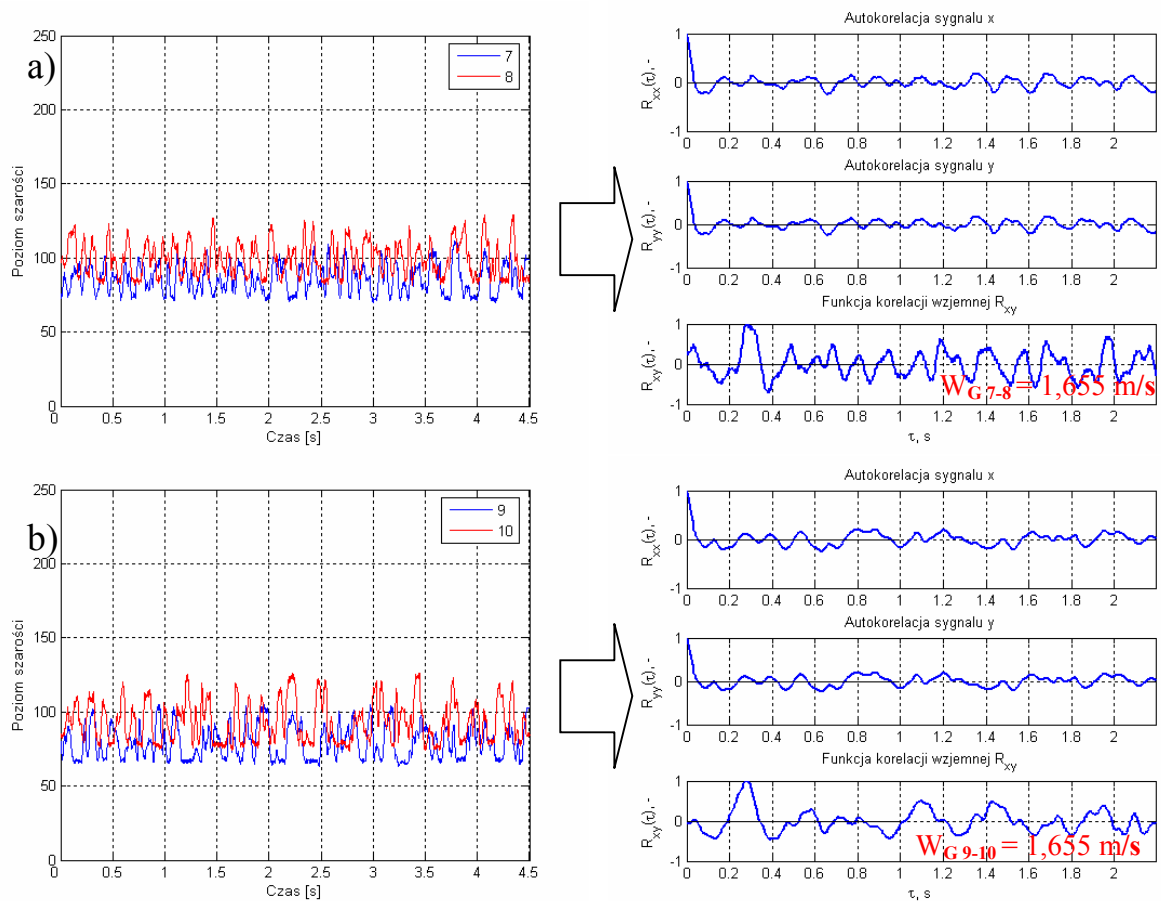
Na poniższych rysunkach przedstawiono przebiegi zmian poziomów szarości w czasie oraz funkcji korelacji własnej i wzajemnej dla dwóch przykładowych prędkości pozornych. Analizowano dwa kolejne kanały opadające w wyznaczonych obszarach badawczych zgodnie z rys. 9.53 dla trzech układów dystrybucji fazy gazowej.



Rys.9.63. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu opadającego przy otwórkowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 7-8, b) 9-10

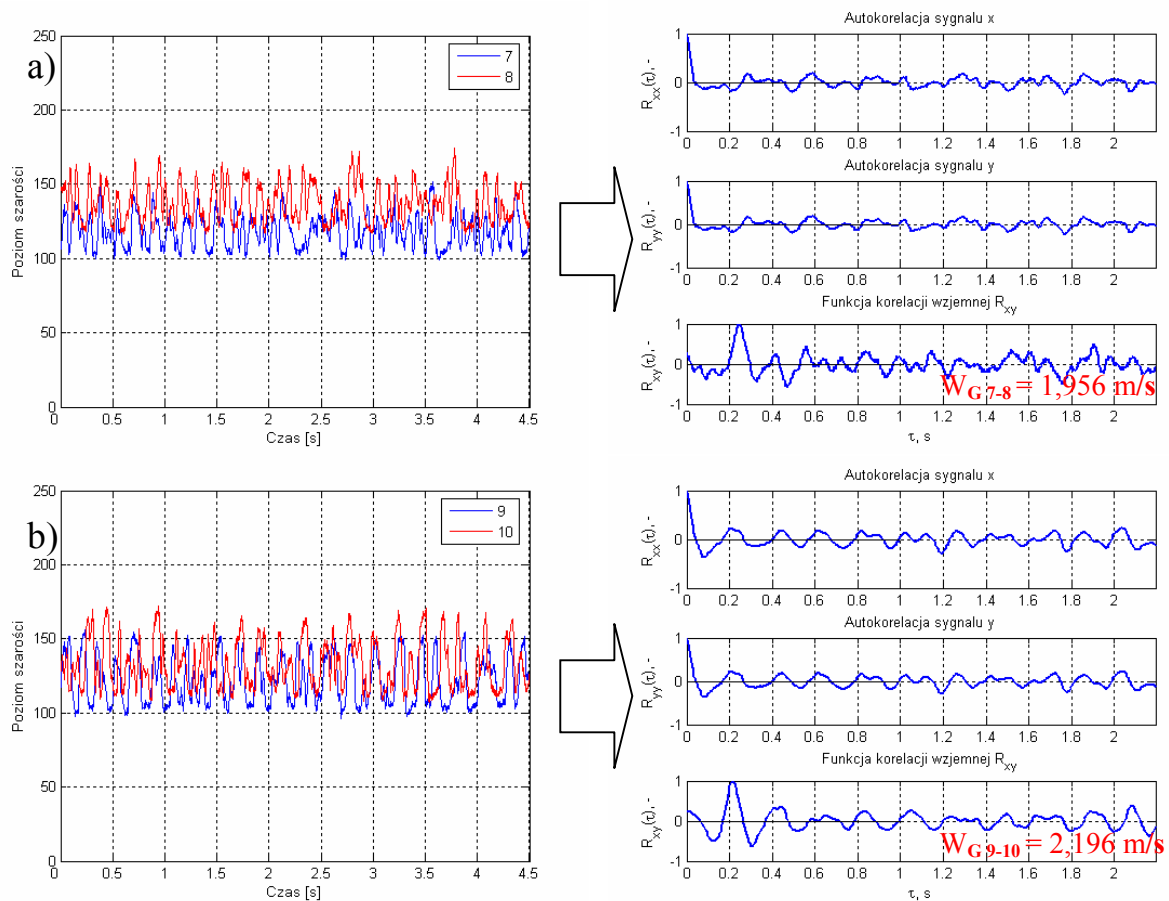
Patrząc kolejno przez kanały aparatu węzownicowego można zauważyć, że przepływ mieszaniny dwufazowej w kanałach opadających (rys. 9.63) cechuje się większą stabilizacją niż w kanałach wznoszących. Jest to spowodowane tym, że rodzaj dystrybutora nie odgrywa tu znaczącej roli a dana struktura przepływu ukształtowała się już zasadniczo w kanale wlotowym pod wpływem określonego układu zasilania. Dla kanałów z opadającym przepływem niejako dystrybutorem jest łuk łączący kanały sąsiednie.

Nie występuje tutaj sytuacja, w której radykalnie zmienia się struktura przepływu. Ewolucja mieszaniny polega natomiast na zagęszczeniu oraz łączeniu w większe obiekty przemieszczających się formacji gazowych.



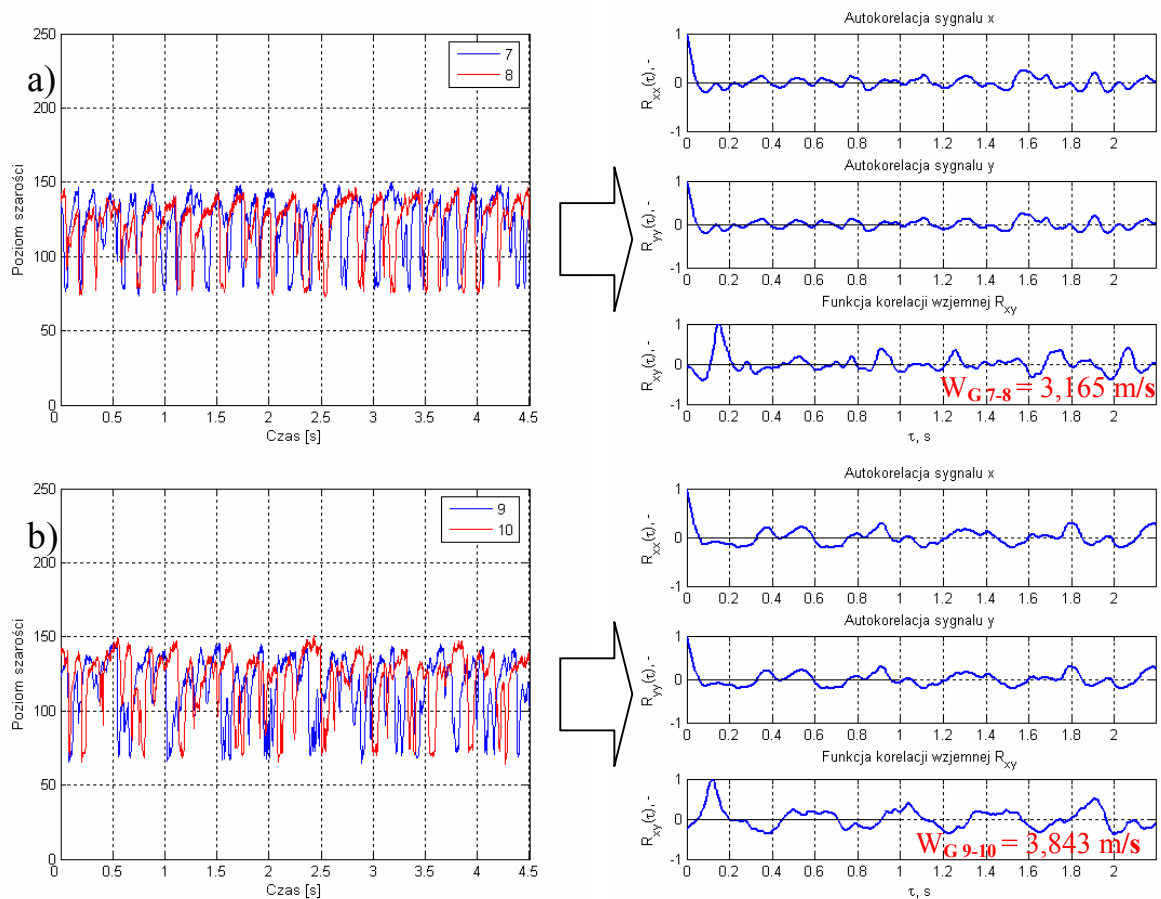
Rys.9.64. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu opadającego przy szczelinowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 7-8, b) 9-10

Z powyższego przykładu (rys. 9.64) wynika, że pomimo jednakowej prędkości fazy gazowej następuje ewolucja w kolejnych kanałach opadających. Zatem zmiana charakteru przepływu (w tym przypadku łączenie się mniejszych korków gazowych w większe formacje) nie zawsze pociąga za sobą wzrost prędkości.



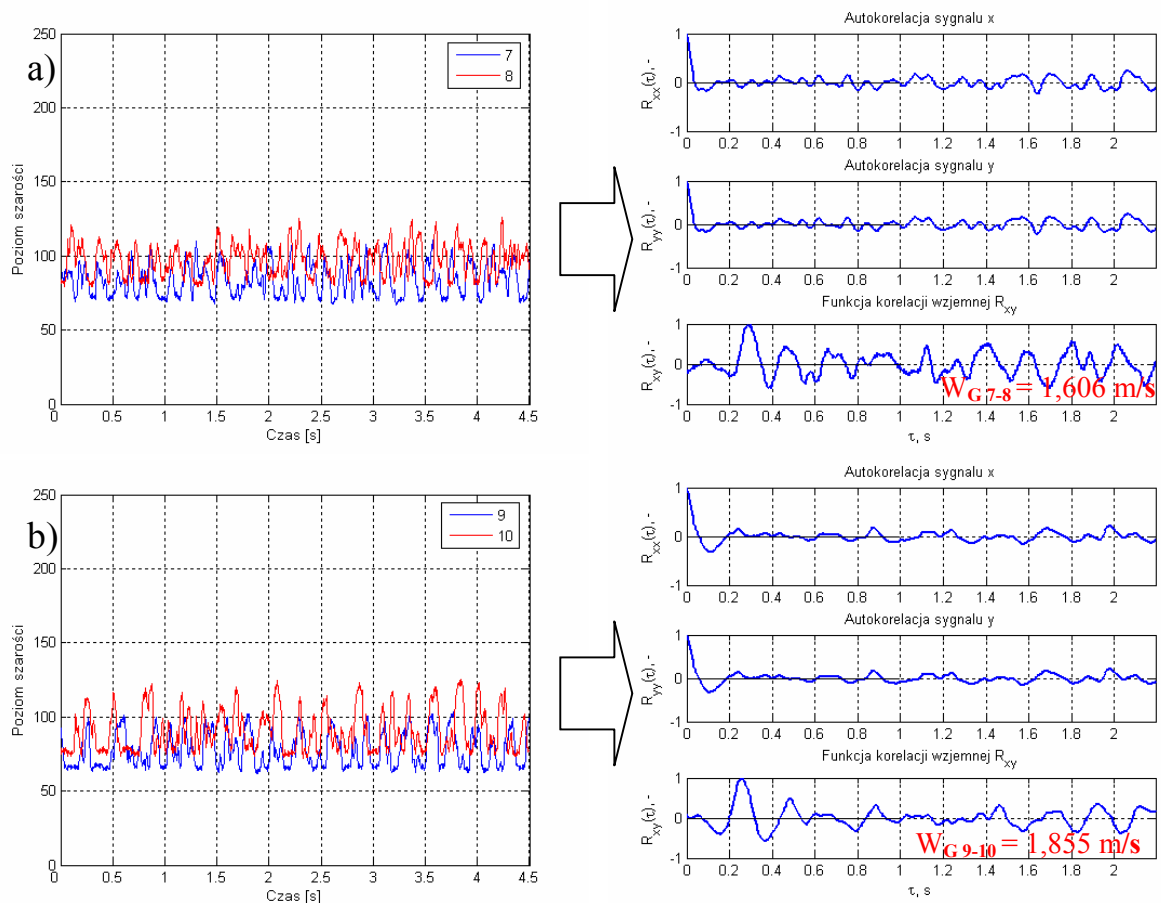
Rys. 9.65. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu opadającego przy porowatym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 7-8, b) 9-10

Na rysunku 9.65 można zauważyć że pomimo wzrostu prędkości, przepływ mieszaniny dwufazowej ulega stabilizacji pod kątem zmniejszonej rozbieżności pomiędzy przebiegami zmian poziomu szarości w czasie. Świadczy to o tym, że przemieszczające się struktury gazowe nie zmieniają objętości.



Rys. 9.66. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1,8 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu opadającego przy otworkowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 7-8, b) 9-10

Im wyższa jest prędkość pozorna fazy gazowej tym różnice prędkości wyznaczone za pomocą funkcji korelacji wzajemnej pomiędzy kolejnymi kanałami są większe (rys. 9.66). Na poprzednim przykładzie (rys. 9.65) różnica ta wyniosła aż 21%. Natomiast dla wcześniejszego przykładu (rys. 10.63), gdzie $w_{G0} = 1 \text{ m/s}$ i $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$ (układ otworkowy), prędkość nie zmieniła się wcale.

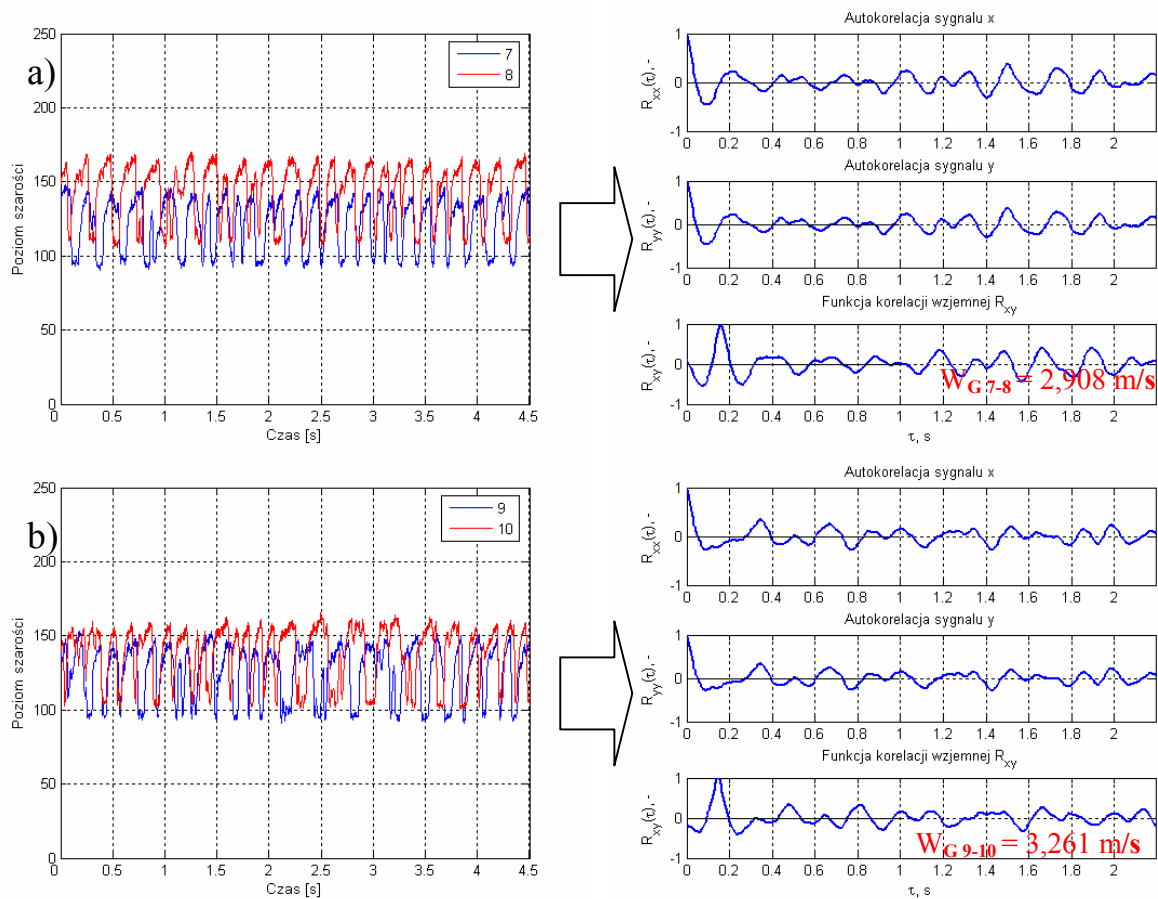


Rys. 9.67. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1,8 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu opadającego przy szczelinowym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 7-8, b) 9-10

W przypadku szczelinowego układu zasilania różnice prędkości pomiędzy kolejnymi kanałami opadającymi były najmniejsze. Dla pierwszego analizowanego przykładu (rys. 9.64) gdzie prędkości pozorne wynosiły $w_{G0} = 1 \text{ m/s}$ i $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$, prędkość nie uległa zmianie. Natomiast dla drugiego (rys. 9.67) gdzie $w_{G0} = 1,8$ i $w_{L0} = 1$ prędkość wzrosła o 15,5%.

Prędkość w układzie zasilania ze ścianka porowatą zmieniała się kolejno dla:

- $w_{G0} = 1 \text{ m/s}$ i $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$ o 11,7 % (rys.9. 65),
- $w_{G0} = 1,8 \text{ m/s}$ i $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$ o 12,3 % (rys.9. 68).



Rys. 9.68. Ewolucja prędkości ($w_{G0} = 1,8 \text{ m/s}$; $w_{L0} = 1 \text{ m/s}$) przepływu opadającego przy porowatym układzie zasilania dla obszarów badawczych: a) 7-8, b) 9-10

Tabela 9.25. Tabela zbiorcza wyników badań nad ewolucją prędkości dla przepływu opadającego

Prędkość pozorna [m/s]	Rodzaj dystrybutora fazy gazowej	Kanał	Czas przepływu [s]	Prędkość [m/s]
$w_{G0} = 1$ $w_{L0} = 1$	otworkowy	OP 1	0,245	1,921
		OP 2	0,245	1,921
	szczelinowy	OP 1	0,285	1,655
		OP 2	0,285	1,655
	ze ścianką porowatą	OP 1	0,241	1,965
		OP 2	0,214	2,196
$w_{G0} = 1,8$ $w_{L0} = 1$	otworkowy	OP 1	0,149	3,165
		OP 2	0,122	3,843
	szczelinowy	OP 1	0,293	1,606
		OP 2	0,254	1,855
	ze ścianką porowatą	OP 1	0,162	2,908
		OP 2	0,144	3,261

Podsumowanie

Korelacja fluktuacji poziomów szarości została wykorzystana w niniejszej pracy w celu określenia rzeczywistych prędkości struktur gazowych. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że prędkość jest wyższa w kanałach wznoszących ponadto w kolejnych kanałach aparatu węzownicowego zarówno dla przepływu wznoszącego (WZ1, WZ2, WZ3) jak i opadającego (OP1, OP2) prędkość przeważnie wzrasta. Prędkość rzeczywista struktury gazowej jest wyższa niż prędkość pozorna co jest spowodowane tym że fazy zajmują pole przekroju mniejsze niż przekrój poprzeczny kanału. Dysponując tak wyznaczonymi wartościami prędkości rzeczywistej gazu postanowiono wykorzystać je do wyznaczenia udziału objętościowego fazy gazowej.

9.5. Wyznaczanie prędkości oraz udziału objętościowego fazy gazowej według modelu poślizgu faz

Jednym z najważniejszych parametrów opisujących hydrodynamikę przepływu dwufazowego jest udział objętościowy gazu. Znajomość tego parametru jest niezbędna do wyznaczania gęstości oraz całkowitego spadku ciśnienia podczas przepływu mieszaniny. Udział objętościowy fazy gazowej – α_G jest ściśle powiązany z udziałem objętościowym fazy ciekłej - α_L co opisuje zależność:

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \quad (9 - 1)$$

Udział objętościowy fazy gazowej jest uzależniony od wielu parametrów, jednak główną rolę w jego kształtowaniu odgrywa wielkość strumieni dozowanych faz, właściwości fizyczne gazu i cieczy oraz kierunek przepływu mieszaniny.

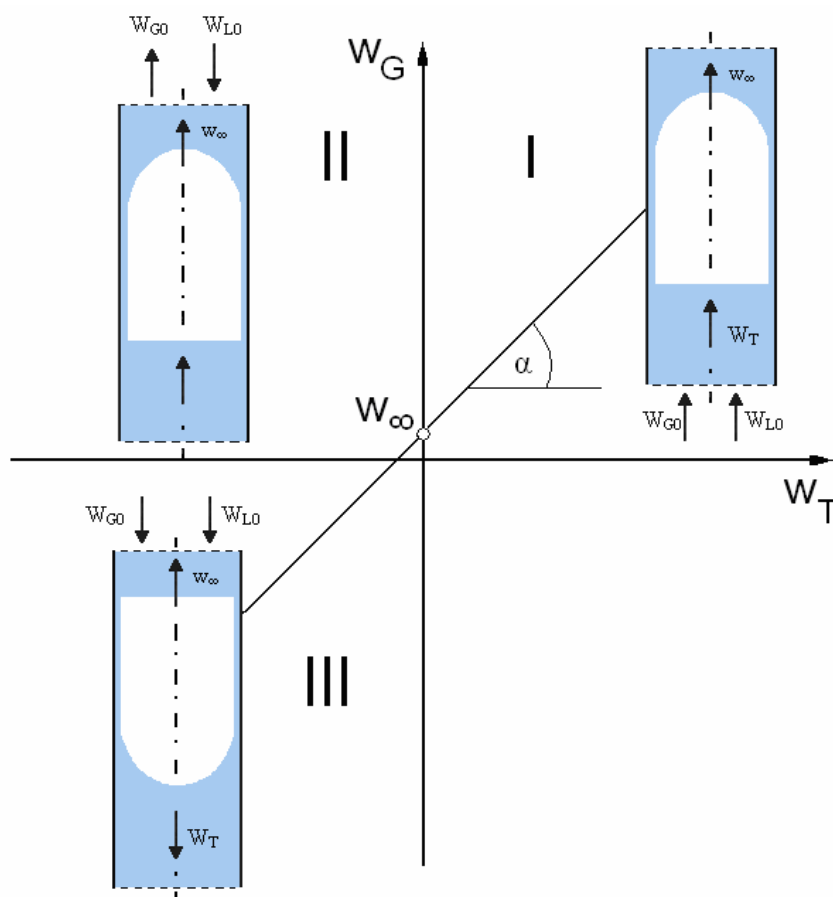
Ze względu na to, że geometria, właściwości fizyczne a także kierunek przepływu, w uogólnieniu można przyjąć za parametry niezmiennie w konkretnych badaniach, to głównym czynnikiem decydującym o wartości udziału objętościowego są strumienie dozowanych faz.

Istnieje wiele metod obliczeniowych pozwalających na wyznaczenie tego parametru. W zdecydowanej większości przypadków propozycje korelacji odnoszą się do przepływu wznoszącego w kanale pionowym lub poziomym. W niniejszej pracy postanowiono zastosować metodę obliczeniową zaprezentowaną przez Zuber – Findlaya [116]. Metoda ta nosi miano modelu poślizgu i określa prędkość przepływu korka gazu w mieszaninie dwufazowej jako superpozycję ruchu tej mieszaniny z prędkością w_T oraz względnego ruchu (unoszenia) korka gazu w_∞ . Zatem rzeczywistą prędkość struktur gazowych obliczono z równania:

$$w_G = C_0 w_T \pm w_\infty \quad (9-2)$$

gdzie w_∞ to prędkość dryfu, którą można również określić jako prędkość fazy gazowej w nieskończonej objętości nieruchomej cieczy, zaś C_0 to współczynnik rozkładu.

Zależność (9-2) można przedstawić na wykresie (rys. 9.69) wspólnym dla różnych kierunków przepływu faz.



Rys. 9.69. Przepływ struktur korkowych w kanale pionowym: I – współprądowy wznoszący, II – przeciwprądowy, III – współprądowy opadający wg.: [95]

Na rysunku 9.69 zostały przedstawione wszystkie przypadki przepływu jednak na potrzeby niniejszej pracy w jej dalszej części odniesiono się tylko do przepływu współprądowego a więc I i III ćwiartki układu.

Sumaryczna prędkość fazy gazowej i porcji cieczy określona jest równaniem:

$$w_T = w_{GO} + w_{LO} \quad (9-3)$$

Wartość drugiego parametru modelu poślizgu, a mianowicie prędkości dryfu w_∞ jest silnie uzależniona od rodzaju struktury przepływającej mieszaniny dwufazowej. W literaturze

można znaleźć równania umożliwiające obliczenie wartości prędkości dryftu i przedstawiono je w tabeli 9.26.

Tabela 9.26. Równania korelacyjne prędkości dryftu w_∞ , wg.: [29], [30], [31]

Przepływ pęcherzykowy	$w_\infty = \sqrt{2} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_L^2} \right)^{0,25} (1 - \alpha)^{1,75}$	$w_\infty = 0,154$	(9 - 4)
Przepływ korkowy	$w_\infty = \left(0,23 + 0,13 \frac{s_b}{w_b} \right) \sqrt{\frac{\Delta \rho g w}{\rho_L}}$	$w_\infty = 0,248$	(9 - 5)
Przepływ rzutowy	$w_\infty = 0,35 \left(\frac{g D \Delta p}{\rho_L^2} \right)^{0,5}$	$w_\infty = 0,102$	(9 - 6)

Zgodnie z pracą [95] wartość współczynnika rozkładu C_0 dla przepływu wznoszącego mieści się w przedziale od 1,1 do 1,3. W literaturze istnieje wiele propozycji wartości parametru rozkładu dla przepływu wznoszącego: [13], [22], [31].

Współczynnik rozkładu C_0 dla przepływu pęcherzykowego i korkowego w kanale wyraża się zależnością, zgodnie z pracą [45]:

$$C_0 = 1,2 + 0,510 e^{-0,691 d_h} \quad (9 - 7)$$

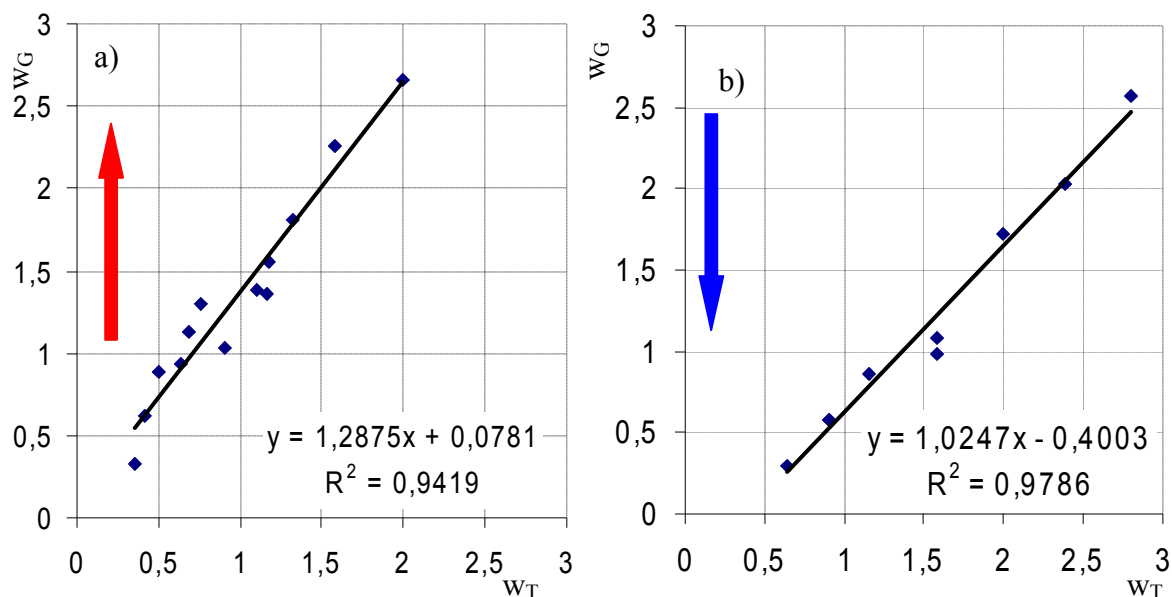
Dla przepływu opadającego zgodnie z pracą [92] współczynnik rozkładu jest niższy niż dla przepływu wznoszącego, zbliżony do 1 i zwykle można przyjąć, że $C_0 < 1,1$.

Dzięki przeprowadzonym w niniejszej pracy unikalnym badaniom, zamiast korzystać z ogólnych danych literaturowych, istnieje możliwość weryfikacji modelu poślizgu na podstawie badań przeprowadzonych, co szczególnie ważne, na tej samej instalacji zarówno dla współprądowego wznoszącego jak i opadającego przepływu mieszaniny dwufazowej.

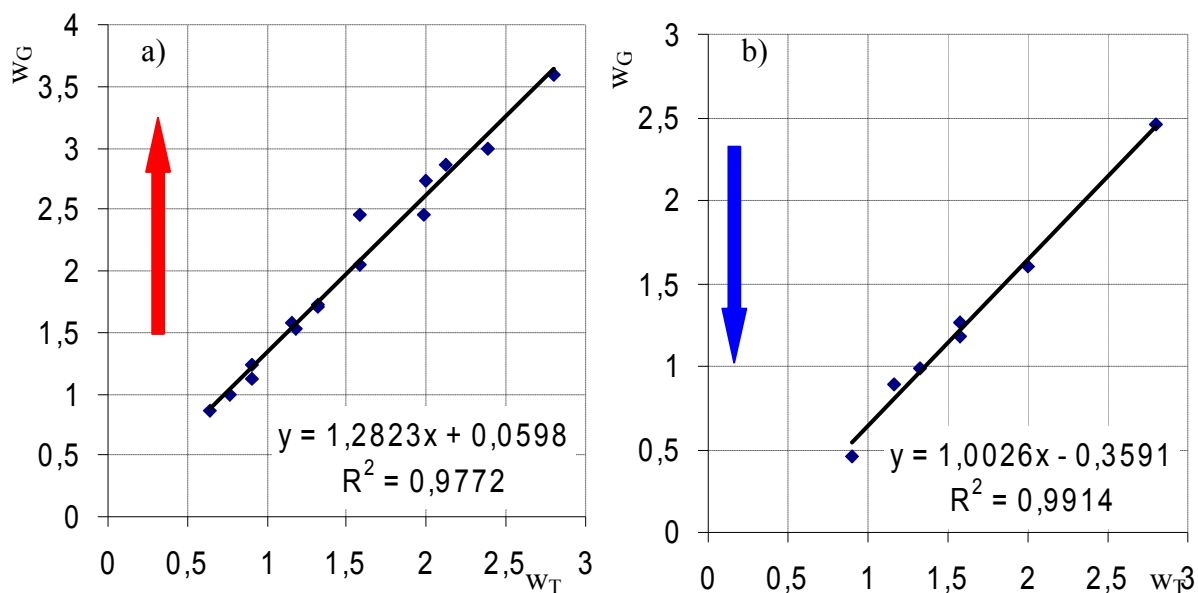
W prezentowanej pracy parametr rozkładu dla przepływu wznoszącego i opadającego postanowiono wyznaczyć na podstawie badań opisanych w rozdziale 9.4, w oparciu o równania korelacyjne prędkości rzeczywistej w zależności od sumarycznej prędkości pozornej fazy gazowej i ciekłej (9–2).

Korelację fluktuacji poziomów szarości wyznaczano dla struktury korkowej i rzutowej stąd też prędkości w_G dla przepływu wznoszącego i opadającego odnoszą się do tychże struktur. Mniejsza liczba punktów dla przepływu opadającego wynika stąd, że struktura rzutowa zajmuje mniejszy obszar na polu prędkości przebadanych strumieni czynników o czym była mowa w rozdziale 9.3, aniżeli struktura korkowa w przepływie wznoszącym.

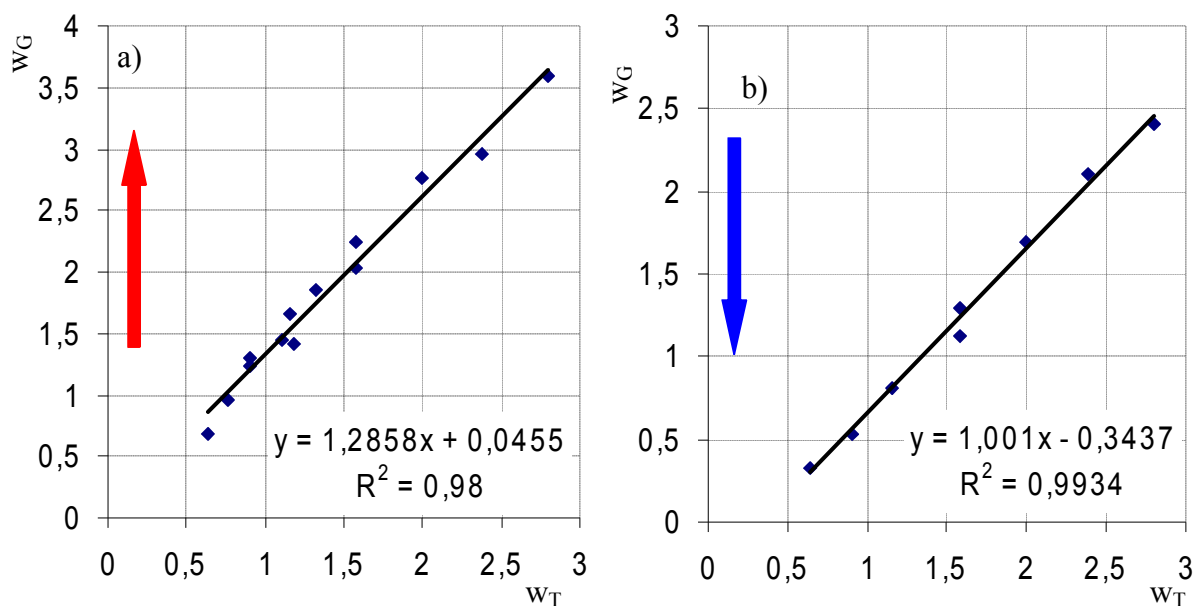
Na poniższych wykresach (rys. 9.71 – 9.75) przedstawiono graficzną prezentację modelu poślizgu dla przepływu wznoszącego i opadającego. Punkty na wykresach odnoszą się do struktur korkowych określonych w trakcie badań eksperymentalnych w zależności od układu dystrybutora i kierunku przepływu mieszaniny.



Rys. 9.71. Graficzna prezentacja modelu poślizgu dla otworkowego układu dystrybucji. Przepływ a) wznoszący, b) opadający



Rys. 9.72. Graficzna prezentacja modelu poślizgu dla szczelinowego układu dystrybucji. Przepływ a) wznoszący, b) opadający



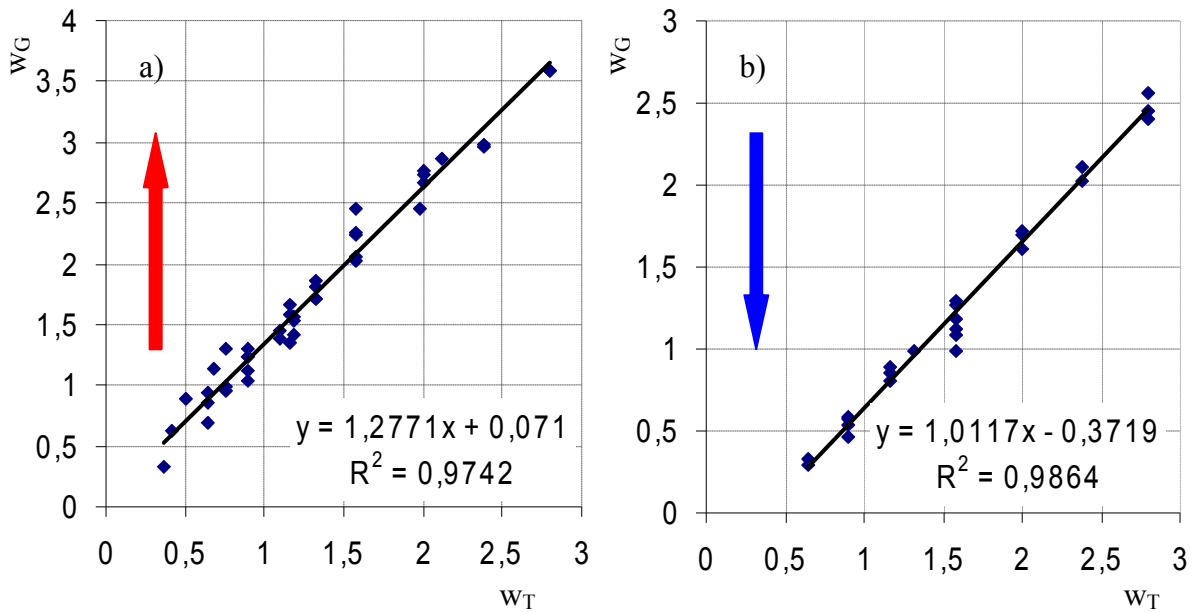
Rys. 9.73. Graficzna prezentacja modelu poślizgu dla porowatego układu dystrybucji. Przepływ a) wznoszący, b) opadający

Na powyższych wykresach (rys. 9.71 – 9.73) można zauważyć, że prędkość dryfu zmienia się dla poszczególnych układów dystrybucji przy czym dla przepływu wznoszącego zawsze osiąga wartości wyższe od 0 ($w_\infty > 0$), natomiast dla opadającego niższe, $w_\infty < 0$. Wartości współczynnika rozkładu dla przepływu wznoszącego są na poziomie $C_{wz} = 1,28$ a wartości dla przepływu opadającego są nieco większe niż 1. Szczególnie ważny jest fakt, że wartości współczynnika regresji dla korelacji odwzorowującej model poślizgu (zależność (9 – 2)) są bardzo wysokie. We wszystkich przypadkach są powyżej 0,94 a w niektórych (rys. 9.72. b) i 9.73. b) nawet 0,99.

Prędkość dryfu zmienia się nieznacznie w zależności od zastosowanego dystrybutora. Z tego też względu na rys. 9.74 porównano prędkość zmierzoną z obliczoną wspólnie dla wszystkich układów dystrybucji jednocześnie. Przy równie wysokich współczynnikach regresji (0,97; 0,98), współczynniki rozkładu osiągnęły następujące wartości:

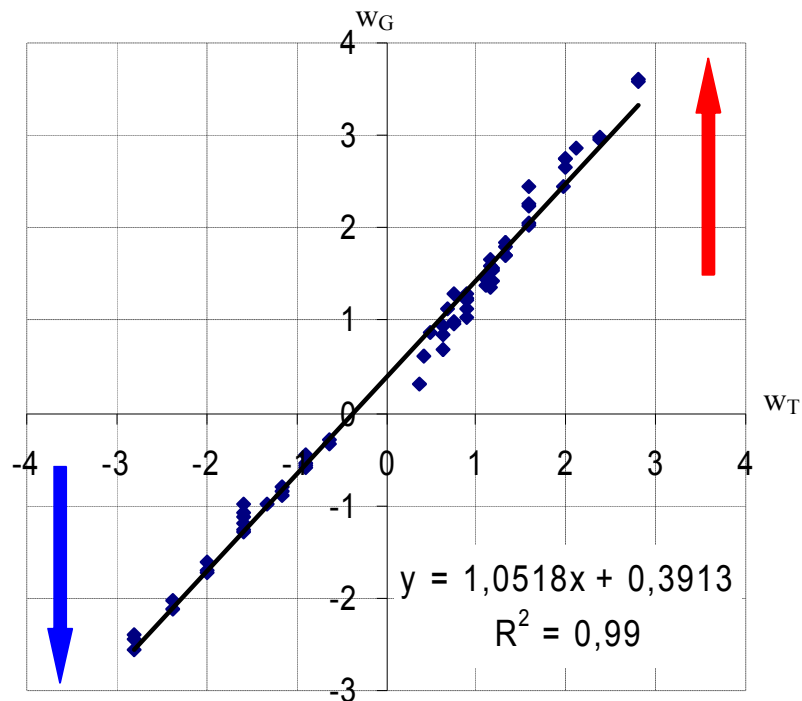
$$C_{wz} = 1,227 \text{ (rys. 9.74.a)}$$

$$C_{op} = 1,011 \text{ (rys. 9.74.b)}$$



Rys. 9.74. Graficzna prezentacja modelu poślizgu dla wszystkich układów dystrybucji. Przepływ a) wznoszący, b) opadający

Dla weryfikacji modelu poślizgu w wersji najbardziej ogólnej równanie (9 – 2) przedstawiono na wykresie (rys. 9.75), parametr $C_0 = 1,052$, $w_\infty = 0,391$ a współczynnik regresji i w tym przypadku jest bardzo wysoki i wynosi 0,99.



Rys. 9.75. Związek pomiędzy przepływem wznoszącym i opadającym w kanale węzownicowym

Z porównania wartości prędkości dryfu uzyskanych w równaniach korelacyjnych pokazanych na rysunkach 9.71 – 9.75 z podanymi w tabeli 9.26 wynikają pewne rozbieżności. W związku z tym postanowiono w drugim etapie narzucić wartości prędkości dryfu dla 3 równań pokazanych w tabeli 9.26 a zatem w równaniu korelacyjnym wyznaczać jedynie wartość współczynnika rozkładu C_0 co przedstawiono w tabeli 9.27.

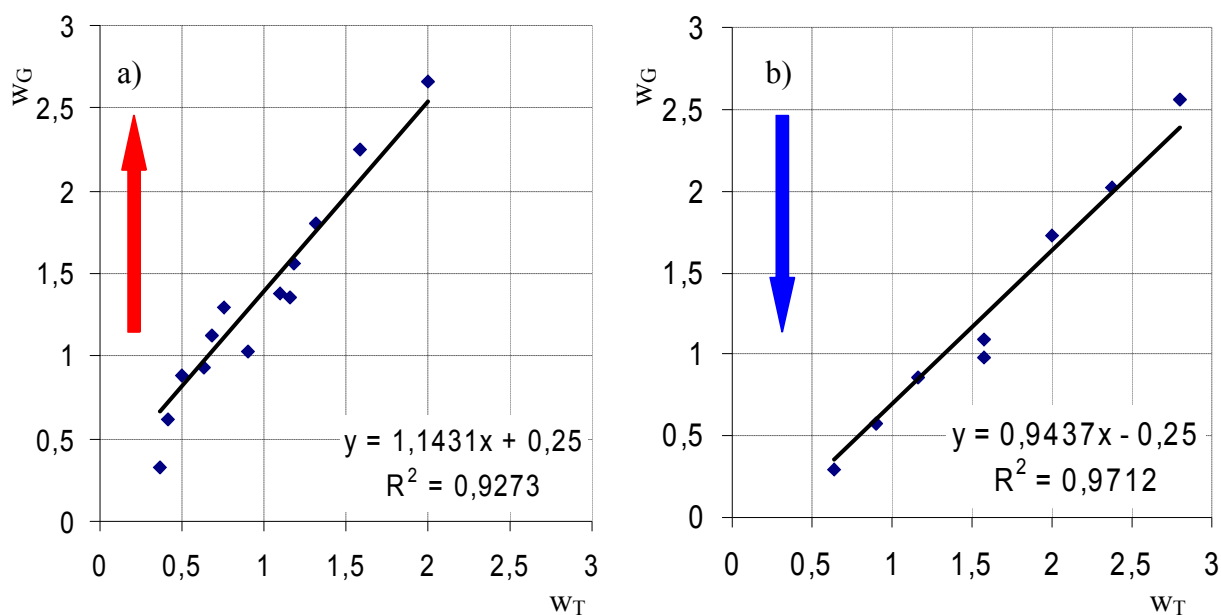
Tabela. 9.27. Wartości współczynników rozkładu i współczynników regresji dla obliczonych z równań korelacyjnych prędkości dryfu

zal.(9 – 4)	$w_\infty = 0,154$	$C_{wz} = 1,22$	$C_{op} = 0,89$	$R^2 = 0,97$
zal.(9 – 5)	$w_\infty = 0,248$	$C_{wz} = 1,16$	$C_{op} = 0,94$	$R^2 = 0,96$
zal.(9 – 6)	$w_\infty = 0,102$	$C_{wz} = 1,26$	$C_{op} = 0,86$	$R^2 = 0,97$

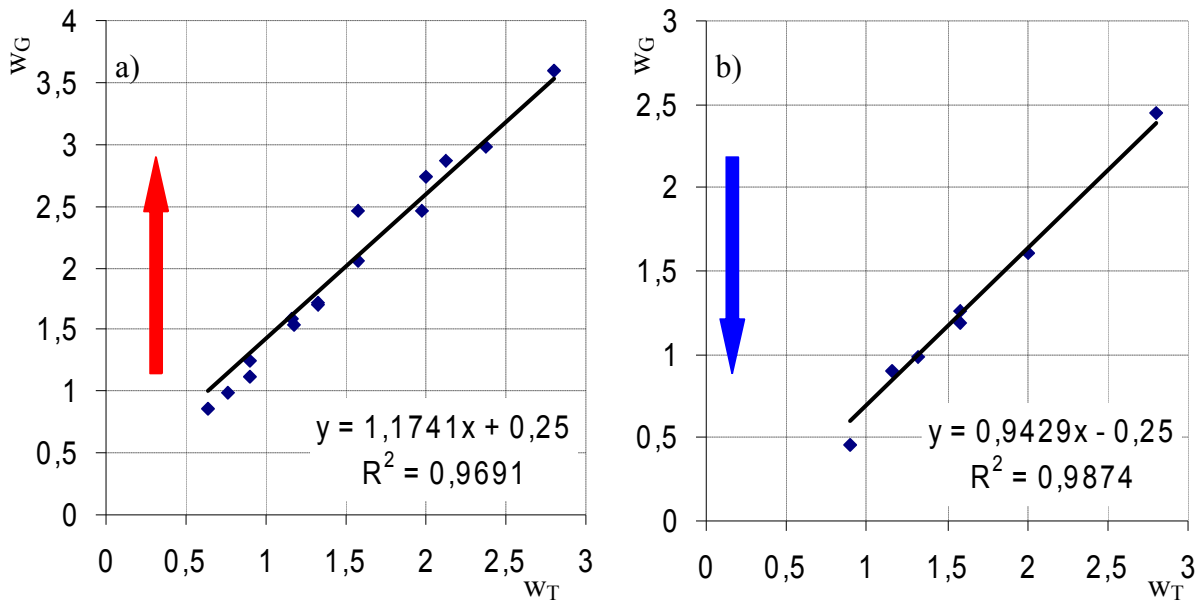
W tabeli 9.27 przedstawiono informacje o wartościach współczynnika rozkładu dla danych zbiorczych, zarówno dla wznoszącego jak i opadającego przepływu.

Prędkość dryfu na poziomie 0,25 m/s uznano za najbardziej odpowiednią w odniesieniu do prowadzonych badań własnych dlatego, że odnosi się do przepływu struktur z wyraźnym dominującym udziałem struktur korkowych, która w badaniach własnych pojawiała się najczęściej.

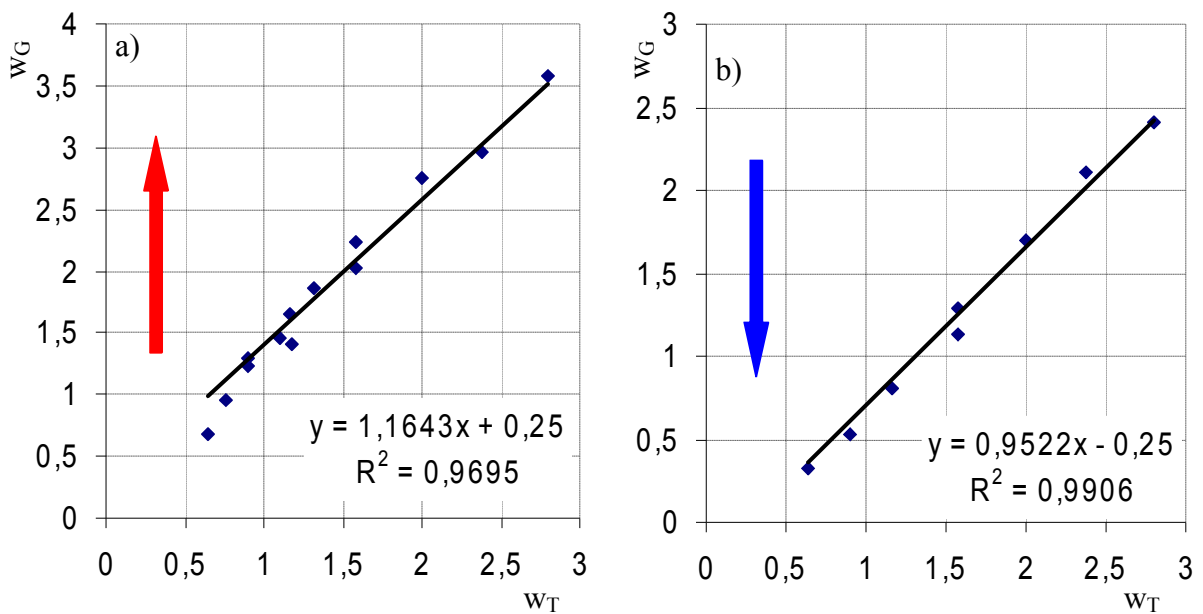
Na rysunkach od 9.76 do 9.80 przedstawiono, na tle równań korelacyjnych z narzuconą prędkością dryfu wg. zależności (9–5), wyniki badań prędkości rzeczywistej struktur gazowych.



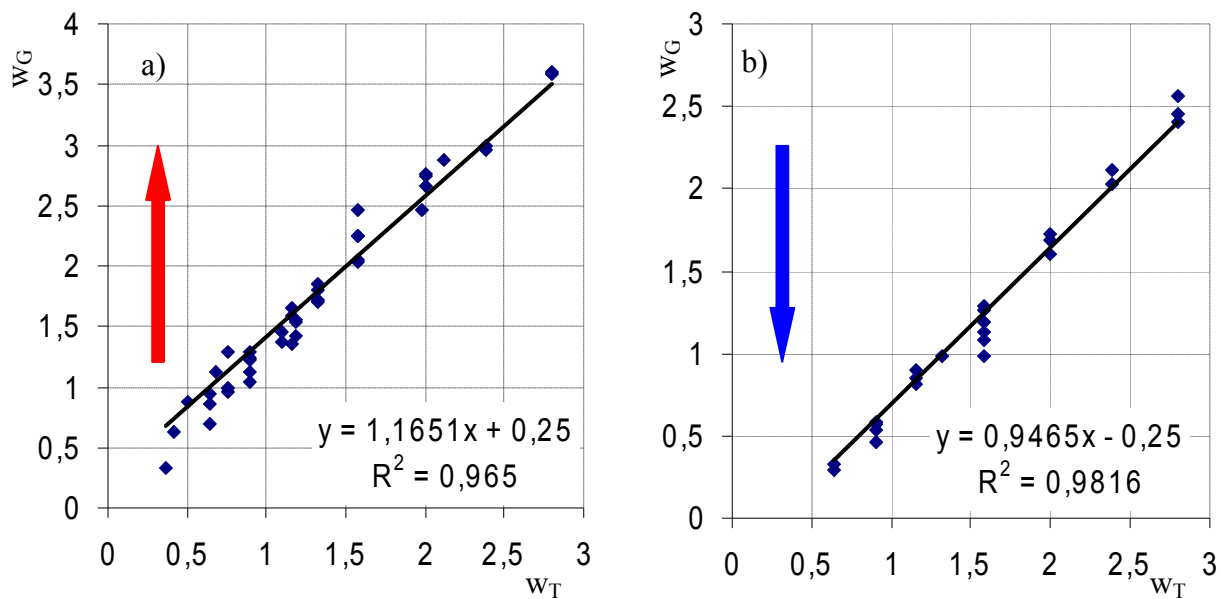
Rys.9.76. Graficzna prezentacja modelu poślizgu dla otworkowego układu zasilania. Przepływ: a) wznoszący, b) opadający



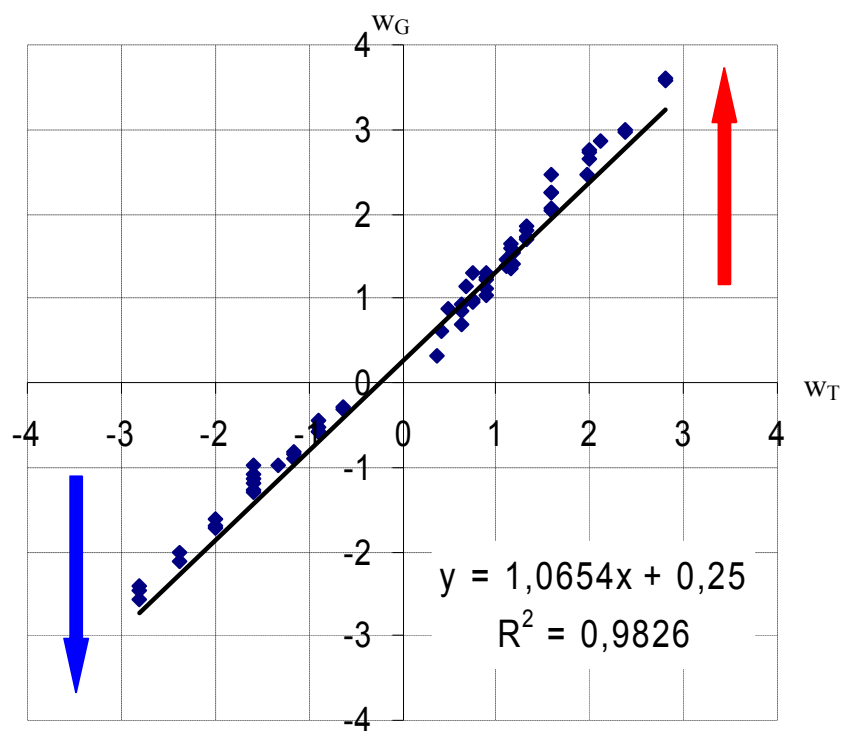
Rys.9.77. Graficzna prezentacja modelu poślizgu dla szczelinowego układu zasilania.
Przepływ: a) wznoszący, b) opadający



Rys.9.78. Graficzna prezentacja modelu poślizgu dla porowatego układu zasilania.
Przepływ: a) wznoszący, b) opadający



Rys.9.79. Graficzna prezentacja modelu poślizgu dla wszystkich układów dystrybucji. Przepływ a) wznoszący, b) opadający



Rys.9.80. Związek pomiędzy przepływem wznoszącym i opadającym w kanale węzownicowym

Współczynniki regresji na powyższych wykresach są bardzo wysokie. Za korelację zadawalającą uznaje się zwykle dla współczynnika regresji $R^2 = 0,95$. Z tego też względu można uznać model poślizgu za bardzo dobry do opisu ruchu struktur gazowych niezależnie od kierunku przepływu.

Zaleca się stosowanie modelu poślizgu według zależności (9–2) wraz z przyjętą wartością prędkości dryfu obliczoną według tab. 9.26 (2), co przedstawiono na rysunku 9.79.

9.5.1. Wyznaczanie udziału objętościowego gazu

Znając wartości prędkości rzeczywistej gazu udział objętościowy gazu można wyznaczyć z zależności:

$$\alpha_G = \frac{W_{G0}}{W_G} \quad (9 - 5)$$

Dla potrzeb opisu hydrodynamiki przepływu dwufazowego gaz – ciecz definiuje się również udział objętościowy gazu w przemieszczającej się mieszaninie:

$$\varepsilon = \frac{w_{GO}}{w_{GO} + w_{LO}} \quad (9 - 6)$$

W niniejszej pracy w celu oceny uzyskanych wyników badań, oparto się na metodzie Stommy, który zakłada, że poślizg faz musi być większy od jedności oraz prędkość cieczy przy przepływie dwufazowym powinna być większa od prędkości cieczy przy przepływie jednofazowym a zatem:

$$x < \alpha_{Gwz} < \varepsilon \quad (9 - 7)$$

gdzie x - udział masowy fazy gazowej:

$$x = \frac{\rho_G w_{GO}}{\rho_G w_{GO} + \rho_L w_{LO}} \quad (9 - 8)$$

Zdaniem wielu badaczy metoda Stommy uchodzi za bezpieczną jako, że w założeniu dla przepływu wznoszącego musi być spełniony warunek (9–7).

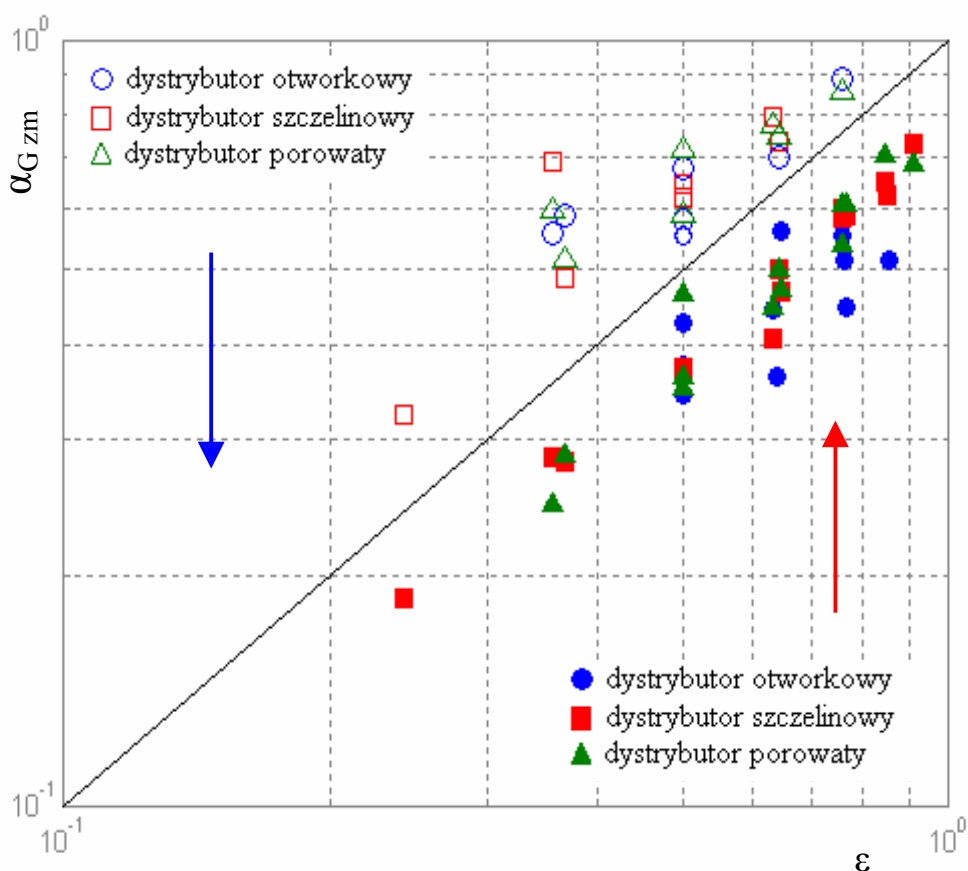
Dla przepływu opadającego powinien być natomiast spełniony warunek:

$$1 > \alpha_{Gop} > \varepsilon \quad (9 - 9)$$

W wielu korelacjach bardzo ryzykownym jest obliczanie udziału objętościowego w obszarze poza prowadzonymi badaniami – jest to typowy problem dopuszczalności ekstrapolacji wyników. Szczególnie gdy rozpatruje się równocześnie przepływ wznoszący i opadający istotne jest zbadanie zależności (9–7) dla przepływu wznoszącego a (9–9) dla opadającego.

Inne uzyskane wyniki z punktu widzenia modelu przepływu dwufazowego gazu i cieczy są zasadniczo niedopuszczalne.

Na rysunku 9.81 przedstawiono wyniki badań własnych i widać wyraźnie, że zarówno warunek (9-7) jak i (9–9) zostały spełnione.



Rys. 9.81. Udział objętościowy gazu przy przepływie wznoszącym i opadającym

Przy założeniu, że chwilowa wartość udziału objętościowego gazu może ulegać zmianie w przedziale jak w równaniu (9–7), oraz że prawdopodobieństwo wystąpienia danej wartości chwilowej jest odwrotnie proporcjonalne do poślizgu, Stomma wyznacza średnią w czasie wartość udziału objętościowego faz dla przepływu wznoszącego:

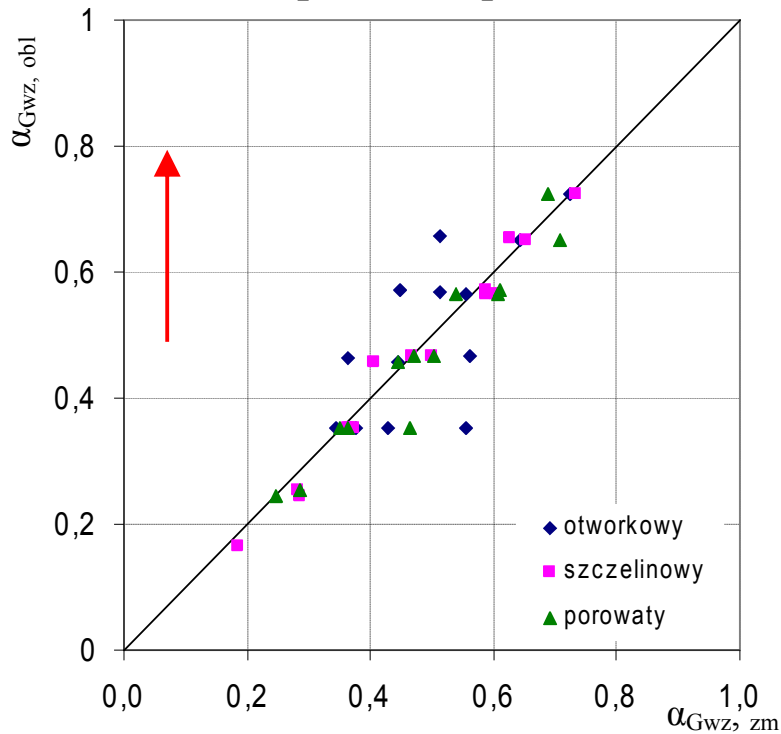
$$\alpha_{Gwz} = 1 - \frac{\varepsilon^2 - x^2}{2 \left[\ln \left(\frac{1-x}{1-\varepsilon} \right) - (\varepsilon - x) \right]} \quad (9-10)$$

Chisholm natomiast sugeruje aby udział objętościowy gazu dla przepływu wznoszącego obliczać następująco:

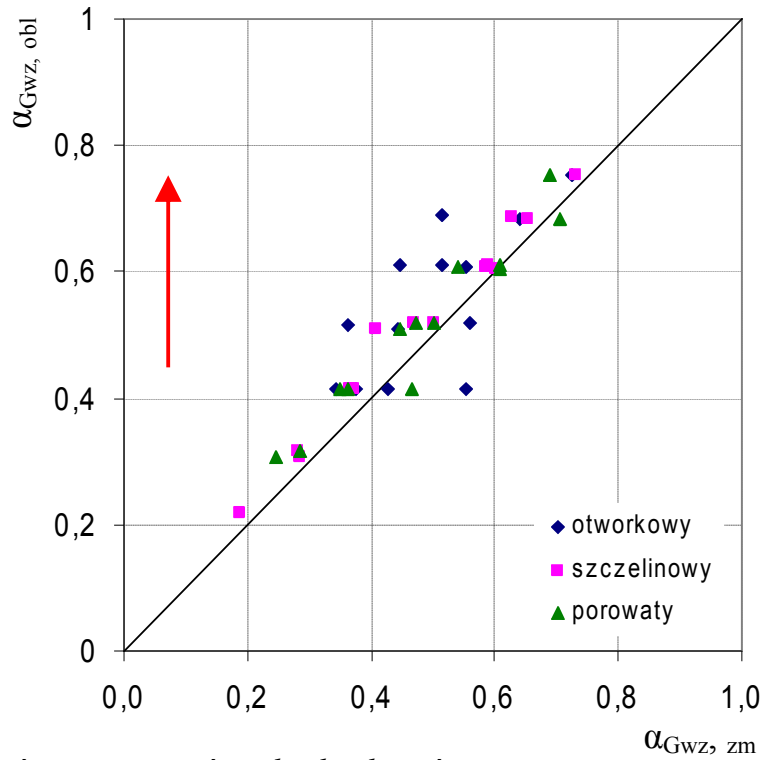
$$\alpha_{Gwz} = \frac{1}{1 + S \frac{1-x}{x} \frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (9-11)$$

gdzie współczynnik poślizgu faz w metodzie Chisholm'a:

$$S = \left[x \frac{\rho_L}{\rho_G} + (1-x) \right]^{0,5} \quad (9-12)$$



Rys. 9.82. Porównanie wartości udziału objętościowego zmierzonego z obliczonym metodą Stommy, przepływ wznoszący.



Rys. 9.83. Porównanie wartości udziału objętościowego zmierzonego z obliczonym metodą Chisholma, przepływ wznoszący.

Na powyższych rysunkach (9.82 i 9.83) przedstawiono wyniki porównania wartości zmierzonych i obliczonych udziału objętościowego gazu dla przepływu wznoszącego wg. metody Stommy i Chisholma.

Tab. 9.28. Porównanie metod obliczania udziału objętościowego dla przepływu wznoszącego

Układ	Metoda Stommy	Metoda Chisholma
	Błąd względny %	
otworkowy	13	13
szczelinowy	4	6
porowaty	6	7
Σ	8	9

W tabeli 9.28 przedstawiono porównanie metod obliczeniowych udziału objętościowego dla przepływu wznoszącego. Największym rozrzutem charakteryzował się układ otworkowy i w obu metodach obliczeniowych wynosił 13%.

Już rozrzut punktów na poziomie 20 % dla udziału objętościowego gazu uznaje się za zadowalający.

Dla przepływu opadającego istnieją spore rozbieżności w zakresie sposobu obliczania udziału objętościowego gazu. Friedel [23] oraz Spedding, Chen i Van Thanh Ngyuen [80] sugerują aby udział obliczać w ten sam sposób, zakładając brak poślizgu faz. Sokolow i Domanskij [78] proponują bez dowodu aby udział objętościowy gazu przy przepływie opadającym obliczać z zależności:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_{Gwz} + \alpha_{Gop}}{2} \quad (9 - 13)$$

Na rysunku 9.81 widać, że to intuicyjne założenie jest dość dobre. Punkty dla przepływu wznoszącego i opadającego są rozmieszczone zasadniczo symetrycznie względem przekątnej.

Z kolei Ulbrich [95] proponuje na podstawie danych zaczerpniętych z literatury aby udział objętościowy gazu przy przepływie opadającym obliczać z zależności:

$$\alpha_{Gop} = \frac{\varepsilon \alpha_{Gwz}}{C_T \alpha_{Gwz} - \varepsilon} \quad (9 - 14)$$

gdzie $C_T = 2,32$ i jest to wartość sumarycznego parametru

$$C_T = C_{wz} + C_{op} \quad (9 - 15)$$

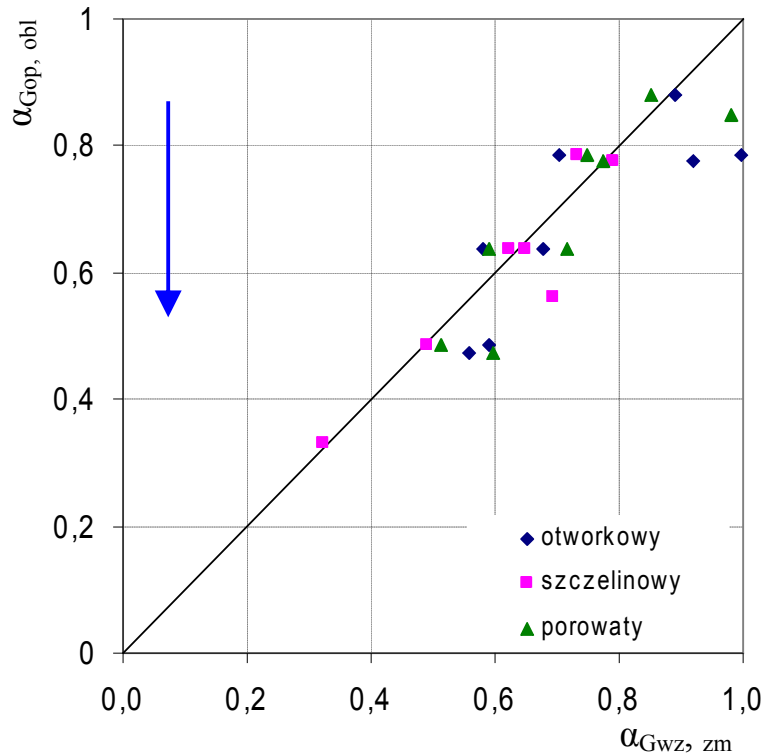
Na podstawie rozważań zawartych w pierwszej części rozdziału 9.5 wyznaczono $C_{wz} = 1,17$ i $C_{op} = 0,95$ a zatem:

$$C_T = 2,12$$

W związku z powyższym do obliczenia udziału objętościowego gazu dla przepływu opadającego posłużono się zależnością (9 - 14) podstawiając własny, sumaryczny parametr rozkładu a więc:

$$\alpha_{Gop} = \frac{\varepsilon \alpha_{Gwz}}{2,12 \alpha_{Gwz} - \varepsilon} \quad (9 - 16)$$

Na rysunkach 9.84 - 9.86 przedstawiono porównanie wartości udziału objętościowego zmierzonego z obliczonym według metody: Sokolova i Domanskiego, Ulbricha oraz proponowanej w niniejszej pracy. Przy czym udział dla przepływu wznoszącego obliczany jest według metody Stommy.



Rys. 9.86. Porównanie wartości udziału objętościowego zmierzonego z obliczonym w oparciu o zależność (9-16) (wraz z metodą Stommy)

Tab. 9.29. Porównanie metod obliczania udziału objętościowego dla przepływu opadającego

Układ	Metoda Sokolova i Domańskiego (wraz z metodą Stommy)	Metoda Ulbricha (wraz z metodą Stommy)	Metoda własna (9-16) (wraz z metodą Stommy)
	Błąd względny %		
otworkowy	18	20	18
szczelinowy	7	7	6
porowaty	9	10	8
Σ	13	14	12

W tabeli 9.29 przedstawiono porównanie metod obliczania udziału objętościowego dla przepływu opadającego. Najwyższą zgodnością charakteryzowała się metoda własna.

Układ otworkowy charakteryzuje się największą wartością rozrzutu pomiędzy udziałem objętościowym zmierzonym a obliczonym zarówno w przypadku przepływu wznoszącego jak i opadającego. Najmniejszym rozrzutem z kolei charakteryzuje się układ szczelinowy. W przypadku przepływu wznoszącego zaleca się stosowanie metody Stommy do obliczania udziału objętościowego gazu natomiast w przypadku przepływu opadającego stosowanie zależności (9-16) wraz z metodą Stommy.

10. Podsumowanie i wnioski końcowe

W niniejszej pracy badano warunki pracy aparatu z współprądowym, wznoszącym i opadającym przepływem mieszaniny gaz – ciecz w pionowym, węzownicowym kanale prostokątnym w zależności od układu dystrybucji fazy gazowej oraz prędkości obu czynników.

Stwierdzono, że metody cyfrowej analizy obrazu oraz techniki korelacyjne umożliwiły ocenę zachodzących zjawisk oraz wyznaczenie reżimów poprawnej pracy aparatu.

Po dogłębnej analizie wyników badań stwierdzono, iż układ dystrybucji fazy gazowej nie wywiera znaczącego wpływu na hydrodynamikę oraz jednorodność przepływu w kanale węzownicowym.

Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych, analizy stanu wiedzy w zakresie przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz oraz badań własnych sformułowano następujące wnioski:

- geometria aparatu węzownicowego ma wpływ nie tylko na tworzące się struktury mieszaniny dwufazowej ale również na prędkość ich przemieszczania
- praca aparatu węzownicowego powinna być ograniczona do obszaru, w którym występuje przepływ w pełni jednorodny, który zdefiniowano na stronie 105,
- model poślizgu może być wykorzystany do określenia rzeczywistych prędkości struktur gazowych,
- na podstawie badań własnych zaproponowano relację pomiędzy udziałem objętościowym gazu dla przepływu wznoszącego i opadającego - zależność (9-16), przy czym udział objętościowy gazu dla przepływu wznoszącego można wyznaczać według metody Stommy, natomiast dla opadającego według powyższej zależności z wykorzystaniem metody Stommy.

11. Lista skrótów

- A - Annular Flow - przepływ pierścieniowy
- ACF - Auto Correlation Function - funkcja autokorelacji
- AM - Annular Mist - przepływ pierścieniowo-mgłowy
- B - Bubble Flow - przepływ pęcherzykowy
- BF - Bubbly - film Flow – przepływ filmowo-pęcherzkowy
- CCF - Cross Correlation Function - funkcja korelacji wzajemnej
- D - Dispersed Flow – przepływ dyspersyjny
- DB - Dispersed Bubbly Flow - przepływ pęcherzykowo-dyspersyjny
- DIP - Digital Image Precessing - cyfrowe przetwarzanie obrazu
- F - Foam Flow - przepływ pianowy
- FF - Rolling film – przepływ spływającego filmu
- P - Plug Flow - przepływ korkowy
- PDF - Propability Density Function - funkcja gęstości prawdopodobieństwa
- S - Slug Flow – przepływ rzutowy

12. Literatura

- [1] ANWEILER S.: Ocena struktur dwufazowych w aparatach fluidalnych, praca doktorska, Opole 2004
- [2] BARNEA D.: A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 13, nr 1, s. 1-12, 1987
- [3] BARNEA D., SHOHAM O., TAITEL Y., DUKLER A. E.: Gas-liquid flow in inclined tubes. Flow pattern transitions for upward flow, *Chemical Engineering Science*, t. 40, nr 1, s. 131-136, 1985
- [4] BENDAT J. S., PIERSOL A. G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976
- [5] BLACKMAN R. B., TUKEY J. W.: The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering, New York, Dover 1958
- [6] BOELHOUWER J. G.: Nonsteady operation of trickle-bed reactors. Hydrodynamics, mass and heat transfer. Technische Universiteit, Eindhoven 2001.
- [7] BURDY J.: Tablice statystyczne, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 1995
- [8] CHAOUKI J., LARACHI F., DUDUKOVIĆ M. P. [red.]: Non invasive monitoring of multiphase flows Elsevier, Nowy Jork 1997
- [9] CHARPENTIER J. C.: A review of the data on mass transfer parameters in most of gas-liquid reactors, in *Two – Phase Flow and Heat Transfer*, ed. S. Kakac, F. Mayinger, Hemisphere Publ. Corp., Washington 1976
- [10] CHEN L., TIAN Y. S., KARAYIANNIS T. G.: The effect of tube diameter on vertical two-phase flow regimes in small tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, t. 49, s. 4220-4230, 2006
- [11] CHISHOLM D.: *Two-phase flow in pipelines and Heat Exchangers*, Georg Godwin Ed. London 1983
- [12] CHISHOLM D.: Theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, t.10, s. 1767-1778, 1967
- [13] CLARK N. N., FLEMMER R. L.: Predicting the holdup in two-phase bubble upflow and downflow using the Zuber and Findlay Drift-Flux Model, *AIChE Journal*, t. 31, nr 3, s. 500-503, 1985
- [14] COLEMAN J. W., GARIMELLA S.: Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, t. 42, s. 2869-2881, 1999
- [15] COSTIGAN G.: Flow pattern transitions in vertical gas-liquid, D. Ph., Thesis, Oxford University, UK 1997
- [16] DELHAYE J.M.: Measurement techniques for two-phase gas-liquid flows, *Two-Phase Flow and Heat Transfer*, Proc. of NATO Advanced Study Institute, Istanbul 1976
- [17] DELHAYE J.M.: Space averaged equations and two-phase flow modeling, *Two-phase Momentum Heat and Mass Transfer in Chemical Process and Energy Engineering Systems*, Durst F., Tsikolauri G.V., Afgan N.H. [red.], Hemisphere Publ. Corp., Waszyngton 1979
- [18] DENG X., DONG F., Xu L. J., LIU X. P., XU L. A.: The design of a dual – plane ERT system for cross correlation measurement of bubbly gas – liquid pipe flow, *Measurements Science and Technology*, nr 8, s. 1024-1031, 2001

- [19] DUKLER A.E., TAITEL Y.: Flow pattern transitions in two – phase gas – liquid flows: measurement and modeling, *Multiphase Science and Technology* t. 2, s. 1-94, Hemisphere, Waszyngton 1986
- [20] DZIUBIŃSKI M., FIDOS H., SOSNO M.: The flow pattern map of a two-phase non-Newtonian liquid-gas flow in the vertical pipe, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 30, s. 551-563, 2004
- [21] DZIUBIŃSKI M.: Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-gaz, Politechnika Łódzka, Monografie - Łódź 2005
- [22] FERNANDES R. C., SEMIAT R., DUKLER A. E.: Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes, *AIChE J.*, t.29, nr 6, s. 91, 1983
- [23] FRIEDEL L.: improved friction pressure drop correlation for horizontal and vertical two-phase pipe flow, *3R International*, t.18, no.9, s.485, 1979
- [24] FUJIMOTO H., NAGADANI T., TAKUDA H.: Performance characteristics of a gas-liquid-solid airlift pump, *International Journal of Multiphase Flow*, vol 31, s. 1116-1133, 2005
- [25] GOVIER G. W., RADFORD B. A., DUN J. S. C.: The upwards vertical flow air-water mixtures I, Effect of air and water rates on flow pattern, holdup and pressure drop, *Can. J. of Chem. Engng*, t. 35, nr 4, s. 58, 1957
- [26] GUZIAŁOWSKA J.: Badanie przepływu mieszaniny gaz – ciecz w wymienniku z przegrodami, praca doktorska, Opole 2008
- [27] HETSRONI G.: *Handbook of Multiphase Systems*, Hemisphere Publ. Corp., Washington 1982
- [28] HEWITT G. F., HALL - TAYLOR N. S.: *Annular two-phase flow*, Pergamon Press, Oxford 1970
- [29] HIBIKI T., MISHIMA K.: Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical narrow rectangular channels, *Nuclear Engineering and Design*, t. 203, s.117-131, 2001
- [30] HIBIKI T., ISHII M.: Distribution parameter and drift velocity of drift-flux model in bubbly flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, t. 45, s. 707-721, 2002
- [31] HIBIKI T., ISHII M.: One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase regimes, *Journal of Heat and Mass Transfer*, t.46, s. 4935-4948, 2003
- [32] HIBIKI T., MISHIMA K., YONDEA K., FUJINE S., KANDA K., NISHIHARA H., TSURUNR A., MATSUBAYASHI M.: Application of neutron radiography to visualization and void fraction measurement of air-water two-phase flow in a small diameter tube, *Journal of Nuclear Science Technology* vol. 30, s. 516-523, 1993
- [33] ICHIKAWA Y., MATSUMOTO Y.: Characteristics of bubbly flow around a circular cylinder, *3rd Int. Conf. of Multiphase Flow*, Lyon 1998
- [34] ISHII M., MI Y., TSOUKALAS L. H., KIM S.: New objective approaches for characterization of interfacial structures in two-phase flow. *Proc. of the ASME Heat Transfer Division* vol. 5, s. 205-213, 1998
- [35] JÄHNE B.: *Digital Image Processing*, Heidelberg, Springer 1997
- [36] JOVIC V. D., JOVIC L. A., AGFAN N. H.: Unsteady behavior of the adiabatic two phase flow in parallel vertical channels, *HTD-T. 361-5*, *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division*, t. 5, 1998
- [37] KARAMAVRUC A. I., CLARK N. N.: Local differential pressure analysis in a

- slugging bed using deterministic chaos theory, *Chemical Engineering Science*, t. 52, n. 3, s. 357-370, 1997
- [38] KESKA J. K., SIMON W. E.: In search of physical parameters influenced by flow patterns in a heterogeneous two-phase mixture in microchannels using concomitant measurements, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 32, s. 483-498, 2006
- [39] KONDO M., NAKAJIMA K. I.: Experimental investigation of air-water two-phase upflow across horizontal tube bundles, Part I – Flow pattern and void fraction, *Bull. of the JSME*, 1980, t.23, s.385-393
- [40] KRÓTKIEWICZ M.: Rozpoznawanie obiektów w zastosowaniach inżynierii procesowej i mechanoskopii, praca doktorska, Wrocław 2001
- [41] KRÓTKIEWICZ M., ULBRICH R.: Rozpoznawanie obiektów w zastosowaniu do oceny struktury mieszaniny gaz – ciało stałe, w *Rozpoznawanie obrazu w zastosowaniach do badań przepływu mieszanin dwufazowych*, *Studia i monografie z. 138*, Ulbrich R. – red., Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2002
- [42] LIAN H.Y., NOGHREHKAR G., CHAN A. M. C., KAWAJI M.: Effects of void fraction on vibration of tube bundles in two-phase cross flow, *ASME Journal Vibr.*, n. 199, s. 457-463, 1997
- [43] LOCKHART R. W., MARTINELLI R. C.: Proposed Correlation of data for isothermal two-phase flow, *Chemical Engineering Progress*, vol. 45, nr 1, s. 39, 1949
- [44] LORENZI A., SOTGNIA G.: Comparative investigation of some characteristic quantities of two-phase cocurrent upward and downward flow, *Two-Phase Flow and Heat transfer Symposium - Workshop*, 1976
- [45] LUO L., FAN Y., ZHANG W., YUAN X., MIDOUX N.: Integration of constructal distributors to a mini crossflow heat exchanger and their assembly configuration optimization, *Chemical Engineering Science*, n. 62, s. 3605-3619, 2007
- [46] MAGNUCKI K.: Wytrzymałość i optymalizacja zbiorników cienkościennych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Poznań 1998
- [47] MASIUKIEWICZ M.: Ocena pracy aparatów z przepływem dwufazowym przy użyciu stereoskopii ilościowej, *Rozprawa doktorska*, Opole, 2005
- [48] MASIUKIEWICZ M., ULBRICH R.: Wykorzystanie metod stereoskopii ilościowej, wspomaganych cyfrową obróbką obrazu do oceny struktury przepływu mieszaniny gaz-ciecz, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* nr 5s, s. 128-129, 2003
- [49] MATERKA A. [red.]: *Elementy cyfrowego przetwarzania i analizy obrazów*, PWN Łódź, 1991
- [50] MCGHEE J., KULESZA W., HENDERSON I. A., KORCZYŃSKI M. J.: *Measurement data holding. Theoretical technique*, Lodart, Łódź, 2001
- [51] MCQUILLAN K.W., WALLEY P.B.: *Flow patterns in vertical two-phase flow*, Engineering Sciences Division, AERE-R 11032, Harwell 1983
- [52] MISHIMA K., ISHII M.: Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, t.27, nr 5, s. 723-737, 1984
- [53] MROZEK B.: *MATLAB i Simulink poradnik użytkownika*, Wydawnictwo HELION, Gliwice 2004
- [54] NICKLIN D. J., DAVIDSON J. F.: The onset of instability in two phase slug flow, *Inst. Mech. Engng, Proc. Symp. Two Phase Flow*, Paper 4, 1962
- [55] NIEWIADOMSKI S.: *Transport, rozdrabnianie i mieszanie w przemyśle chemicznym*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1961

- [56] NOGHREHKAR G. R., KAWAJI M., CHAN A. M. C.: Investigation of two-phase flow regime in tube bundles under cross-flow conditions, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 25, s. 857-874, 1999
- [57] OHNUKI A., AKIMOTO H.: Model development for bubble turbulent diffusion and bubble diameter in large vertical pipes, *Journal of Nuclear Science and Technology*, t. 38, nr 12, s. 1074-1080, 2001
- [58] ORZECZOWSKI Z.: Przepływy dwufazowe, jednowymiarowe, ustalone, adiabatyczne, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1990
- [59] ORZECZOWSKI Z., PRYWER J.: Mechanika płynów w inżynierii środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź 1991
- [60] OSCHINOWO T., CHARLES M. E.: Vertical two – phase flow, Part 1; Flow pattern correlations, *Can. J. Chem. Eng.*, t.52. s. 25, 1974
- [61] OSTROWSKI K. L., LUKE S. P., BENNETT M. A., WILLIAMS R. A.: Application of capacitance electrical tomography for on-line and off-line analysis of flow pattern in horizontal pipeline of pneumatic conveyer, *Chemical Engineering Journal*, n.77
- [62] OTNES R.K., ENOCHSON L.: Analiza numeryczna przebiegów czasowych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978
- [63] QUANDT E., *Chem. Eng. Progr., Symp. Ser.* 1965, t.61. s. 1982
- [64] PAVLIDIS T.: Grafika i przetwarzanie obrazów, WNT, Warszawa 1987
- [65] PEŁCZYŃSKI P., STRUMIŁŁO P., STRZELECKI M.: Laboratorium przetwarzania obrazów, Politechnika Łódzka, Łódź 2000
- [66] PIOTROWSKI J., Pomiarowe zastosowanie analizy sygnałów, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1991
- [67] POHORECKI R.: Effectiveness of mass transfer area in gas-liquid systems, in *Heat and Mass Transfer in Multicomponent Gas – Liquid Systems*, Ossolineum, Warszawa 1980
- [68] PRAKASH A., BRIENS C. L.: Porous gas distributors in bubble columns. Effect of liquid presence on distributor pressure drop. Effect of startup procedure on distributor performance, *Can. J. Chem. Eng.*, nr68, s. 204-210, 1990
- [69] PRASER H-M., KREPPER E., LUCAS D.: Evolution of the two-phase flow in a vertical tube-decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire - mesh sensors, *Int. J. Therm. Sci.*, t. 41, s. 17-28, 2002
- [70] PYKA I.: Nierównomierność rozplywu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz w aparatach wielorurowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Opole 2007
- [71] SADATOMI M., SATO Y.: Two-phase flow in vertical noncircular channels, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 8, nr 6, s. 641-655, 1982
- [72] SAHORA A. K., KHERA R.: Hydrodynamic study of fixed beds with cocurrent upflow and downflow, *Chemical Engineering and Processing* 45, 455 – 460, 2006
- [73] SATITCHAROEN P., WONGWISES S.: Two-phase flow pattern maps for vertical upward gas-liquid flow in mini-gap channels, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 30, s. 225-236, 2004
- [74] SCHENK T.: Digital photogrammetry, Terra Science, Laurelville 1999
- [75] SCHLUETER M., RAEBINGERN.: Bubble swarm velocity in two-phase flows, *Heat Transfer Division* nr 5, ASME, 1998
- [76] SERIZAWA A., FENG Z. P.: Review of two-phase flow in microchannels, *Proceedings of the US-Japan Seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, Santa Barbara, CA 2000

- [77] SHEN X., SAITO Y., MISHIMA K., NAKAMURA H.: A study on the characteristics of upward air-water two-phase flow in a large diameter pipe, *Experimental Thermal and Fluid Science*, t. 31, s. 21-36, 2006
- [78] SOKOLOV V. N., DOMANSKIJ I. V.: *Gazozydkostnyje reaktory; Masinstrojenije*, Leningrad 1976
- [79] SMITH S. W.: *Digital signal processing. A practical guide for engineers and scientists*, Elsevier Science, Burlington 2003
- [80] SPEDDING P.L., CHEN J.J.J., VAN THANH NGYUEN: pressure drop in two-phase gas-liquid flow in inclined pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, t.8, no. 4, s. 407, 1982
- [81] SPEDDING P. L., SPENCE D. R.: Flow regimes in two-phase gas-liquid flow, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 19, nr 2, s. 245-280, 1993
- [82] STOMMA Z.: *Praca doktorska*. Instytut Badań Jądrowych, Swierk 1970
- [83] STOMMA Z.: Two-phase flows-void fraction values determination, Institute of Nuclear Research Świerk/Warszawa, Raport INR//18187/IXD/RA, 1979
- [84] TADEUSIEWICZ R., KOROHODA P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Fundacji Post pu Telekomunikacji, Kraków 1997
- [85] TAITEL Y., BARNEA D., DUKLER A. E.: Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes, *AIChE Journal*, t. 26, nr 345, 1980
- [86] TAITEL Y., DUKLER A. E.: A model of predisting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas – liquid flow *AIChE J.* t.22, s.47, 1976
- [87] TAITEL Y., PUSTYLNIAK L., TSHUVA M., BARNEA D.: Flow distribution of gas and liquid in parallel pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 29, s. 1193-1202, 2003
- [88] TRONIEWSKI L., ULBRICH R., ŁUKASZEWICZ S.: *Metody obliczania udziału objętościowego gazu przy przepływie dwufazowym*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu, Seria: Mechanika, Zeszyt 16, s. 56-70, Opole 1982
- [89] TWARDOWSKA A. SZTYMON A.: *Charakterystyka struktur przepływu gaz – ciecz w kanale prostokątnym metodami DIP*, praca magisterska, Opole 2005
- [90] TWARDOWSKA A., MACIEJCZYK A., ULBRICH R.: Hydrodynamics symilarties at up - and downflow for two - phase gas - liquid flow, VII Warsztaty Przepływów Wielofazowych i Płynów Nieniuonowskich, Wieżyca 2007
- [91] TWARDOWSKA A., ULBRICH R.: The use of statistical for the examination of hydrodynamics of the flow of the two - phase mixture for three setups of the distribution of the gas phase, XV International Science and Engineering Conference, Sevastopol 2008
- [92] TWARDOWSKA A. *Ewolucja prędkości mieszaniny dwufazowej w aparacie węzownicowym*, III Środowiskowe Warsztaty Doktorantów Politechniki Opolskiej, Głuchołazy 2009
- [93] TUNG-WEN CHENG, TA-LI LIN: Characteristics of gas-liquid two-phase flow in small diameter inclined tubes, *Chemical Engineering Science*, t. 56, s. 6393-6398, 2001
- [94] ULBRICH R.: *Hydraulika przepływu dwufazowego gaz-ciecz w kanałach prostokątnych*, praca doktorska, Wrocław 1981
- [95] ULBRICH R.: *Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz*, *Studia i Monografie*, Wyższa szkoła Inżynierska, z. 32, Opole 1989
- [96] ULBRICH R.: *Spadek ciśnienia przy przepływie mieszaniny gaz-ciecz w przestrzeni międzyrurowej*; *Studia i monografie* z. 89, WSI w Opolu, Opole 1989
- [97] ULBRICH R.: *Struktury przepływu mieszaniny gaz-ciecz w przestrzeni*

- międzyrurowej, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, Studia i Monografie, Zeszyt 74, Opole 1994
- [98] WANG Q. J., XU G. P., YANG X. Q., LIU W.: Two-phase flow characteristics in vertical up-and-down flow across a horizontal tube bundle, *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, s. 1321-1327, 1993
- [99] WATKINS C., SADUN A., MARENKA S.: *Nowoczesne metody przetwarzania obrazu WNT*, Warszawa 1995
- [100] WESTERWEEL J.: *Digital particle image velocimetry – theory and application*, Delft University Press, Delft 1993
- [101] WILLERT C. E., GHARIB M.: Digital image velocimetry, *Exp. Fluids*, nr 10 s. 181-193, 1991
- [102] WILMARTH T., ISHII M.: Two-phase flow regime in narrow rectangular vertical and horizontal channels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, t. 37, s. 1749-1758, 1994
- [103] WOJNA L., KURZYDŁOWSKI K. J., SZALA J.: *Praktyka analizy obrazu*; Polskie Towarzystwo Stereologiczne, Kraków 2002
- [104] WOJNAR L., MAJOREK M.: *Komputerowa analiza obrazu*, Fotobit Design, Kraków 1994
- [105] WOŹNICKI J.: *Podstawowe techniki przetwarzania obrazu*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1996
- [106] WRÓBEL Z., KOPROWSKI R.: *Przetwarzanie obrazu w programie Matlab* Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2001
- [107] WÖLK G., DREYER M., RATH H. J.: Flow patterns in small diameter vertical noncircular channels, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 26, s. 1037-1061, 2000
- [108] XU D., TSO C. P., TOU K. W.: Hydrodynamics of two-phase flow in vertical up and down-flow across a horizontal tube bundle, n. 64, s. 1317-1342, 1998
- [109] XU J. L.: Experimental study on gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini gaps, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, t. 20, s. 422-428, 1999
- [110] XU J. L., CHENG P., ZHAO T. S.: Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps, *International Journal of Multiphase Flow*, t. 25, s. 411-432, 1999
- [111] Zając D.: Analiza hydrodynamiki przepływu gaz – ciecz w kolumnie pęcherzykowej z wykorzystaniem metod cyfrowego przetwarzania obrazu, zeszyty naukowe Politechniki Opolskiej, z. 80, s.173-180, Opole 2005
- [112] ZAJĄC D.: *Badanie przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz w kolumnie pęcherzykowej z zastosowaniem metod cyfrowej analizy obrazu*, rozprawa doktorska, Opole 2004,
- [113] ZAJĄC D., ULBRICH R.: *Nieinwazyjne metody badań przepływów dwufazowych gaz-ciecz*, Politechnika Opolska, Opole 2005
- [114] ZEHNER P.: *Mehrphasenstromung In Gas – Flüssigkeits- reaktorem*, Foeschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik e. V., Dusseldorf Hochschulkurs “Mehrphasenstromungen (Flussig/Gas) in der Verfahrenstechnik”, Universitat Hannover, 1988
- [115] ZHENG D., CHE D.: An investigation on near wall transport characteristics in an adiabatic upward gas-liquid two-phase slug flow, *Heat Mass Transfer*, DOI 10.1007/s00231-006-0193-8, 2006

[116] ZUBER N., FINDLAY J.A.: Average volumetric concentration in two-phase flow systems, J. Heat Transfer, Trans. ASME, nr 87, s. 453-468, 1965