



POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Katedra Inżynierii Procesowej



PRACA DOKTORSKA

**PRZEPIY W PIERŚCIENIOWY MIESZANINY
WIELOFAZOWEJ W RURACH APARATÓW
CIENKOWARSTEWKOWYCH**

mgr inż. Agata Brandt

Promotor
dr hab. inż. Stanisław Witczak
Profesor Politechniki Opolskiej

OPOLE 2014

SPIS TREŚCI

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA	4
1. WPROWADZENIE	6
2. WYKORZYSTANIE PRZEPLYWU PIERŚCIENIOWEGO W APARATURZE PROCESOWEJ	9
3. CHARAKTERYSTYKA PRZEPLYWU WIELOFAZOWEGO	13
3.1. Parametry przepływu mieszaniny wielofazowej.....	13
3.2. Zakres badań przepływu wielofazowego w rurach pionowych	17
3.3. Struktury przepływu.....	21
3.3.1. Przepływ dwufazowy ciecz-ciecz	22
3.3.2. Przepływ dwufazowy gaz-ciecz.....	28
3.3.3. Przepływ trójfazowy gaz-ciecz-ciecz.....	33
3.4. Mapy przepływu.....	38
3.4.1. Mapy przepływu dwufazowego ciecz-ciecz	38
3.4.2. Mapy przepływu dwufazowego gaz-ciecz	40
3.4.3. Mapy przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz.....	45
3.5. Udziały objętościowe faz	49
3.5.1. Udziały objętościowe w przepływie dwufazowym ciecz-ciecz.....	49
3.5.2. Udziały objętościowe w przepływie dwufazowym gaz-ciecz	50
3.5.3. Udziały objętościowe faz w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz	52
3.6. Grubość filmów cieczy	54
3.6.1. Grubość filmów cieczy dla sływu grawitacyjnego	54
3.6.2. Grubość filmów cieczy w przepływie z fazą gazową.....	62
3.7. Przewodność elektryczna składników mieszaniny wielofazowej.....	69
3.8. Podsumowanie przeglądu literatury	72
4. CEL I ZAKRES PRACY	74
5. BADANIA WŁASNE	76
5.1. Charakterystyka czynników roboczych	76

5.2. Instalacja badawcza.....	78
5.2.1. Układ zasilania i pomiaru strumieni przepływu faz.....	82
5.2.2. Kanał pomiarowy	84
5.2.3. Układ do pomiaru przewodności cieczy dwufazowej.....	88
5.3. Zakres i metodyka badań	93
6. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH.....	97
6.1. Struktury i mapy przepływu mieszaniny wielofazowej w kanale pionowym	97
6.1.1. Przepływ dwufazowy ciecz-ciecz	97
6.1.2. Przepływ trójfazowy gaz-ciecz-ciecz.....	116
6.2. Udziały objętościowe faz w mieszaninie wielofazowej.....	123
6.2.1. Udziały objętościowe faz w opadającym przepływie dwufazowym woda-olej.....	123
6.2.2. Ocena metod obliczania udziałów objętościowych faz w opadającym przepływie dwufazowym ciecz-ciecz	131
6.2.3. Własna metoda obliczania udziałów objętościowych faz w opadającym przepływie dwufazowym ciecz-ciecz	140
6.2.4. Udziały objętościowe faz w opadającym, pierścieniowym przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz.....	143
6.2.5. Ocena metod obliczania udziałów objętościowych faz w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz.....	155
6.2.6. Własna metoda obliczania udziałów objętościowych faz w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz.....	175
6.3. Grubości filmu cieczy	180
6.3.1. Grubość filmu cieczy w warunkach jej spływu grawitacyjnego.....	180
6.3.2. Grubość filmu cieczy w warunkach przepływu trójfazowego powietrze - woda – olej	187
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	193
8. LITERATURA.....	197

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

A	- powierzchnia przekroju poprzecznego kanału	m^2
C	- stała, współczynnik rozproszenia faz	-
Fr	- liczba Frouda	-
H	- wysokość przewodu	m
\dot{m}	- strumień masy	kg/s
N	- liczba zastępcza, liczba punktów	-
R	- rzeczywisty udział objętościowy fazy w przepływie wielofazowym	-
Re	- liczba Reynoldsa	-
S	- poślizg międzyfazowy	-
V	- objętość	m^3
\dot{V}	- strumień objętości	m^3/s
X	- parametr Lockharta-Martinello	-
d	- średnica kanału	m
g	- gęstość strumienia masy	$kg/(m^2 \cdot s)$
\tilde{g}	- przyspieszenie ziemskie	m/s^2
m	- strumień masy	kg/s
r	- współczynnik korelacji	-
s	- grubość filmu cieczy	m
t	- temperatura	$^{\circ}C$
w	- prędkość liniowa	m/s
x	- udział masowy w przepływie wielofazowym	-

Symbole greckie

δ	- błąd względny	%
$\bar{\delta}$	- średnia wartość błędu względnego	%
ε	- wlotowy udział objętościowy jednej z faz w mieszaninie	-
η	- dynamiczny współczynnik lepkości	Pa·s
ρ	- gęstość	kg/m^3
σ	- napięcie powierzchniowe	N/m

Indeksy odnoszą się do

- (A) - przepływu pierścieniowego
- c - cieczy, fazy ciągłej w przepływie
- d - średnicy kanału
- f - fazy
- g - gazu
- g-3F - gazu względem strugi trójfazowej
- i - i-tej fazy
- inw - inwersji faz ciekłych
- o - oleju
- obl - wielkości obliczonych
- r - wielkość zredukowana
- w - wody
- zm - wielkości zmierzonych
- * - koncentracji fazy (udziału fazy w mieszaninie ciecz-ciecz)
- 3F - przepływu trójfazowego
- 0 - wielkości pozornych (liczonych na całkowity przekrój kanału)

1. WPROWADZENIE

Przepływy wielofazowe są nie tylko częścią naszego naturalnego środowiska jak deszcz, wiatr czy śnieg, zanieczyszczenia wód i powietrza czy aktywność wulkaniczna, ale towarzyszą także wielu różnym procesom w konwencjonalnych elektrowniach jądrowych, w silnikach spalinowych i systemach napędowych. Pojawiają się we wnętrzu ludzkiego ciała, ale także podczas produkcji i transportu ropy i gazu. Występują w wielu procesach i urządzeniach przemysłowych takich jak reaktory heterogeniczne (kolumny półkowe, pęcherzykowe), kolumny wyparne czy parowniki urządzeń klimatyzacyjnych i chłodniczych. Przepływy takie mają miejsce w przemyśle chłodniczym, chemicznym, petrochemicznym, farmaceutycznym, metalurgicznym i spożywczym. Przemysłowe wykorzystanie przepływów wielofazowych wymaga metod przewidywania zachowania się takich przepływów w konkretnych urządzeniach i aparatach [1].

W pracy podjęto tematykę dotyczącą hydrauliki przepływu mieszaniny wielofazowej gazu i dwóch wzajemnie niemieszających się cieczy, z których jedna jest cieczą wysokolepką. Ponieważ obszernie przeprowadzony przegląd literatury tematycznej, wskazuje na braki dotyczące przepływów wielofazowych z udziałem cieczy o dużej lepkości, w pracy dokonano rozszerzenia stanu wiedzy głównie w odniesieniu do takich właśnie rodzajów cieczy oraz ich mieszanin dwufazowych z drugą cieczą, o innych właściwościach fizycznych.

Podjęte prace eksperymentalne dotyczą badań hydrauliki przepływu mieszaniny wielofazowej, z uwzględnieniem rodzajów struktur przepływu i obszarów ich występowania oraz określenia wartości udziałów objętościowych faz i grubości tworzących się filmów cieczy dla różnych warunków przepływowych.

W drugim rozdziale pracy przedstawiono zakres wykorzystania przepływu wielofazowego w aparaturze procesowej. Odniesiono się w nim głównie do możliwości wykorzystania przepływu pierścieniowego w rurowych aparatach wyparnych i reaktorach rurowych.

W rozdziale trzecim przedstawiono charakterystykę współprądowego opadającego w rurach pionowych przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz. Opisano w nim przeprowadzony przegląd literaturowy dotyczący hydrodynamiki tego typu przepływu. Przeanalizowano aktualne prace dotyczące form przepływu, map

przepływu oraz badań udziałów objętościowych poszczególnych faz, a także metod pomiarowych i sposobów obliczania grubości filmów poszczególnych składników cieczy. Dokonany przegląd literatury potwierdza, że ocena grubości filmów cieczy nie była częstym elementem badań w przepływie wielofazowym. W większości przypadków badano przepływ filmowy cieczy o niedużej lepkości. Zatem, w celu poznania i dokładniejszego opisu hydrodynamiki przepływów wielofazowych z udziałem cieczy lepkich, konieczne jest przeprowadzenie prac analitycznych i eksperymentalnych.

W rozdziale czwartym niniejszej rozprawy opisano cel i zakres pracy. Za cel pracy przyjęto określenie hydrodynamiki współprądowego, opadającego w rurach pionowych, przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz, głównie w zakresie przepływu pierścieniowego. Natomiast za zakres pracy przyjęto przeprowadzenie badań stanowiskowych celem wyznaczenia charakterystycznych wielkości dla przepływających filmów cieczy, a w szczególności grubości i natury tworzących się filmów cieczy. Następnie przeprowadzono analizę uzyskanych wyników badań eksperymentalnych pod kątem określenia zakresu występowania różnych jakościowo form przepływu pierścieniowego, wartości udziałów objętościowych faz oraz określenie wartości grubości dla dwufazowych filmów cieczy przy współprądowym ich splywie i przepływie z fazą gazową. Poczynione w tym zakresie działania (opisane w kolejnych rozdziałach) doprowadziły do opracowania wykresów i zależności opisujących wybrane parametry hydrodynamiki przepływu pierścieniowego w zakresie form przepływu cieczy dwufazowej z gazem, wartości udziałów objętościowych faz, rodzajów filmów cieczy z dominacją fazy wodnej i olejowej oraz wartości ich grubości.

Rozdział piąty zawiera opis przeprowadzonych badań własnych. W rozdziale tym scharakteryzowano szczegółowo stanowisko badawcze, opisano metodykę prowadzenia badań, czyli sposobu obserwacji struktur przepływu, pomiaru wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz oraz pomiaru grubości tworzących się filmów cieczy. W rozdziale tym podano także dane dotyczące właściwości składników mieszaniny wielofazowej, którą stanowiły powietrze, woda i cztery różne jakościowo oleje: 2 grzewcze: Iterm 6Mb i Iterm 12, 1 smarowy: Iterm 20MF i 1 maszynowy L-AN 15. W rozdziale tym zamieszczono także opis wykorzystanej metody konduktometrycznej dla układu ciecz-ciecz stanowiącej narzędzie do określania dominacji poszczególnych faz ciekłych w przepływie mieszaniny wielofazowej.

W rozdziale szóstym przedstawiono natomiast uzyskane z przeprowadzonych badań wyniki dotyczące opisu zaobserwowanych struktur przepływu, oceny uzyskanych wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz oraz zmierzonych grubości poszczególnych filmów cieczy. W rozdziale tym przedstawiono opracowane w wyniku badań mapy przepływu określające obszary występowania poszczególnych struktur przy spływie dwufazowym typu ciecz-ciecz oraz przy przepływie trójfazowym typu gaz-ciecz-ciecz.

Dokonano także oceny wpływu parametrów przepływającej mieszaniny wielofazowej i jej składników na wartości udziałów objętościowych każdej z faz. Otrzymane wyniki porównano z modelami literaturowymi, w celu ustalenia ich użyteczności do opisu własnych danych eksperymentalnych. Przedstawiono również własną metodę obliczania udziałów objętościowych faz w spływie grawitacyjnym mieszaniny cieczy oraz w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz.

W dalszej części tego rozdziału zamieszczono również wyniki badań dotyczące grubości poszczególnych warstewek cieczy w spływie grawitacyjnym cieczy dwufazowej oraz w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz. Wskazano na zależności do obliczania grubości filmów poszczególnych cieczy w zakresie ich spływu grawitacyjnego oraz przepływu z fazą gazową.

Podsumowującym rozdziałem pracy jest rozdział siódmy. Przedstawiono w nim wnioski z dokonanej analizy dotyczącej charakterystyki hydrodynamiki współprądowego, opadającego w rurach pionowych przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz w zakresie występowania form przepływu, pomiarów wartości udziałów objętościowych faz oraz pomiaru grubości filmów cieczy.

2. WYKORZYSTANIE PRZEPLYWU PIERŚCIENIOWEGO W APARATURZE PROCESOWEJ

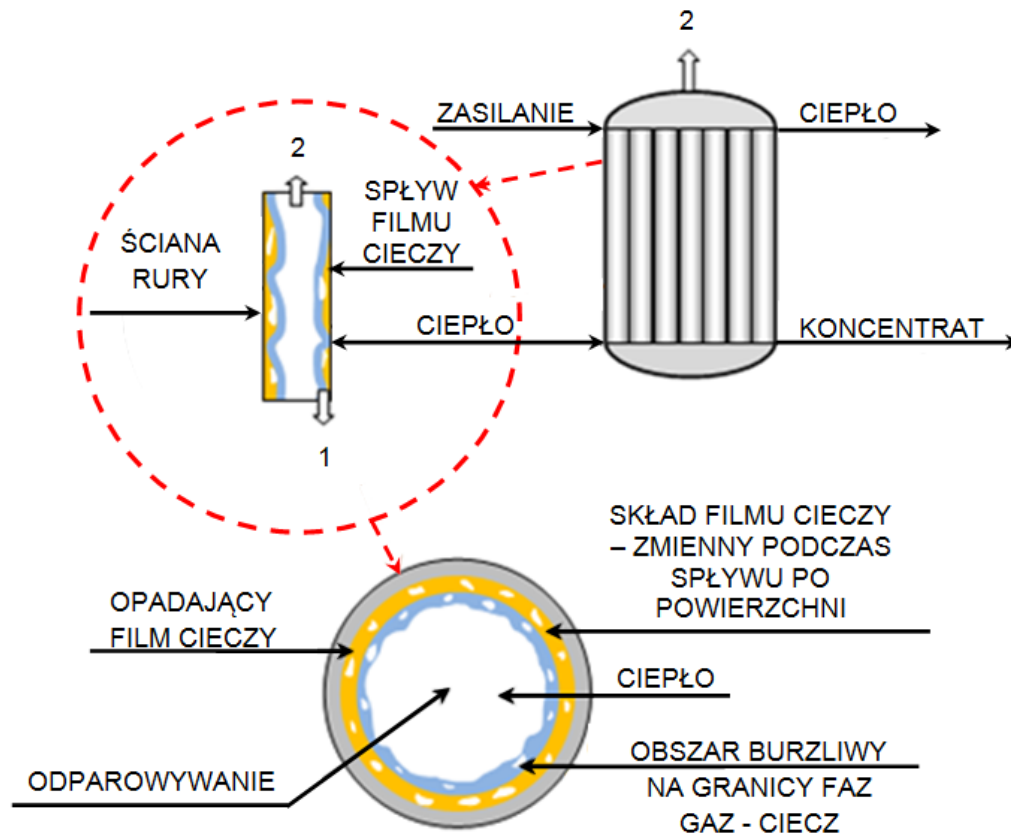
Wiele aparatów do prawidłowej pracy wymaga wytworzenia korzystnego rodzaju przepływu. Można w tej grupie wymienić wyparki cienkowarstewkowe czy też rurowe reaktory heterogeniczne. Jednoczesna obecność w procesach realizowanych w takich aparatach, fazy gazowej i ciekłej stwarza wiele trudności w zapewnieniu odpowiednich warunków do ich prawidłowej pracy [2].

Wyparka jest urządzeniem przemysłowym do zateżniania roztworów. Proces odparowywania cieczy odbywa się w trakcie jej spływu po wewnętrznych powierzchniach długich rur pod wpływem grawitacji lub hydraulicznie. Płyn tworzy cienki, ciągły film cieczy wzdłuż ścian rur. Dystrybutor cieczy musi być tak zaprojektowany, aby zapewnić równomierny rozkład cieczy do wszystkich rur. Charakter spływającego filmu cieczy zmienia się od laminarnego poprzez falisty, do burzliwego w zależności od ilości i właściwości fizykochemicznych dostarczanego płynu. Zaletą wyparek cienkowarstewkowych jest krótki czas przebywania cieczy w urządzeniu, co zapobiega przegrzaniu produktu czyniąc je idealnymi aparatami do wrażliwych na ciepło produktów [3].

Na rys. 2.1 przedstawiono schematycznie zasadę działania aparatów cienkowarstewkowych. Komora grzejna wyparki jest wymiennikiem ciepła, w którym ciepło jest dostarczane do zagęszczanego roztworu. W zależności od temperatury roztworu wprowadzanego do komory grzejnej albo dostarczane jest tylko ciepło przemiany fazowej, albo ciepło na ogrzanie roztworu do wrzenia i ciepło parowania rozpuszczalnika. Przepływ roztworu może się odbywać w postaci cienkiej warstwy lub przy pełnym wypełnieniu kanału. W komorze grzejnej następuje odparowanie rozpuszczalnika wzdłuż pionowej ściany rury wyparki i wytworzenie mieszaniny cieczo-para. Następnie, w komorze oparów następuje rozdzielenie mieszaniny cieczo-para na składniki i odprowadzenie ich z wyparki. W komorze oparów muszą być stworzone warunki do opadania porwanych przez opary kropli cieczy, czyli prędkość strumienia oparów musi być mniejsza od prędkości opadania kropli cieczy.

Odparowanie jest najpowszechniej stosowanym sposobem zagęszczania roztworów, które najintensywniej przebiega w temperaturze wrzenia. W przypadku roztworów odpornych na działanie wysokich temperatur doprowadzenie do stanu wrzenia odbywa

się przez podwyższenie temperatury. Jednak większość składników roztworu zagęszczanych jest nieodporna na działanie podwyższonej temperatury. Z tego względu zagęszczanie prowadzi się pod ciśnieniem obniżonym w stosunku do ciśnienia otoczenia, które w wyparce wytwarza się poprzez skroplenie oparów w skraplaczu.

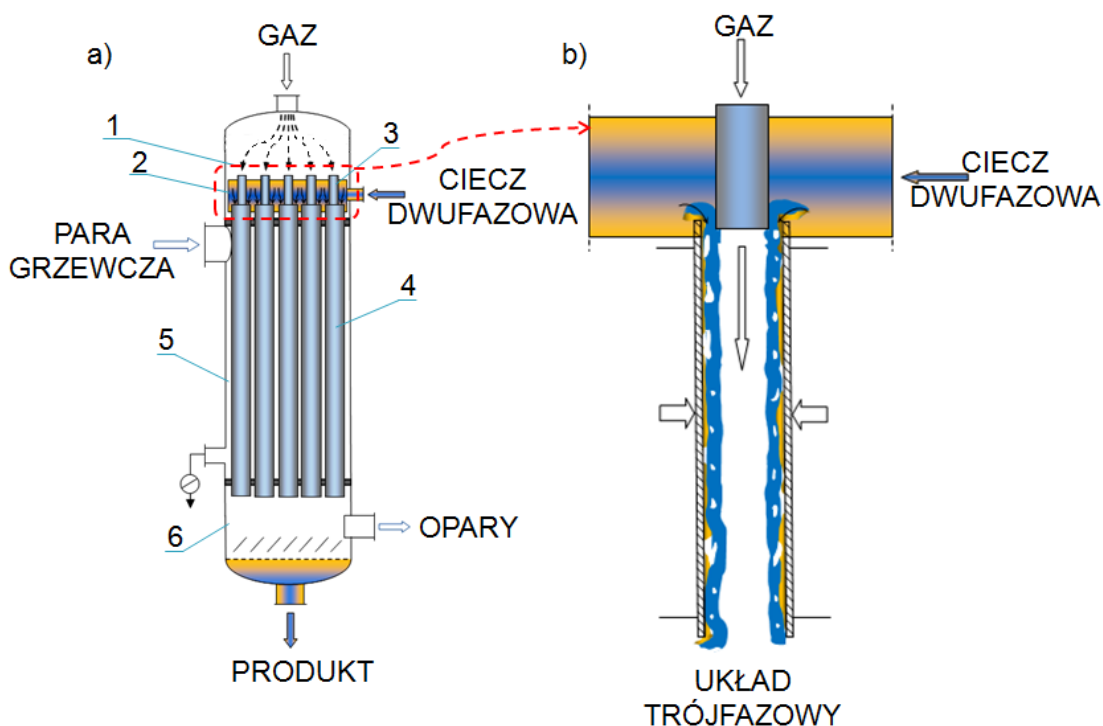


Rys. 2.1. Zasada działania aparatów cienkowarstewkowych wg [4]; 1 – produkt skoncentrowany; 2 – odparowany rozpuszczalnik.

Głównym wymogiem w procesie modelowania wyparek cienkowarstewkowych jest uniknięcie ich zalania lub tworzenia się suchych ścieżek wzdłuż rur aparatu, co wpływa na zmniejszenie wydajności tych aparatów lub doprowadza do lokalnego przegrzania się produktu [4].

W aparatach wyparnych korzystnym rodzajem przepływu jest przepływ pierścieniowy czyli taki, w którym ciecz płynie cienką warstwą po ścianie rury, a gaz ze znaczną prędkością jej środkiem. Hydrauliczny przepływ filmu cieczy występuje w aparatach z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy, wykorzystywanych między innymi w procesie odwadniania smoły węglowej.

Budowę typowego aparatu wyparnego z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy (WFH) przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Aparat wyparny typu WFH

- a) Schemat ogólny, b) układ zasilania typu dysza centralna, 1 – komora gazu, 2 – komora cieczy, 3 – rura zasilająca, 4 – rura procesowa, 5 – przestrzeń międzyrurowa, 6 - separator

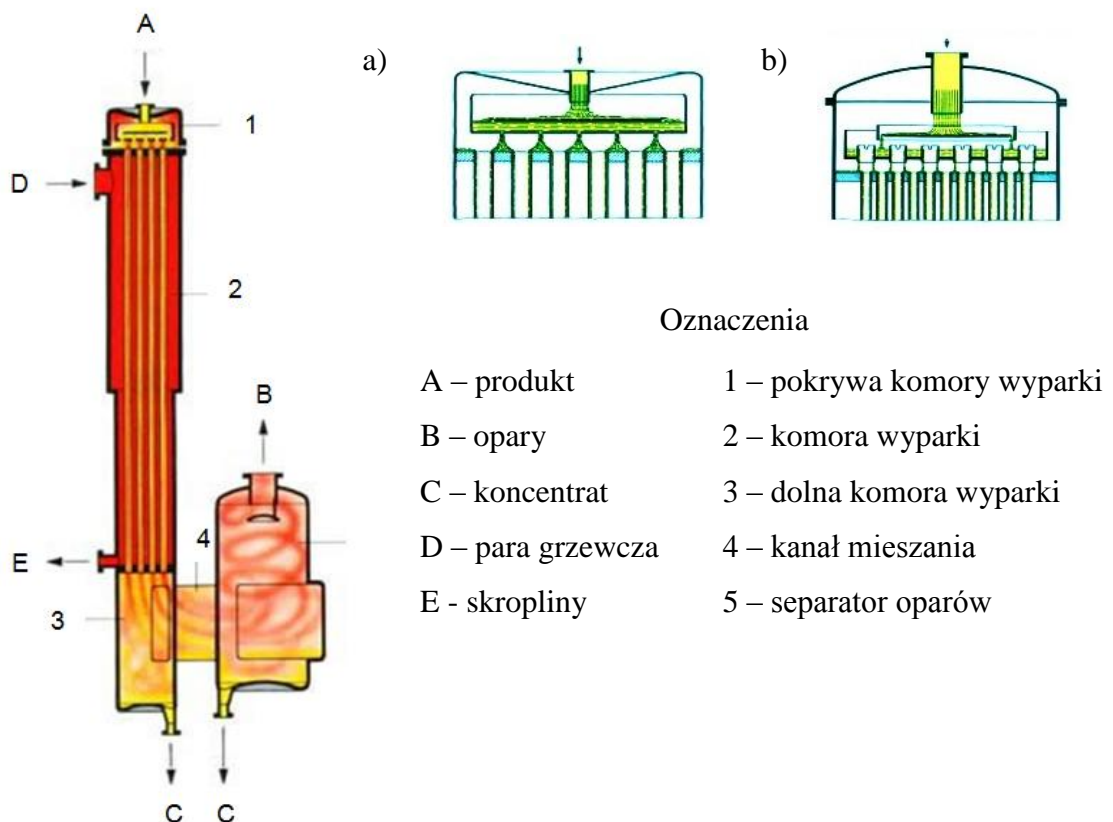
Ze względu na sposób wytwarzania cienkiej warstwy cieczy rozróżnia się aparaty rurowe z grawitacyjnym spływem po powierzchni zewnętrznej lub wewnętrznej rur, aparaty z mechanicznie wytwarzanym filmem cieczy za pomocą zróżnicowanych rotorów, które rozprowadzają ciecz po ścianie urządzenia oraz wyparki wykorzystujące siłę odśrodkową w celu uzyskania cienkiej warstwy filmu cieczy [5].

Ponieważ w niniejszej pracy analizowano opadający przepływ pierścieniowy przy współprądowym przepływie gazu i cieczy bardzo lepkiej w rurach pionowych, celem przykładu przedstawiono wybrane rozwiązania konstrukcyjne wyparek z przepływem cieczy z góry do dołu. Przykładem jest wyparka z rurową komorą grzejną, której schemat przedstawiono na rys. 2.3.

Zasada działania takiej wyparki jest następująca. Komora wyparki pracuje na zasadzie spływającej warstwy cieczy i jest zbudowana z rur o średnicy (25-80)mm

i długości (1-10)m, grubość spływającej warstwy cieczy wynosi (0,3-3)mm, a czas spływu nie przekracza 5s.

W komorach tych występuje rozkład ciśnienia wewnątrz rury. Najniższe ciśnienie panuje przy wlocie do rur, a najwyższe – przy wylocie z rury. Wzrost ciśnienia powoduje wzrost temperatury wrzenia roztworu, która z kolei może wpływać na jakość gotowego produktu. Aparaty tego typu są najczęściej stosowane w przemyśle spożywczym [6].



Rys. 2.3. Wyparka z rurową komorą grzejną z opadającym filmem cieczy wg [6] oraz sposób rozprowadzenia cieczy w wyparce: a) statyczny, b) Scheffera.

Przytoczone przykłady zastosowania wymuszonego przepływu pierścieniowego, będącego jedną z postaci przepływu wielofazowego gaz-ciecz-ciecz, świadczą o licznych możliwościach poprawy wielu procesów technologicznych, w których ma miejsce wspólny przepływ gazu i dwóch wzajemnie niemieszających się cieczy.

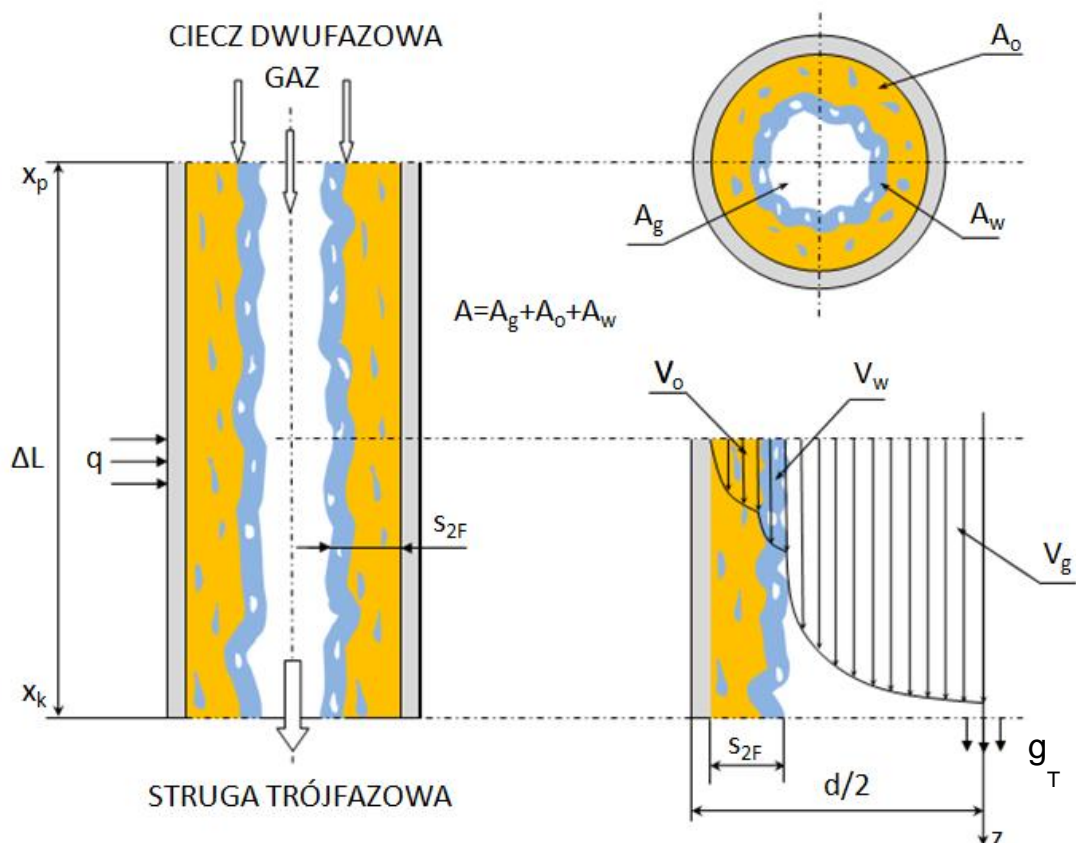
3. CHARAKTERYSTYKA PRZEPLYWU WIELOFAZOWEGO

3.1. Parametry przepływu mieszaniny wielofazowej

Przepływ wielofazowy to wspólny przepływ co najmniej dwóch niemieszających się faz w układzie o dowolnej geometrii. Fazą nazywa się część układu o jednakowych w całej swej masie własnościach fizycznych i o takim samym składzie chemicznym. Występująca pomiędzy fazami granica określana jest w literaturze jako powierzchnia międzyfazowa. Po przekroczeniu granicy faz następuje zmiana składu chemicznego i fizycznego mieszaniny [7, 8].

Struktura przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz, zwłaszcza przepływu pierścieniowego sprawia, że parametry takiego przepływu mogą być zdefiniowane przez zależności będące rezultatem wzajemnego udziału faz w mieszaninie trójfazowej.

Na rys. 3.1. przedstawiono wybrane wielkości odnoszące się do strugi trójfazowej gaz-ciecz-ciecz.



Rys. 3.1. Parametry strugi trójfazowej gaz-ciecz-ciecz

Głównymi parametrami opisującymi przepływ mieszaniny trójfazowej w rurach pionowych są między innymi: udziały objętościowe faz, rzeczywiste i pozorne prędkości przepływu poszczególnych składników mieszaniny, czy też ich gęstość i lepkość [9, 10].

Z równania ciągłości przepływu wynika zależność na strumień masy przy przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz

$$\dot{m}_{3F} = \dot{m}_g + \dot{m}_w + \dot{m}_o, \quad (3.1)$$

Ważnym parametrem jest tzw. stopień suchości mieszaniny gazowo-cieczowej, zwany w literaturze także udziałem masowym gazu w przepływie wielofazowym

$$x_g = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_w + \dot{m}_o}, \quad x_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{3F}}. \quad (3.2)$$

Wzorem tym, można także określać udział masowy poszczególnych składników w strumieniu mieszaniny trójfazowej.

Uznając parametry płynu trójfazowego jako wielkości uśrednione w czasie, prędkości rzeczywiste poszczególnych faz wynoszą:

$$w_g = \frac{\dot{V}_g}{A_g}; \quad w_w = \frac{\dot{V}_w}{A_w}; \quad w_o = \frac{\dot{V}_o}{A_o} \quad (3.3)$$

czyli

$$w_i = \frac{\dot{V}_i}{A_i}, \quad (3.4)$$

gdzie: A_i – rzeczywisty przekrój kanału zajęty przez i -tą fazę.

Z kolei prędkości pozorne poszczególnych faz, liczone są na pełny przekrój kanału, w którym ma miejsce przepływ wielofazowy:

$$w_{g,0} = \frac{\dot{V}_g}{A}; \quad w_{w,0} = \frac{\dot{V}_w}{A}; \quad w_{o,0} = \frac{\dot{V}_o}{A} \quad (3.5)$$

czyli

$$w_{i,0} = \frac{\dot{V}_i}{A}. \quad (3.6)$$

Średnia prędkość rzeczywista i prędkość pozorna, każdej z i -tej fazy wyrażone są następującym równaniem

$$w_{i,0} = R_i \cdot w_i, \quad (3.7)$$

gdzie R_i – jest udziałem objętościowym poszczególnych faz w analizowanym przekroju kanału dla jego stałego przekroju i może być wyrażony następującymi zależnościami:

$$R_g = \frac{A_g}{A}; \quad R_w = \frac{A_w}{A}; \quad R_o = \frac{A_o}{A} \quad (3.8)$$

czyli ogólnie

$$R_i = \frac{A_i}{A}, \quad (3.9)$$

przy czym, zachodzi relacja

$$R_g + R_w + R_o = 1 \quad (3.10)$$

Kolejną wielkością często używaną przy charakteryzowaniu przepływu trójfazowego jest liczba Reynoldsa, która jest definiowana w różnorodny sposób ze względu na odmienne zachowanie się poszczególnych faz przepływających turbulently czy też laminarnie w przepływie aż trzech różnych faz (gaz-ciecz-ciecz).

Liczbę Reynoldsa wyrażającą specyficzną wielkość zastępczą dla całego układu ciekłego można określić z zależności

$$Re_c = \frac{w_{c,0} \cdot d \cdot \rho_c}{\eta_c}. \quad (3.11)$$

Występującą w tym wzorze zastępczą gęstość i lepkość płynów dwufazowych (typu woda i olej) wyznacza się z następujących zależności:

$$\rho_c = \varepsilon_w^* \cdot \rho_w + \varepsilon_o^* \cdot \rho_o \quad (3.12)$$

oraz

$$\eta_c = \varepsilon_w^* \cdot \eta_w + \varepsilon_o^* \cdot \eta_o \quad (3.13)$$

w których ε_w^* i ε_o^* określają wzajemny udział objętościowy wody i oleju w fazie ciekłej:

$$\varepsilon_w^* = \frac{\dot{V}_w}{\dot{V}_w + \dot{V}_o} = \frac{\dot{V}_w}{\dot{V}_c} \quad (3.14)$$

oraz

$$\varepsilon_o^* = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_w + \dot{V}_o} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_c} \quad (3.15)$$

Przy opisie hydrodynamiki przepływu trójfazowego niejednokrotnie korzysta się także z zależności na wlotowy udział objętościowy faz, będący także udziałem strumieni poszczególnych składników

$$\varepsilon_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_{3F}} = \frac{w_{i,0}}{w_{3F}} \quad (3.16)$$

W zależności tej w_{3F} to prędkość mieszaniny trójfazowej określona równaniem

$$w_{3F} = w_{g,0} + w_{w,0} + w_{o,0} \quad (3.17)$$

Z przytoczonych przykładowych parametrów determinujących hydrodynamikę przepływu trójfazowego wynika wielopłaszczyznowość zagadnienia. Zatem w dalszej części pracy zamieszczono aktualny przegląd literaturowy traktujący o wybranych, poddanych analizie wątkach dotyczących przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz w kanałach pionowych.

3.2. Zakres badań przepływu wielofazowego w rurach pionowych

W literaturze przedmiotu liczba opracowań dotyczących współprądowego, opadającego w rurach pionowych przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz, zwłaszcza w odniesieniu do cieczy lepkiej jest niewielka. W większości przypadków publikacje dotyczą przepływów dwufazowych ciecz-ciecz lub gaz-ciecz, ale o niewielkiej lepkości cieczy. W opublikowanych do tej pory pracach koncentrowano się głównie na obserwacji struktur przepływu, wyznaczaniu wartości udziałów objętościowych faz oraz na sposobie pomiaru grubości filmu jednej lub dwóch faz ciekłych. Również niewielki jest zasób prac dotyczących współprądowego przepływu opadającego w rurach pionowych. Najczęściej badano zachowanie poszczególnych faz przy ich wznoszącym przepływie pionowym [11, 12, 13], lub w kanałach poziomych [14, 15, 16, 17]. Poniżej przedstawiono w ujęciu chronologicznym zakres i najistotniejsze informacje dotyczące tematyki wybranych publikacji.

Zgodnie z zakresem pracy przeanalizowano także metody pomiaru grubości różnych jakościowo filmów cieczy.

W tabeli 3.1. przedstawiono informacje słuszne dla przepływów dwufazowych. Natomiast w tabeli 3.2. zestawiono dane adekwatne dla przepływu trójfazowego.

Pedersen i in. [18] w publikacji z 2000 roku opisali wykorzystanie ultradźwięków podczas kondensacji pary wodnej na powierzchni skierowanej w dół. Metoda ta oparta jest na rezonansie fal przy wykorzystaniu fal stojących występujących w cienkiej warstwie filmu cieczy. Wykorzystano fale o częstotliwości 10MHz, a zmierzona grubość warstwy cieczy wynosiła (50-500) μm .

Czernek [19] w swojej pracy doktorskiej z 2004 roku wykorzystywał metodę optoelektroniczną do badań grubości filmu oleju, przy współprądowym, opadającym przepływie pierścieniowym mieszaniny gazu i cieczy bardzo lepkiej. Pomiar grubości warstwy oleju polegał na pomiarze tłumienia sygnału optycznego za pomocą fotodetektora, oświetlonego z przeciwległej strony oświetlaczami diodowymi. Mierzono lokalną grubość przepływających filmów cieczy i określano naturę ich zafalowania. Zmierzona grubość filmów cieczy wynosiła (0,3-3,6)mm.

W pracy Gstoehl'a i in. [20] z 2004 roku scharakteryzowano badania opadającego filmu cieczy na obwodzie poziomej rury o średnicy zewnętrznej 19,05mm. Zmierzona grubość filmu cieczy wynosiła (0,08-1,4)mm. Rodamina była dodawana do

testowanych płynów tj. woda, etylen-glikol, woda-glikol, a laser stosowano do wywołania fluorescencji w filmie cieczy i kontrastu na powierzchni międzyfazowej powietrze-ciecz.

Natomiast w pracy Utaki i in. [21] z 2004 opisano badania wpływu szczelin w mikrokanałach na grubość warstwy cieczy powstałych między powierzchnią ogrzewania, a pęcherzykami pary podczas procesu wrzenia. Badania przeprowadzono dla przepływu dwufazowego woda-para wodna. Gorące powietrze było wykorzystywane jako źródło ogrzewania. Na podstawie intensywności promieniowania podczerwonego określano grubość warstwy cieczy, która wynosiła (2-30) μm .

Z kolei Kim i in. [15] w publikacji z 2006 roku przedstawili metodę fluorescencji do pomiaru grubości filmu cieczy rzędu (10-60) μm . Olej silikonowy stosowano jako płyn podstawowy, a dodawano barwniki przemysłowe: SO i SO-ANTH. Pomiary wykonano wpuszczając kroplę cieczy o znanej objętości między dwie szklane płytki oraz wykorzystując wiązkę lasera i kamerę cyfrową do rejestracji obrazu.

Han i in. [22] w pracy z 2008 roku opisali wykorzystane metody przesunięcia ogniska lasera do pomiaru grubości filmu cieczy przy przepływie rzutowym w rurach o 5 średnicach (0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,3)mm. Użyto 3 różnych płynów (etanol, woda, FC-40) przepływających z powietrzem. Zmierzona grubość filmu cieczy wynosiła (2-140) μm .

W tabeli 3.1. zacytowano także publikacje autorki tej pracy [23, 24, 25], zawierające wyniki wstępnych badań eksperymentalnych nad przepływem dwufazowym i trójfazowym typu gaz-ciecz bardzo lepka oraz gaz-ciecz-ciecz, natomiast w tabeli 3.2. zawarto zebrane informacje dotyczące przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz.

Wcześniejsze badania nad przepływem trójfazowym gaz-ciecz-ciecz skupiały się głównie na obserwacjach doświadczalnych i klasyfikacji struktur przepływu. Tek [26] w swoich badaniach traktował dwie niemieszające się ciecze jako równowagę jednej fazy i przewidywał straty ciśnienia na podstawie korelacji empirycznych. Shean [27] w swojej pracy przeprowadził badania wznoszącego przepływu dwufazowego olej (Nujol)-woda i trójfazowego olej (Nujol)-woda-powietrze, w rurze pionowej o średnicy wewnętrznej 19mm i przedstawił odpowiadającą przepływowi typu ciecz-ciecz mapę przepływu. Pleshko i Sharma [28] przewidywali struktury przepływu w oparciu o model przepływu dwufazowego gaz-ciecz zaproponowany przez Taitel'a i in. [29] w 1980

roku. Jednakże otrzymane wyniki wskazywały, że model dwufazowy był nieodpowiedni w przypadku określania struktur przepływu przy przepływie trójfazowym. Z kolei Guo i in. [30] badali przepływ trójfazowy w rurze o średnicy wewnętrznej 125mm i podzielili struktury przepływu na przepływ pęcherzykowy i rzutowy na podstawie metody wizualnej. Wyodrębnioną strukturę pęcherzykową podzielili następnie na dwie typowe struktury, które były rozróżnialne jako krople oleju i pęcherzyki powietrza. Woods i in. [31] wykonali badania przepływu trójfazowego w rurze wykonanej z pleksiglasu o średnicy wewnętrznej 26mm i zdefiniowali 9 struktur przepływu oraz przedstawili mapę przepływu. Chen [32] badał charakterystyki przepływu trójfazowego w rurze pionowej przy przepływie wznoszącym i sklasyfikował struktury przepływu jako olej w wodzie lub woda w przepływie typu olejowego. Oddie i in. [33] podjęli się badań przepływu trójfazowego typu olej-powietrze-woda i potraktowali fazy olej-woda jako jednorodne bez zjawiska poślizgu między fazami. Descamp i in. [34, 35], podjęli się badań przepływu trójfazowego olej-powietrze-woda i badali wpływ sposobu wprowadzenia gazu na przebieg zjawiska inwersji faz w przepływie olej-woda w rurze pionowej. Z kolei Furukawa i Fukano [36], Chupin i Nydal [37], Hewitt [38] oraz Wegmann i in. [39] w swoich pracach szczegółowo analizowali czynniki wpływające na struktury przepływu, takie jak właściwości materiału rury, z którego wykonane są rury w instalacjach, średnica rury, lepkość cieczy i napięcie powierzchniowe.

W tabeli uwzględniono także prace własne autorki [40, 41], zawierające wybrane wyniki badań nad hydrodynamiką opadającego w rurach pionowych przepływu trójfazowego typu olej-powietrze-woda.

Tabela 3.1

Zestawienie publikacji dotyczących przepływu dwufazowego

Lp.	Autor opracowania	Rok	Czynniki robocze	Kierunek przepływu	Metoda pomiaru i grubość filmów cieczy
1.	Pedersen i in. [18]	2000	para wodna	pionowy opadający	akustyczna, ultradźwięki $s_c=(50-500)\mu\text{m}$
2.	Czernek [19]	2004	olej wysokolepki, powietrze	pionowy opadający	optoelektroniczna $s_c=(0,3-3,6)\text{mm}$
3.	Gstoehl i in. [20]	2004	woda, etylen, glikol (+rodamina B), powietrze	poziomy	optyczna, laser, fluorescencja $s_c=(0,08-1,4)\text{mm}$
4.	Utaka i in. [21]	2004	woda, para wodna	pionowy opadający	optyczna, promieniowanie podczerwone $s_c=(2-30)\mu\text{m}$
5.	Kim i in. [15]	2006	olej silikonowy + barwniki (SO i SO-ANTH)	poziomy	optyczna, fluorescencja $s_c=(10-60)\mu\text{m}$
6.	Han i in. [22]	2008	powietrze, etanol, woda, FC-40	poziomy	optyczna, laser $s_c=(2-140)\mu\text{m}$
7.	Brandt [23, 24, 25]	2008 2009 2010	powietrze, olej wysokolepki, woda	pionowy opadający	optoelektroniczna, optyczna $s_c=(0,6-3,4)\text{mm}$

Tabela 3.2

Zestawienie literatury dotyczącej przepływu trójfazowego

Lp.	Autor opracowania	Rok	Czynniki robocze	Kierunek przepływu	Zakres badań
1.	Tek [26]	1961	ropa naftowa-woda-gaz	pionowy wznoszący	straty ciśnienia, udziały objętościowe faz
2.	Shean [27]	1976	olej-woda, olej-woda-powietrze	pionowy wznoszący	straty ciśnienia, udziały objętościowe faz, struktury przepływu
3.	Pleshko i Sharma [28]	1990	olej-woda-powietrze	pionowy wznoszący	udział objętościowy gazu, struktury i mapa przepływu, tarcie opory przepływu
4.	Chen [32]	1991	olej-woda-powietrze	pionowy wznoszący	struktury przepływu
5.	Woods i in. [31]	1998	olej-woda-powietrze	pionowy wznoszący	Struktury i mapy przepływu, udziały objętościowe faz, straty ciśnienia
6.	Oddie i in. [33]	2003	olej-powietrze-woda	pionowy wznoszący	struktury przepływu, udziały objętościowe
7.	Nowak [9]	2007	olej-powietrze-woda	pionowy wznoszący	struktury i mapy przepływu, udziały objętościowe faz, straty ciśnienia
8.	Brandt [40, 41]	2011	olej-powietrze-woda	pionowy opadający	struktury i mapy przepływu, udziały objętościowe faz, grubość filmów cieczy

3.3. Struktury przepływu

W zależności od przepływającej w przewodzie mieszaniny cieczy dwufazowych i gazu, ich właściwości i geometrii kanału mogą tworzyć się zróżnicowane struktury przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz. Struktura przepływu to określony osiowy i promieniowy rozkład koncentracji wszystkich faz. Możliwość przewidywania rodzaju tworzącej się struktury przepływu jest bardzo złożona i utrudniona z powodu losowego charakteru przepływu mieszaniny wielofazowej. Wiedza na temat powstających struktur przepływu wielofazowego ma fundamentalny sens przy obliczeniach procesowych. Forma przepływu trójfazowego warunkuje tok obliczeń między innymi wartości udziałów objętościowych faz, oporów przepływu czy też współczynników wnikania ciepła i masy w przepływającej mieszaninie wielofazowej [42].

Stąd, ważne jest rozeznanie różnych struktur przepływu trójfazowego. Jednakże ze względu na złożone interakcje pomiędzy fazami, identyfikacja struktur przepływu trójfazowego typu olej-gaz-woda pozostaje nadal nierozwiązanym problemem [43], szczególnie w przypadku przepływu opadającego w rurach pionowych.

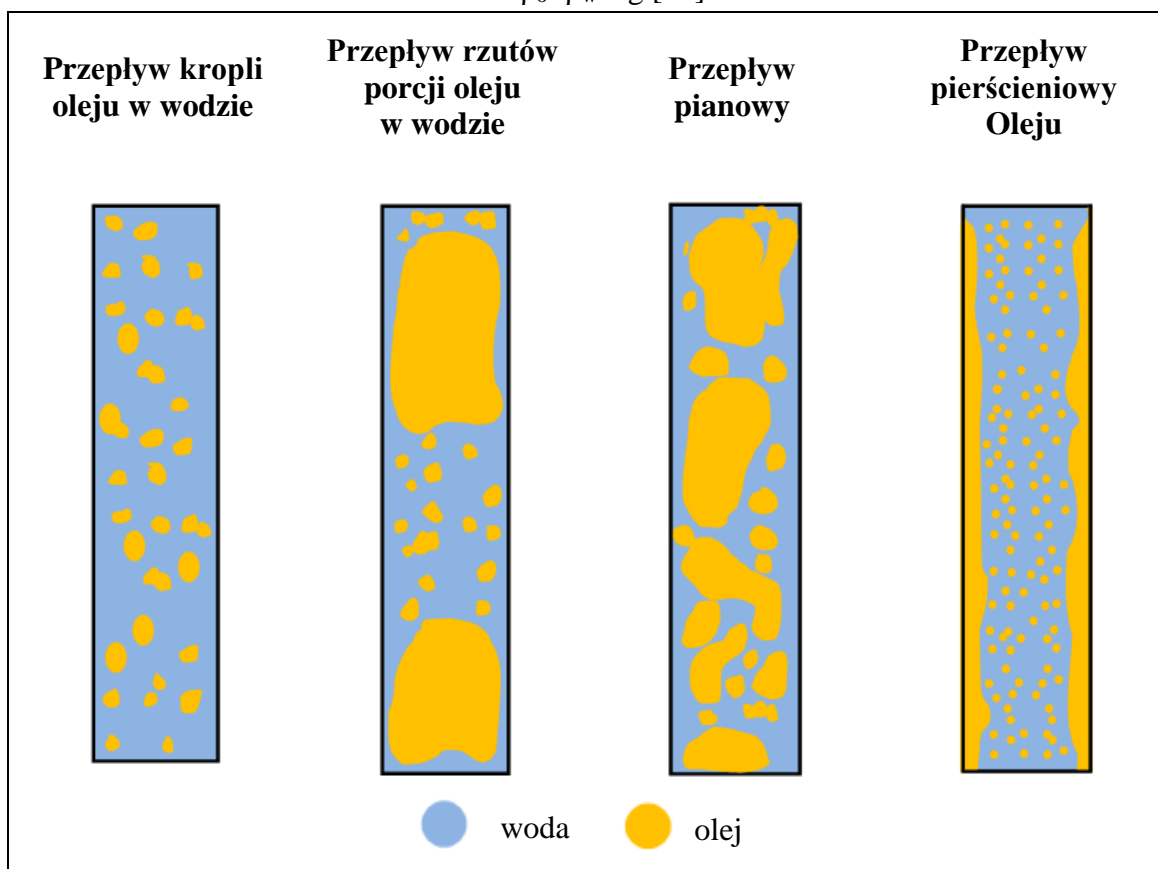
Z powodu braku opisu struktur opadającego przepływu trójfazowego w dotychczasowej literaturze zarówno polskiej jak i zagranicznej poniżej przedstawiono wybrane pozycje literaturowe charakteryzujące struktury opadającego przepływu dwufazowego gazu i cieczy bardzo lepkiej oraz wznoszącego przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz w przewodach pionowych celem przybliżenia zagadnienia związanego z identyfikacją tworzących się w różnych warunkach struktur przepływu wielofazowego.

3.3.1. Przepływ dwufazowy ciecz-ciecz

Opisy badań struktur przepływu mieszanin dwufazowych typu ciecz-ciecz można odnaleźć w większej ilości opracowań [7, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50]. We wszystkich wymienionych wyżej pozycjach zajmowano się przepływem poziomym lub pionowym przepływem wznoszącym. Badania eksperymentalne miały na celu głównie określanie i identyfikację tworzących się form przepływu. W odróżnieniu od dobrze poznanego i opisanego przepływu dwufazowego typu gaz-ciecz, zagadnienie rozpoznania przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz w rurach pionowych pozostaje na wstępnym etapie badań, zwłaszcza dla przepływu opadającego w rurach pionowych. W odniesieniu do przepływu wznoszącego autorzy, jednej z nielicznych prac [46] identyfikowali struktury przepływu dla mieszaniny woda-olej, w której olej cechował się mniejszą gęstością niż gęstość wody. Schematy struktur sklasyfikowanych przez autorów pracy [46] przedstawiono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3

Struktury wznoszącego przepływu dwufazowego woda-olej w przewodzie pionowym dla $\rho_o < \rho_w$ wg [46]



Z kolei autorzy pracy [47] opisali struktury przepływu przy wznoszącym przepływie dwufazowym woda-olej smołowy, w której olej miał większą gęstość niż woda. W wyniku badań wyróżnili pięć podstawowych struktur, które przedstawiono w tabeli 3.4, natomiast w tabeli 3.5 zawarto charakterystykę struktur wznoszącego przepływu dwufazowego ciecz-ciecz w przewodzie pionowym.

Tabela 3.4

Struktury wznoszącego przepływu dwufazowego woda-olej w przewodzie pionowym dla $\rho_o > \rho_w$ wg [47]

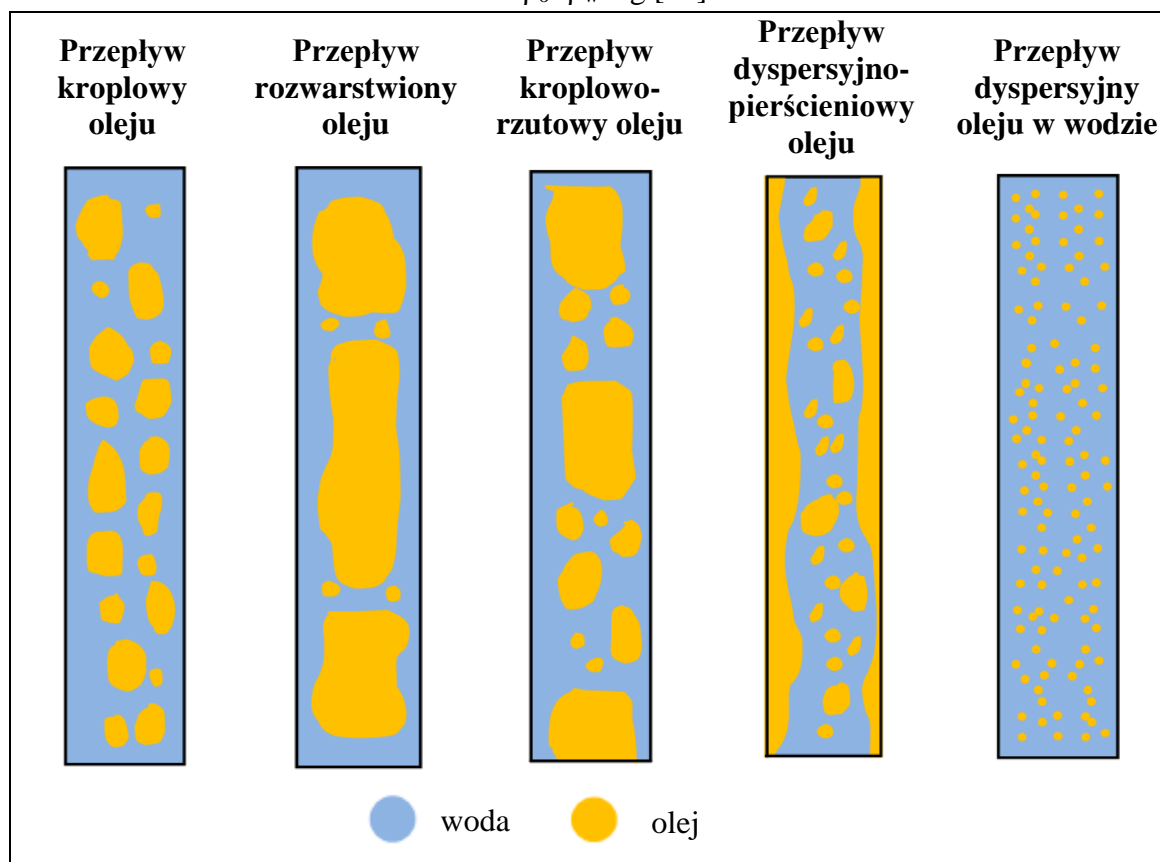


Tabela 3.5

Charakterystyka struktur wznoszącego przepływu dwufazowego woda-olej smołowy w rurze pionowej wg [51]

Nazwa struktury	Symbol*
Przeływ kropłowy oleju	Ko
Olej płynie w postaci dużych kropeł w ciągłej fazie wodnej	
Przeływ rozwarstwiony oleju	Ro
Olej płynie w postaci korków, których długość zwiększa się wraz ze wzrostem udziału fazy olejowej	
Przeływ kropłowo-rzutowy oleju	KRo
Naprzemienny przepływ kropeł i korków oleju w wodzie	
Przeływ dyspersyjno-pierścieniowy oleju	DAo
Olej płynie w rdzeniu rury w postaci drobnych i większych kropeł oraz po ścianie rury w formie filmu	
Przeływ dyspersyjny oleju w wodzie	Do
Całym przekrojem rury płynie zdyspergowany w wodzie olej	

*oznaczenia symboli podano w wersji oryginalnej za autorami pracy

Od 2006 roku dokonano większych osiągnięć w badaniach nad dwufazowym przepływem typu ciec-ciecz w rurach pionowych. Liu i in. w pracy [52] w swoich badaniach wykorzystywali technikę laserowo indukowanej fluorescencji do określenia struktur przepływu oraz do badania zjawiska inwersji faz. Z kolei Hu i Angeli [53] badali zjawisko inwersji faz we współprądowym wznoszącym i opadającym dwufazowym przepływie olej-woda w rurze pionowej. Jana i in. [49] zdefiniowali cztery struktury przepływu dwufazowego olej-woda w rurze pionowej o średnicy wewnętrznej 25,4mm. Hu i in. [54] podjęli się badań nad przepływem dwufazowym olej-woda, przy wznoszącym i opadającym przepływie tych faz. Badania przeprowadzili w rurze o średnicy wewnętrznej 38mm, badając charakter przepływu burzliwego w obecności fazy zdyspergowanej. Lin i Tavlarides [55] badali wznoszący przepływ dwufazowy olej-woda w rurze pionowej wykonanej ze stali nierdzewnej w warunkach podwyższonego ciśnienia. Scharakteryzowali przepływy: pęcherzykowy, korkowy, rzutowy i pierścieniowy oraz strukturę zbliżoną do jednofazowego przepływu. Wskazali także, że długość rury, ciśnienie i strumień przepływu miały znaczący wpływ na powstające struktury przepływu. Xu i in. [56] badali zjawisko inwersji faz przy dwufazowym przepływie woda-olej w rurze pionowej i wskazali, że punkt inwersji faz był zawsze zbliżony do wartości wlotowego udziału objętościowego oleju około 0,8 dla przepływu wznoszącego i 0,75 dla przepływu opadającego. Natomiast Du i in. [57] badali dwufazowy przepływ wznoszący olej-woda w rurze pionowej o średnicy wewnętrznej 20mm wykorzystując metodę konduktancji w celu określenia tworzących się struktur przepływu oraz stworzenia map przepływu. W tabeli 3.6 zamieszczono struktury przepływu obserwowane przez autorów pracy [57], natomiast tabela 3.7 zawiera ich opis i charakterystykę. Z kolei, autorzy pracy [58] badali przepływ dwufazowy olej-woda w U-rurce o średnicy wewnętrznej 25mm. Dzięki zastosowaniu U-rurki możliwa była obserwacja takich samych struktur przepływu zarówno przy ich wznoszącym jak i opadającym przepływie. Na rys. 3.2a i b, przedstawiono zdjęcia otrzymanych przez autorów struktur przepływu w zależności od wartości prędkości pozornej wody. Struktury te, zostały zapisane za pomocą szybkoklatkowej kamery. Ze zdjęć zauważa się, że podobne struktury przepływu (np. przepływ pierścieniowy) w U-rurce. Pomimo, że faza olejowa ulegała dyspersji wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody, pozostawała ona stale w rdzeniu rury.

Tabela 3.6

Struktury wznoszącego przepływu dwufazowego olej-woda w rurze pionowej wg [57]

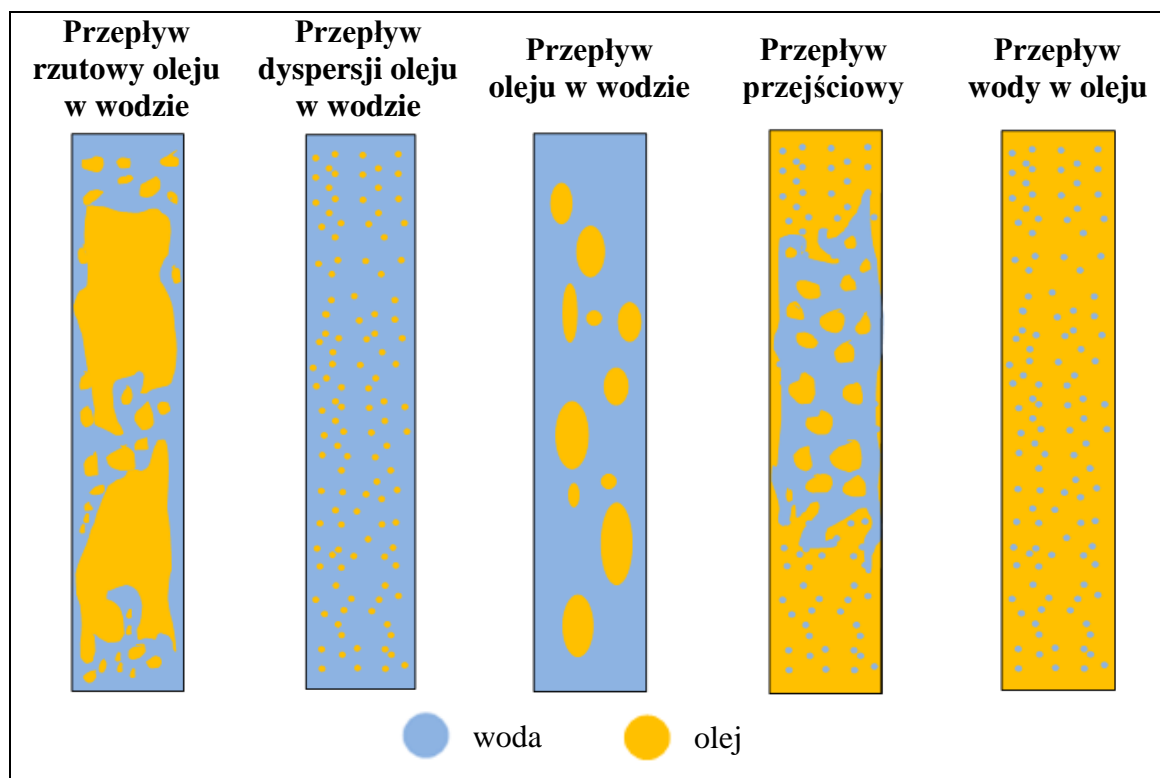


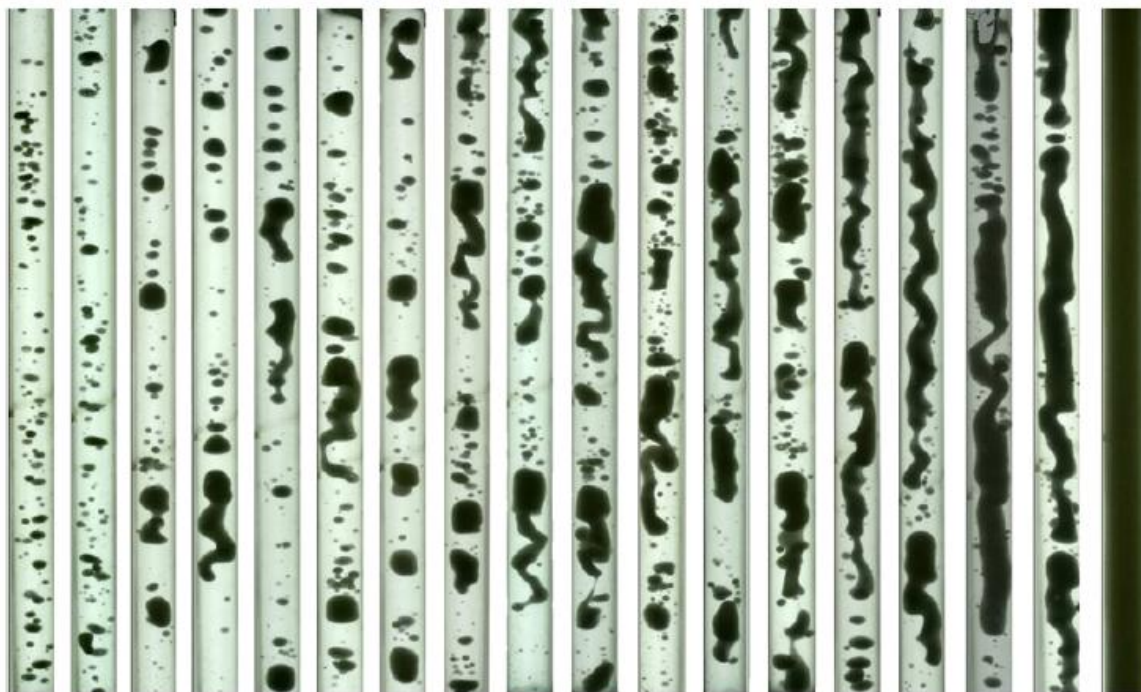
Tabela 3.7

Charakterystyka struktur wznoszącego przepływu dwufazowego woda-olej w rurze pionowej wg [57]

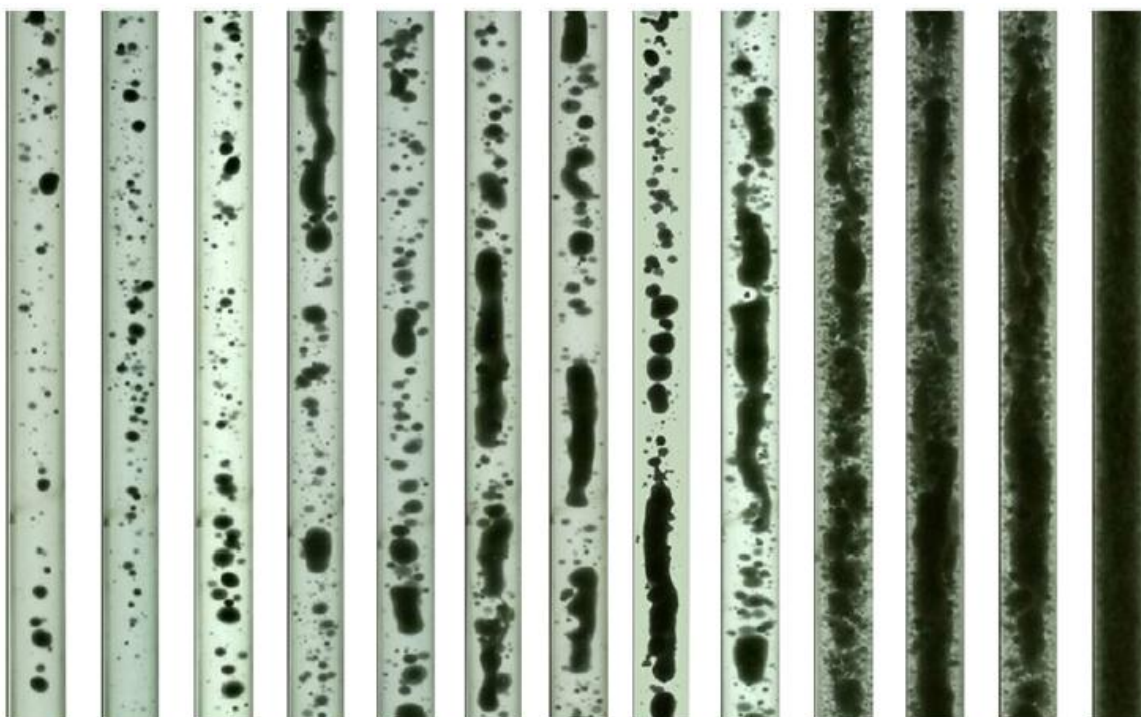
Nazwa struktury	Symbol*
Przepływ rzutowy oleju w wodzie	D OS/W
Przepływ taki występował przy niskich prędkościach przepływu mieszaniny olejowo-wodnej. Krople oleju ulegają koalescencji w większe skupiska kropli bądź pojawiają się rzuty oleju.	
Przepływ dyspersji oleju w wodzie	D O/W
Struktura taka pojawiała się przy bardzo wysokich strumieniach przepływu fazy wodnej, powodując rozbicie krolek oleju na bardzo drobne kropelki.	
Przepływ oleju w wodzie	O/W
Struktura taka pojawiała się przy większych prędkościach przepływu mieszaniny olejowo-wodnej. Faza olejowa ulegała dyspersji na pojedyncze i drobne krople oleju w ciągłej fazie wodnej.	
Przepływ przejściowy	TF
Przepływ taki tworzył stan przejściowy pomiędzy ciągłą fazą wodną, a ciągłą fazą olejową. W takim przypadku obserwacja konkretnej struktury była utrudniona.	
Przepływ wody w oleju	D W/O
Struktura taka występowała przy wysokich prędkościach przepływu oleju. Drobne krople wody ulegały dyspersji w ciągłej fazie olejowej.	

*oznaczenia symboli podano w wersji oryginalnej za autorami pracy

a)



b)



Rys. 3.2. Struktury wznoszącego przepływu w U-rurce przy $w_{w,0}=0,28\text{m/s}$ (a) i $w_{w,0}=0,57\text{m/s}$ (b) oraz stopniowym wzroście wlotowego udziału objętościowego oleju wg [58]

3.3.2. Przepływ dwufazowy gaz-ciecz

W nawiązaniu do mieszaniny dwufazowej przy przepływie opadającym gazu i cieczy bardzo lepkiej w rurach pionowych można odnaleźć zróżnicowaną klasyfikację. W tab. 3.8 przedstawiono struktury zaobserwowane przez Troniewskiego i Spisaka [59], którzy obserwowali mieszaninę powietrze-olej ($\eta_{ol} \approx 4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Z kolei w tabeli 3.9 zawarto charakterystykę zaobserwowanych w tym przypadku struktur przepływu.

Tabela 3.8

Struktury opadającego przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka wg [59]

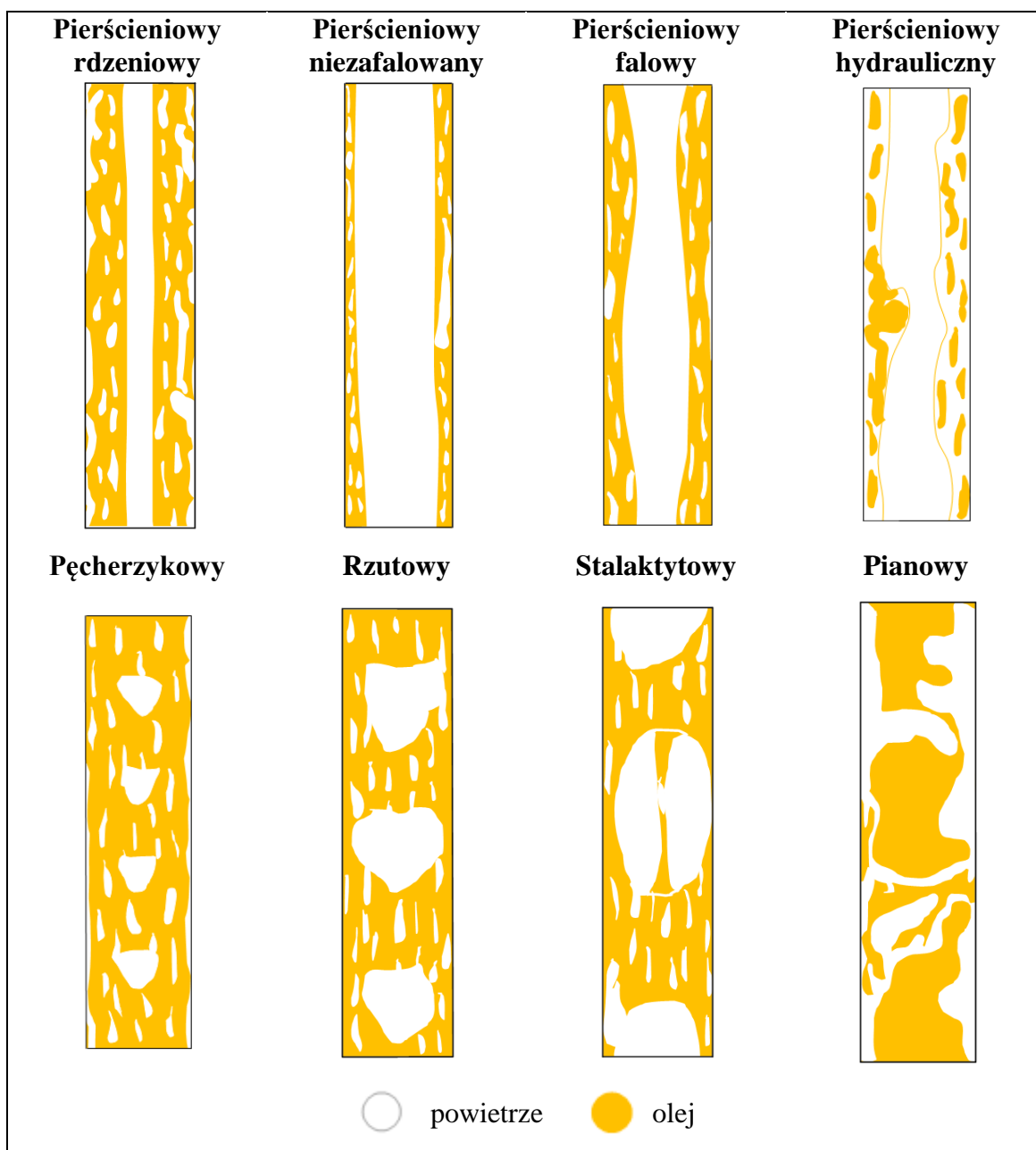


Tabela 3.9

Charakterystyka struktur opadającego przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka w rurze pionowej wg [8, 59]

Nazwa struktury	Symbol
Pierścieniowa rdzeniowa	C
Ciecz płynie w postaci filmu otaczającego rdzeń gazowy, którego średnica jest porównywalna z grubością filmu cieczy.	
Pierścieniowa niezafalowana	S
Strukturę taką obserwowano na granicy pomiędzy jednofazowym sływem grawitacyjnym cieczy i przepływem dwufazowym gaz-ciecz. Ciecz przepływa w postaci cienkiego gładkiego filmu, natomiast gaz jest rozmieszczony wzdłuż osi rury i nie powoduje zafalowania filmu cieczy.	
Pierścieniowa falowa	W
Ciecz przepływa wzdłuż ścian rury, jako zafalowany film. Rdzeń gazu płynącego z dużą prędkością często porywa nieliczne krople cieczy.	
Pierścieniowa hydrauliczna	A
Ciecz przepływa w postaci zafalowanego filmu po ścianie rury. Film cieczy otacza rdzeń przepływającego z dużą prędkością gazu, który porywa krople cieczy.	
Pęcherzykowa	B
Faza gazowa jest rozproszona do postaci pojedynczych pęcherzy w cieczy. Pęcherzyki mają kształt sferyczny i przepływają wzdłuż osi rury jeden po drugim.	
Rzutowa	P
Ta struktura przepływu jest podobna do struktury pęcherzykowej, ale pęcherzyki gazu są znacznie większe.	
Stalaktytowa	St
Faza gazowa jest rozproszona do postaci pojedynczych pęcherzy gazu w cieczy. Dodatkowo, pojawia się przepływ cieczy (w formie cienkiego strumyka) wewnątrz pęcherza gazowego, wzdłuż jego osi symetrii.	
Pianowa	F
Faza gazowa i ciecz są wzajemnie wymieszane z powodu na wysoce turbulentny charakter powstałej mieszaniny.	

Z kolei Czernek [19] w swojej pracy doktorskiej zaobserwował podobne struktury przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka. Zaobserwowane przez autora formy przepływu zamieszczono w tabeli 3.10 Natomiast w tabeli 3.11 przedstawiono klasyfikację zdiagnozowanych struktur przepływu.

Tabela 3.10

Struktury opadającego przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka wg [19]

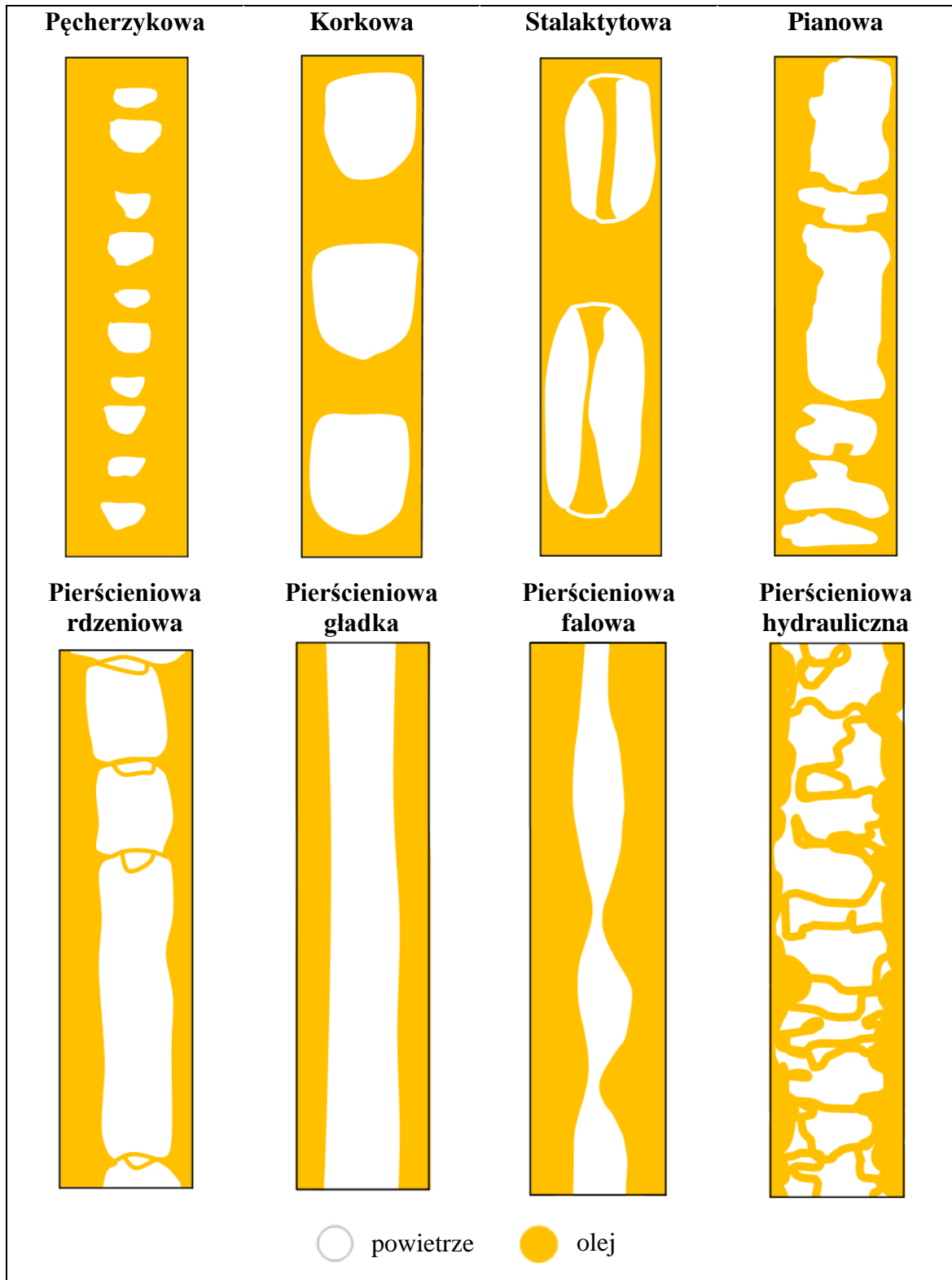


Tabela 3.11

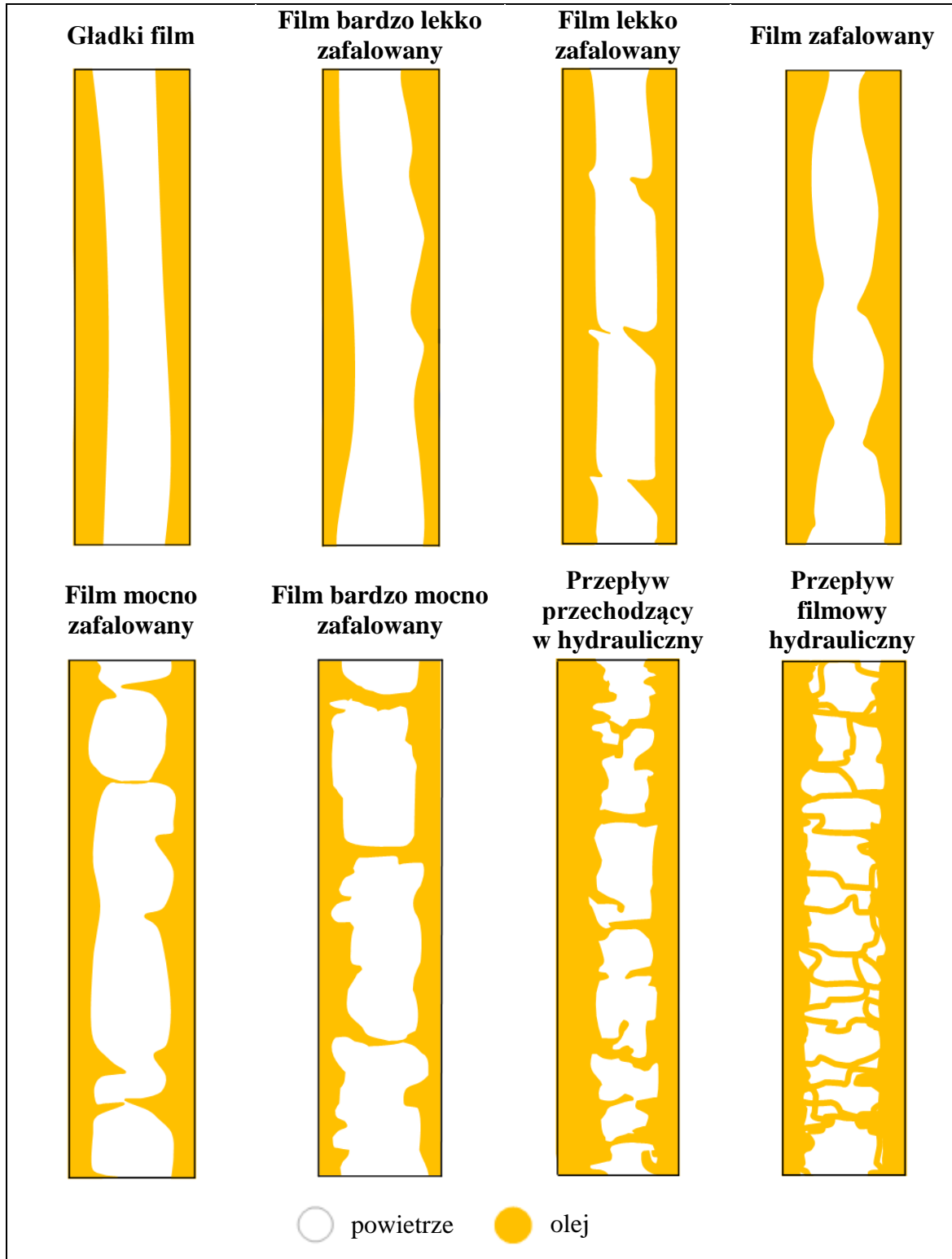
Charakterystyka struktur opadającego przepływu dwufazowego gaz-ciecz
bardzo lepka w rurze pionowej wg [19]

Nazwa struktury	Symbol
Pęcherzykowa	B
Faza gazowa jest rozproszona w ciągłej fazie ciekłej w postaci pęcherzyków gazowych o regularnych kształtach i wymiarach liniowych wyraźnie mniejszych od średnicy rury. Pęcherzyki mają zawsze kształt odcinka paraboloidy obrotowej i przemieszczają się pojedynczo wzdłuż osi rury.	
Korkowa	P
Faza gazowa występuje w ciągłej fazie ciekłej w postaci dużych pęcherzy (korków) o kształcie paraboli i długości porównywalnej ze średnicą kanału. W obrębie tylnej ściany korków występuje wyraźna deformacja powierzchni międzyfazowej przybierająca formę centralnie usytuowanej wypukłości zwróconej wierzchołkiem do wnętrza korka. Korki płyną pojedynczo wzdłuż osi rury.	
Stalaktytowa	St
Faza gazowa występuje w ciągłej fazie ciekłej w postaci dużych pęcherzy o toroidalnym kształcie i długości porównywalnej ze średnicą kanału lub wielokrotnie ją przewyższającą. Część cieczy w postaci cienkiej strugi przemieszcza się dodatkowo w obrębie gazowego torusa.	
Pianowa	F
Żadna z faz nie występuje w formie ciągłej. Powierzchnia międzyfazowa podlega silnym zmianom, co do wielkości oraz kształtu i nie można wyróżnić żadnych struktur uprzywilejowanych. Przepływowi towarzyszy intensywne mieszanie się faz wzdłuż promienia i osi rury.	
Pierścieniowa rdzeniowa	AR
Obydwie fazy występują w formie ciągłej. Gaz przemieszcza się w postaci cienkiego rdzenia wzdłuż osi rury. Ciecz płynie z dużą prędkością jako niezafalowany lub minimalnie zafalowany film o grubości porównywalnej ze średnicą gazowego rdzenia.	
Pierścieniowa niezafalowana	AL
Obydwie fazy występują w formie ciągłej. Ciecz płynie po ścianie z bardzo małą prędkością tworząc gładki film całkowicie pokrywający obwód rury.	
Pierścieniowa falowa	AW
Obydwie fazy występują w formie ciągłej. Ciecz płynie po ścianie w postaci zafalowanego filmu, a gaz przemieszcza się wzdłuż osi rury. Wraz ze wzrostem prędkości gazu zmienia się kształt i amplituda fal.	
Pierścieniowa hydrauliczna	AH
Obydwie fazy występują w formie ciągłej. Gaz koncentruje się w postaci ciągłego rdzenia wzdłuż osi rury. Ciecz płynie cienką warstwą całkowicie zwilżającą obwód rury. Powierzchnia międzyfazowa jest intensywnie zafalowana. Część cieczy przy bardzo dużych prędkościach gazu unoszona jest dodatkowo przez gaz w postaci drobnych kropelek.	

Autor pracy [19] dokonał także szczegółowego rozeznania i opisu struktur charakterystycznych tylko dla przepływu pierścieniowego. Poddane analizie struktury przepływu pierścieniowego przedstawiono w tabeli 3.12.

Tabela 3.12

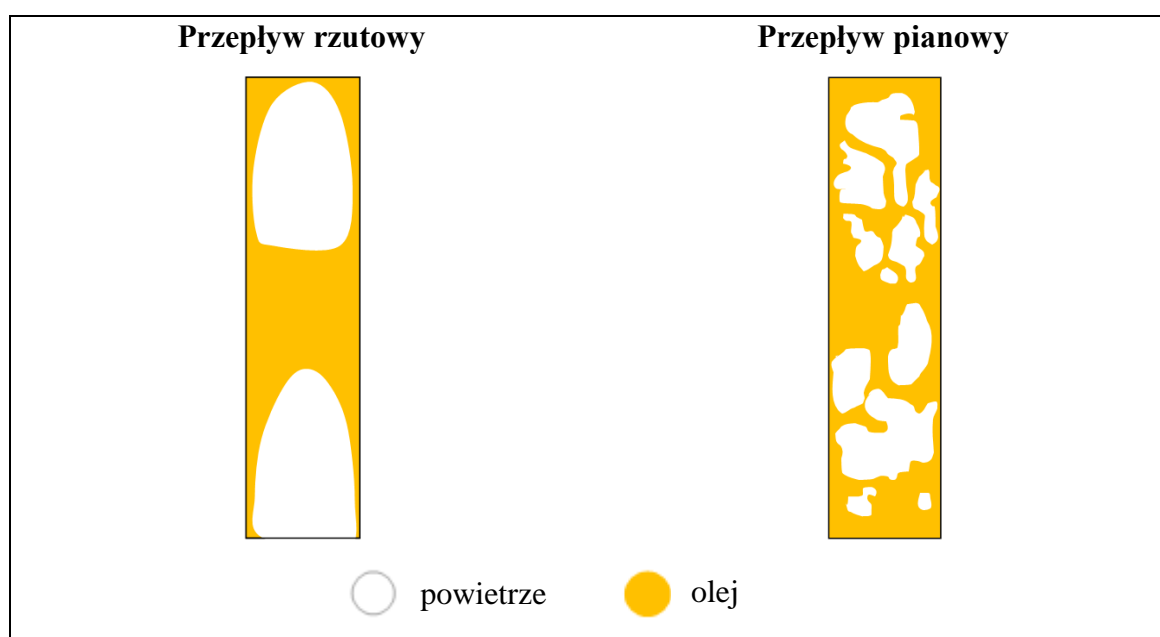
Struktury pierścieniowe współprądowego opadającego przepływu gaz-ciecz bardzo lepka wg [19]



Natomiast w pracy Schmid't'a i in. [60] zamieszczono tylko dwie struktury przepływu gazu i cieczy bardzo lepkiej przy wznoszącym przepływie dwufazowym gaz-ciecz bardzo lepka, które zawarto w tabeli 3.13. Autorzy pracy prowadzili badania mieszaniny azotu i roztworów polywinylypyrrolidone (Luviskol) w wodzie o lepkości (0,001 – 7)Pa·s w rurze o średnicy wewnętrznej 54,5mm. W celu zapobieżenia pienieniu się mieszaniny do cieczy dodawano środek Afranil T, który znacznie redukuje napięcie powierzchniowe (z 66 do 36)mN/m.

Tabela 3.13

Struktury wznoszącego przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka wg [60]



3.3.3. Przepływ trójfazowy gaz-ciecz-ciecz

Z powodu braku w literaturze publikacji na temat struktur przepływu przy opadającym przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz dla rozpoznania problematyki przepływu wielofazowego, zamieszczono w niniejszej pracy struktury przy wznoszącym przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz.

Zachowanie się przepływu trójfazowego typu olej-gaz-woda w szerokim zakresie warunków przepływowych stanowi interdyscyplinarny problem w odniesieniu do przemysłu. Zrozumienie dynamiki struktur przepływu jest kwestią kluczową. Z powodu wzajemnego oddziaływania pomiędzy wieloma złożonymi czynnikami takimi jak: turbulencje cieczy, interakcje międzyfazowe czy niestabilności struktur przepływu.

Pomimo prowadzonych badań nad przepływem trójfazowym, nadal istnieją znaczące wyzwania w badaniach nad takimi przepływami, szczególnie w odniesieniu do opadającego przepływu trójfazowego w rurach pionowych. Z powodu złożoności i nieliniowości zagadnienia nadal istnieją ograniczenia w poznaniu dynamiki takich przepływów.

Wang i in. [43] oraz Gao i Jin [38] w ich pracach badali pionowy wznoszący przepływ trójfazowy oleju, gazu i wody. W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowali i zdefiniowali 6 [43] oraz 4 [38] różne struktury przepływu trójfazowego, których schematy przedstawiono w tabeli 3.14. Wyodrębnione przez autorów struktury to: przepływ pęcherzykowy oleju w wodzie, pęcherzykowo-rzutowy przepływ oleju w wodzie, przepływ rzutowy oleju w wodzie, przepływ pęcherzykowo-rzutowy emulsji, przepływ rzutowy emulsji i przepływ rzutowy wody w oleju.

W pracy Bannawart'a i in. [61] mierzono spadki ciśnienia i obserwowano struktury przepływu trójfazowego w szklanych rurach w usytuowaniu poziomym o średnicy wewnętrznej 28,4 mm i pionowym o średnicy wewnętrznej 28,4 mm i 3 razy mniejszej (10 mm). W przypadku rury pionowej prowadzono badania wznoszącego przepływu trójfazowego. Badano mieszaninę trójfazową typu ropa naftowa-woda-powietrze. Badania prowadzono pod kątem wydajności i zastosowania wody do transportu ciężkich olejów w rzeczywistych rurociągach. Tabele 3.15 i 3.16 zawierają schematy struktur przepływu otrzymane przez autorów, natomiast w tabeli 3.17 zamieszczono charakterystykę ww. schematów struktur przepływu trójfazowego.

Struktury przepływu w rurze o średnicy wewnętrznej 10 mm były identyczne jak te zaobserwowane w rurze o średnicy wewnętrznej 28,4 mm. Podczas badań stwierdzono, że przepływ fazy wodnej ma niewielki wpływ na tworzące się struktury przepływu w porównaniu do fazy olejowej i gazowej. Dlatego też struktury przepływu mogą być rozsądnie opisane tylko przy wykorzystaniu przepływu faz olej-powietrze [61].

Tabela 3.14

Struktury wznoszącego przepływu trójfazowego olej-gaz-woda wg [43]

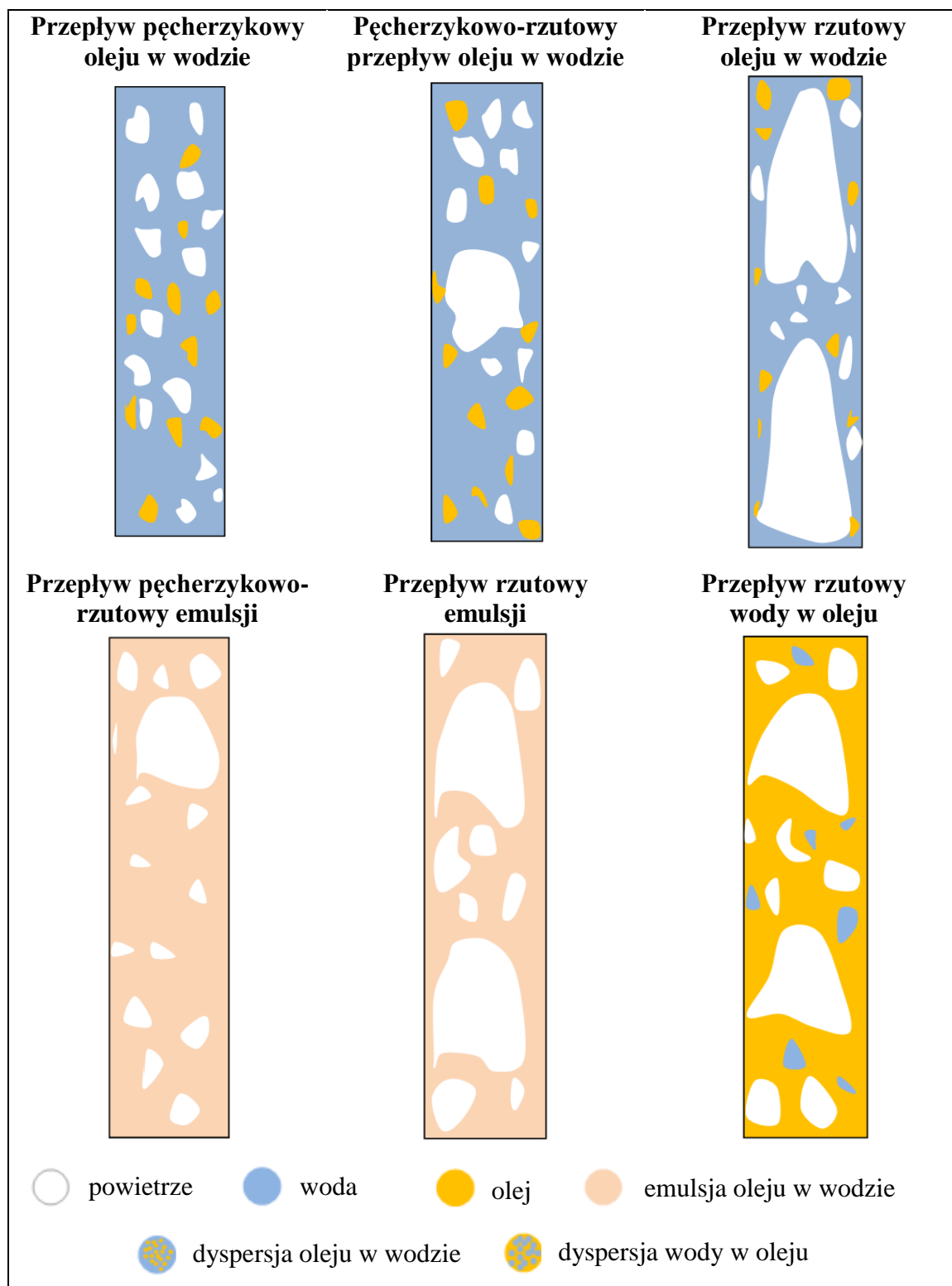


Tabela 3.15

Struktury wznoszącego przepływu trójfazowego powietrze-woda-ropa naftowa wg [61]

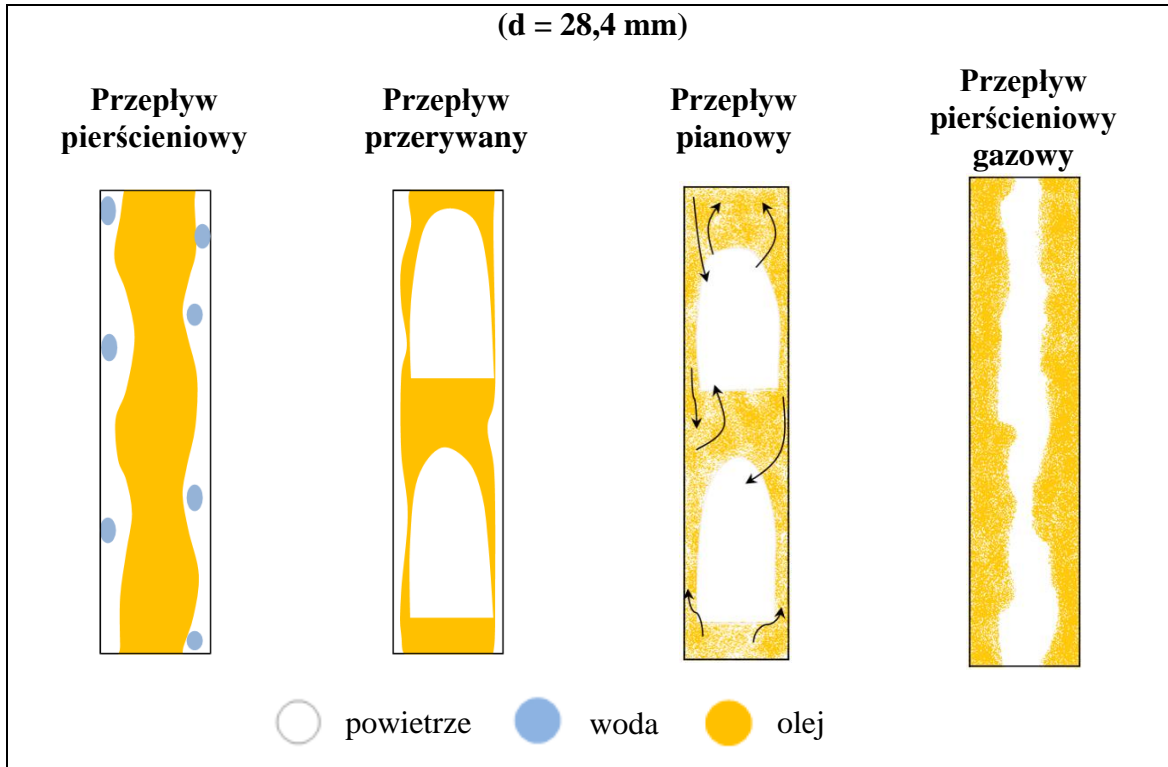


Tabela 3.16

Struktury wznoszącego przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz wg [61]

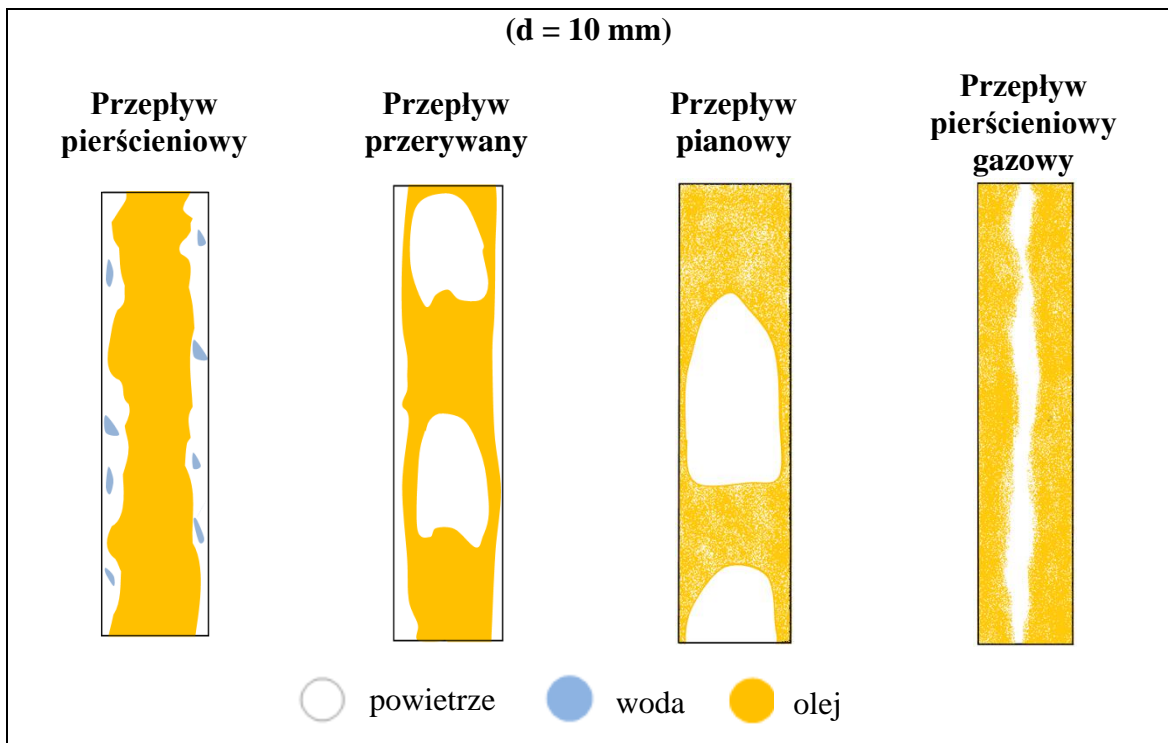


Tabela 3.17

Klasyfikacja struktur przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz w rurze pionowej
wg [61]

Nazwa struktury	Symbol
Pierścieniowa	A
Struktura pierścieniowa z rdzeniem oleju i pęcherzykami gazu. Olej jest fazą ciągłą w rdzeniu rury otoczony wodą. Zdyspergowane pęcherzyki gazu przepływają w wodnym pierścieniu. Strukturę taką obserwowano przy wysokich strumieniach oleju i niskich prędkościach przepływającego gazu.	
Przerywana	I
Pęcherzyki gazu są oddzielone przez rzuty oleju. Cienka warstwa cieczy przylega do ścianki rury. Strukturę taką obserwowano przy wysokich prędkościach przepływu oleju i niskich prędkościach przepływu gazu.	
Pianowa	C
Utrudnione zdefiniowanie geometrii przepływu. Przepływ wykazuje zachowanie pulsacyjne. Duże pęcherzyki gazu są transportowane ku górze, podczas gdy olej i woda mogą stanowić przepływ wznoszący lub opadający, głównie blisko ściany rury. Strukturę taką obserwowano przy wysokich prędkościach przepływu oleju i gazu.	
Pierścieniowa gazowa	Ag
Struktura pierścieniowa z rdzeniem gazowym. Struktura ta przypomina przepływ pierścieniowy typu gaz-ciecz. Jednakże na ścianie rury wykryto dyspersję małych pęcherzyków oleju w wodzie. Strukturę taką obserwowano przy niskich prędkościach przepływu oleju i wysokich prędkościach przepływu gazu.	

Pomimo dużego postępu dokonanego w obszarze charakterystyki pionowego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz, również w odniesieniu do przepływu opadającego opisanie struktur, śledzenie granic przejścia struktur przepływu czy punktu inwersji faz pozostają nadal trudne zwłaszcza w przypadku rur o małych średnicach. Utrudnienia te wynikają między innymi ze złożoności czynników takich jak burzliwość płynu czy interakcje międzyfazowe cieczy [57]. W przytoczonej literaturze odnaleziono zaledwie kilka publikacji dotyczących struktur przepływu przy opadającym przepływie dwufazowym typu ciecz-ciecz w rurach pionowych, dlatego zagadnienie to wymaga dalszych badań. Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że również w przypadku przepływu dwufazowego gazu i cieczy bardzo lekko obserwowane struktury przepływu są porównywalne z różnymi opracowaniami literaturowymi, jednakże istnieją niewielkie rozbieżności w definiowaniu poszczególnych form przepływu. Jednocześnie dotychczas można już znaleźć wiele publikacji na temat takiego rodzaju przepływu. Natomiast w odniesieniu do wznoszącego przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz istnieją niejednoznaczności co do klasyfikacji obserwowanych struktur przepływu, co prawdopodobnie wynika w dużej mierze z indywidualnego podejścia do

obserwacji wizualnych. Nawiązując do tematu niniejszej pracy nie odnaleziono w dotychczas opublikowanych pozycjach literaturowych opracowań dotyczących obserwacji struktur przy opadającym przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz, co wskazuje na potrzebę prowadzenia takich badań, które zostały podjęte przy realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej.

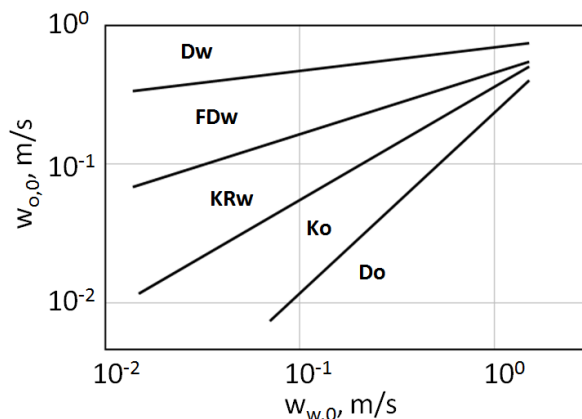
3.4. Mapy przepływu

Obszary pojawiania się określonych struktur przepływu zarówno dwu- jak i trójfazowego są prezentowane na wykresach, które są mapami przepływu. Mapa przepływu może być przedstawiona w zróżnicowanych układach współrzędnych. Na każdej z map nanoszone są linie graniczne, które oddzielają zakresy występowania poszczególnych form przepływu. Linie graniczne stanowią ograniczoną strefę mapy ponieważ, przy przepływach naturalnych nie występują ścisłe granice przejść pomiędzy określonymi strukturami przepływu [42].

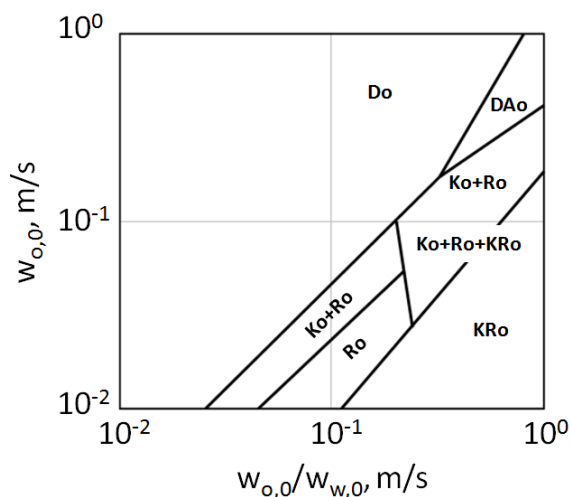
3.4.1. Mapy przepływu dwufazowego ciecz-ciecz

W odróżnieniu od przepływu mieszanin gaz-ciecz, dla których opublikowano znaczne ilości map przepływu, to w odniesieniu do przepływu ciecz-ciecz zaproponowano ich zaledwie kilkanaście. Najstarszą opracowaną mapę przepływu dla wznoszącego przepływu mieszaniny ciecz-ciecz w rurze pionowej opublikowano w pracy [62], którą przedstawiono na rys. 3.3. Zaproponowana w pracy [62] mapa odnosi się do przepływu mieszaniny olej-woda.

Natomiast do map przepływu, opublikowanych od 2000 roku zaliczyć można mapę przepływu dwufazowego ciecz-ciecz w rurach pionowych zaproponowaną przez autorów pracy [47], którą przedstawiono na rys. 3.4. Mapa ta dotyczy współprądowego przepływu obu faz dla gęstości oleju wyższej od gęstości wody.



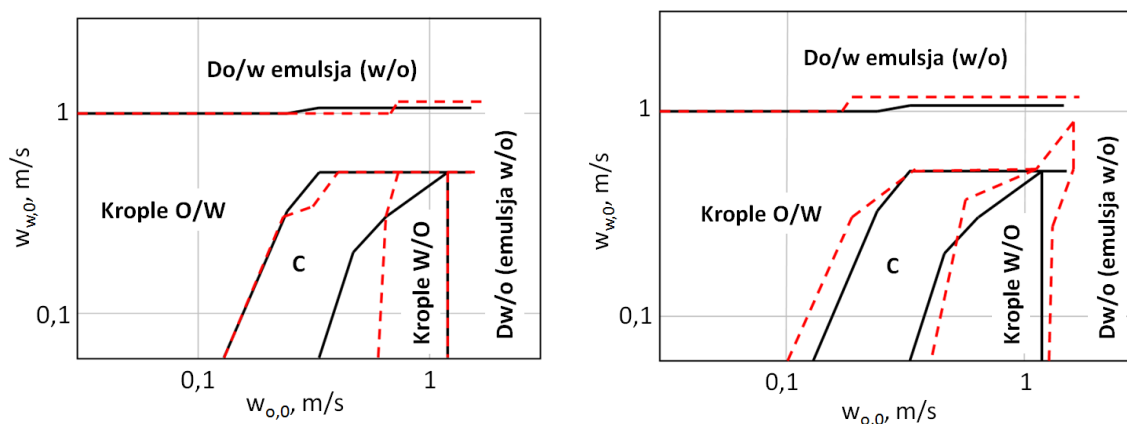
Rys. 3.3. Mapa przepływu mieszaniny ciecz-ciecz wg [62], struktury przepływu: Dw – przepływ dyspersyjny wody, FDw – przepływ filmowo-dyspersyjny wody, KRw – przepływ kropłowo-rzutowy wody, Ko – przepływ kropelkowy oleju, Do – przepływ dyspersyjny oleju



Rys. 3.4. Mapa przepływu dwufazowego ciecz-ciecz w rurach pionowych wg [47], struktury przepływu: Ko – przepływ kropelkowy oleju, Ro – przepływ rozwarstwiony oleju, KRo – przepływ kropłowo-rzutowy oleju, DAo – przepływ dyspersyjno-pierścieniowy oleju, Do – przepływ dyspersyjny oleju w wodzie

Z kolei, na rys. 3.5 przedstawiono mapy dwufazowego przepływu ciecz-ciecz, zaprezentowane przez autorów pracy [56] i stanowiące adaptację mapy otrzymanej przez Flores'a, gdzie rys 3.5a przedstawia przypadek dla wznoszącego przepływu pionowego, a rys. 3.5b obrazuje opadający przepływ w pionie. Na mapach tych kolorem czarnym zaznaczono granice występowania określonych struktur przepływu opisanych przez autora pracy [63], a kolorem czerwonym i linią kreskowaną zaznaczono, w celu porównania granice pojawiania się struktur przepływu zaobserwowanych przez autorów

pracy [56]. Z przedstawionych map widać, że obszar przepływu z dominującą fazą wodną jest większy niż obszar z olejem, jako fazą dominującą w przepływie. Mapa Flores'a [63] zaadaptowana do badań Xu i in. [56] w zadawalający sposób je opisuje dla przypadku przepływu wznoszącego w rurze o średnicy 50 mm. Przy małych prędkościach pozornych oleju i wody występował przepływ kropel oleju w wodzie, w którym olej stanowił dyspersję w wodzie w postaci relatywnie dużych kropeł. Wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody następowało przejście przepływu z emulsji typu O/W w emulsję typu W/O. Z porównania obu map z mapą otrzymaną przez Flores'a wynika, że na struktury przepływu ma wpływ kierunek przepływu (przy takich samych wartościach prędkości pozornych faz). Zasadnicza różnica natomiast występuje w obszarze przejścia z przepływu z dominującą fazą wodną do przepływu z dominującą fazą olejową, który zachodzi przy niższych wartościach prędkości pozornych oleju dla przepływu opadającego niż dla przepływu wznoszącego. Struktura, w której olej stanowi fazę ciągłą w przepływie kształtuje się łatwiej w przepływie opadającym niż wznoszącym. Powodem tych rozbieżności może być prędkość poślizgu, która jest wyższa w przypadku przepływu opadającego w tych samych warunkach procesowych.



a) pionowy przepływ wznoszący

b) pionowy przepływ opadający

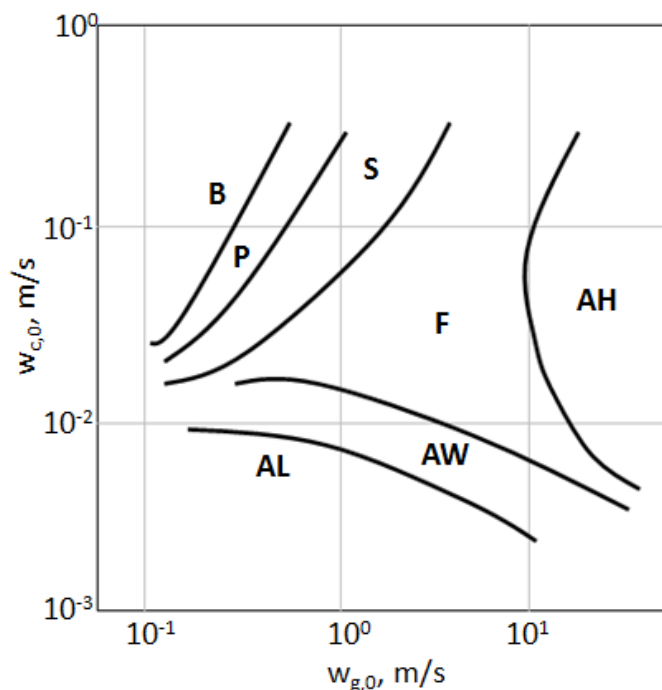
Rys. 3.5. Mapa przepływu Flores'a naniesiona na punkty doświadczalne autorów pracy [56], warunki eksperymentalne Flores'a: $\rho_o/\rho_w=0,85$, $d=50,8\text{mm}$, gdzie C-oznacza przepływ przejściowy

3.4.2. Mapy przepływu dwufazowego gaz-ciecz

W literaturze przedmiotu można odnaleźć wiele prac opisujących mapy przepływów dwufazowych, zarówno przy przepływie wznoszącym jak i opadającym. Niemniej jednak opracowania dotyczące map z uwzględnieniem cieczy bardzo lepkich

są opisane w ograniczonym zakresie. Ze względu na tematykę podjętej pracy przedstawiono mapy przepływu cytowane w literaturze a słuszne dla przepływów dwufazowych przy przepływie opadającym gaz-ciecz lepka oraz w dalszej części przedstawiono mapy przepływu odpowiednie dla przepływów trójfazowych, ale przy przepływie wznoszącym, ponieważ dla przepływów opadających w rurach pionowych nie odnaleziono żadnych opracowań.

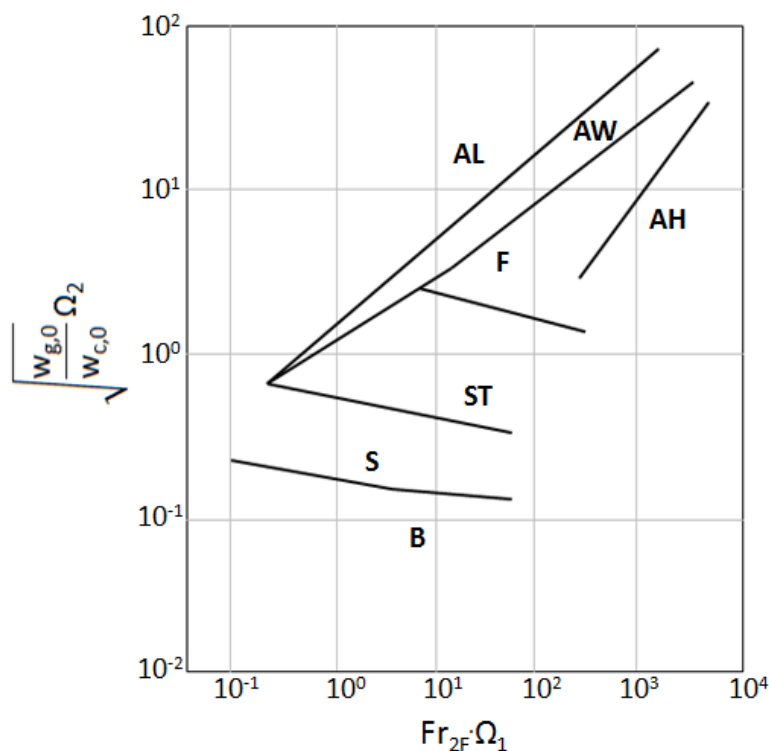
Spisak w pracy [64] przedstawił obszary występowania konkretnych form przepływu w rurze o średnicy 15mm na mapie, którą przedstawiono na rys. 3.6. Autor tej pracy badał ciecze o dużej lepkości przy opadającym przepływie dwufazowym gaz-ciecz bardzo lepka. Przedstawiona mapa zawiera obszary dla badanej cieczy o lepkości 1,73 Pa·s.



Rys. 3.6. Obszary występowania poszczególnych form przepływu przy przepływie w dół dla układu powietrze-olej mineralny, wg [64], struktury przepływu:

B – pęcherzykowy, P – korkowy, S – stalaktytowy, F – pianowy,
 AH – pierścieniowy hydrauliczny, AW – pierścieniowy rdzeniowy i falowy,
 AL – pierścieniowy niezafalowany

Troniewski i Spisak w pracy [5] i [64] zaproponowali mapę przepływu dwufazowego opadającego z wykorzystaniem cieczy o wysokich lepkościach rzędu (0,18 – 7,5) Pa·s [42]. Rys. 3.7. przedstawia otrzymaną w wyniku badań mapę przepływu.



Rys. 3.7. Mapa opadającego przepływu mieszaniny dwufazowej gaz-ciecz bardzo lepka w rurach pionowych [5] i [64] wg [42], struktury przepływu: B – pęcherzykowa, S – rzutowa, ST – stalaktytowa, F – pianowa, AL – pierścieniowa niezafalowana, AW – pierścieniowa falowa, AH – pierścieniowa hydrauliczna

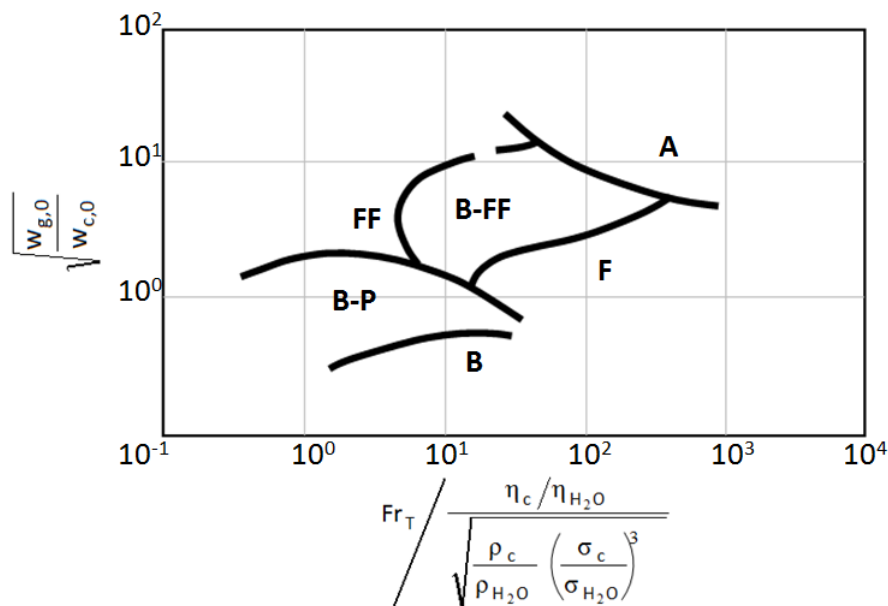
Przytoczona powyżej mapa uwzględnia wpływ lepkości cieczy w postaci parametrów Ω_1 i Ω_2 , gdzie

$$\Omega_1 = (\sigma_c / \sigma_{H_2O})^{0,375} \cdot (\rho_c / \rho_{H_2O})^{0,125} \cdot (\eta_c / \eta_{H_2O})^{0,46} \quad (3.18)$$

$\Omega_1 = \eta_c^{-0,65}$ dla granicy przejścia od przepływu stalaktytowego do pianowego;

$\Omega_2 = \eta_c^{-0,055}$ dla pozostałych granic.

Na rys. 3.8 przedstawiono mapę przepływu dwufazowego gaz-ciecz w rurach pionowych ku dołowi zaproponowaną w pracy [5] za Oshinowo i Charles'a [65]. Autorzy pracy [65] prowadzili badania przepływu typu powietrze – wodne roztwory gliceryny w rurze o średnicy 25,4 mm i lepkości cieczy do $\eta_c = 0,012$ Pa's

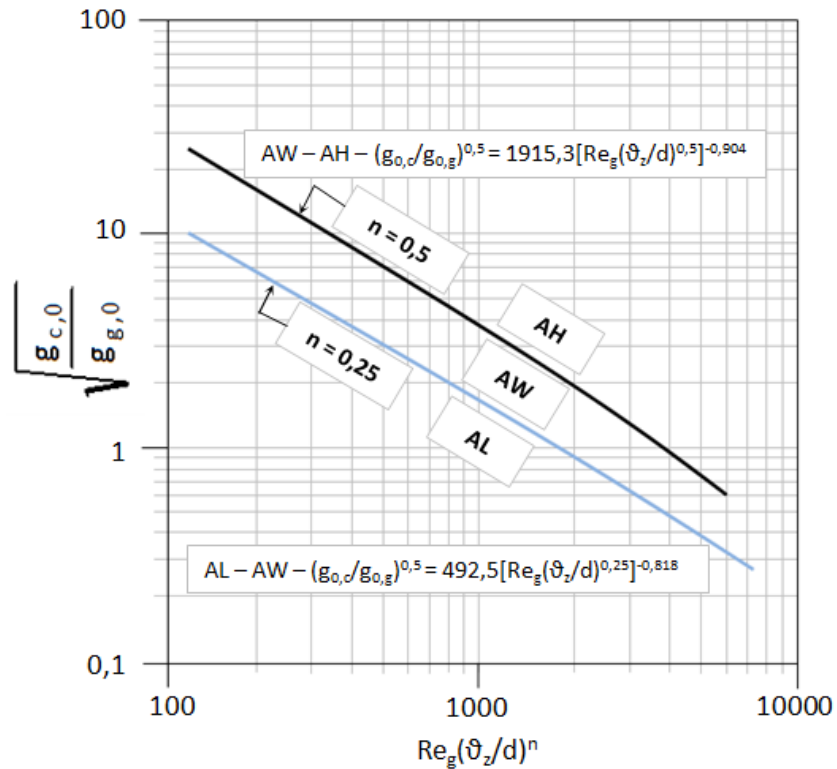


Rys. 3.8. Mapa przepływu dwufazowego gaz-ciecz w rurach pionowych ku dołowi, wg [65], struktury przepływu: B – pęcherzykowa, B-P – pęcherzykowo-korkowa, FF – spływający film, B-FF – pęcherzykowo-filmowa, A – pierścieniowa, F – pianowa

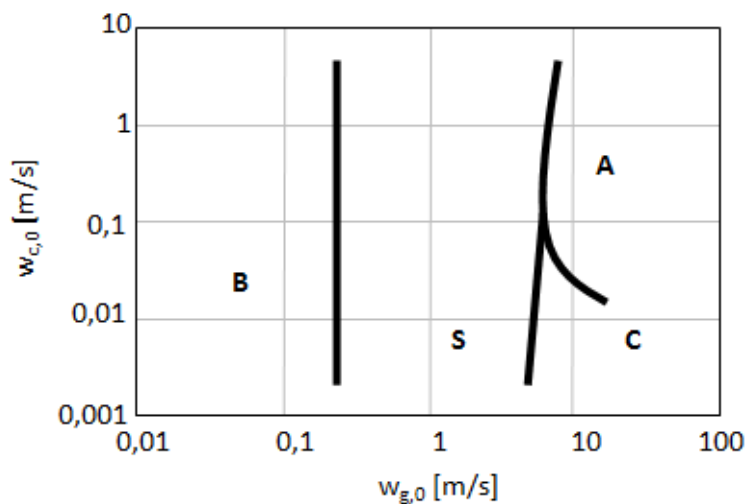
Z kolei Czernek w pracy [19] prowadził badania przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka w rurach pionowych o średnicy (12,5; 16 i 22) mm z udziałem cieczy o lepkości (0,09 – 1,52) Pa·s. Autor pracy [19] przedstawił mapy przepływu dla różnych średnic rur i lepkości cieczy oraz zaproponował uniwersalną mapę pierścieniowego opadającego w rurach pionowych przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka, co przedstawiono na rys. 3.9.

Przedstawiona przez autora pracy [19] mapa umożliwia przewidywanie określonej formy przepływu pierścieniowego i może być stosowana przy obliczeniach projektowych rurowych aparatów cienkowarstwowych.

Natomiast w pracy [60] przedstawiono mapę przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka ($\eta_c = (0,001 - 7)$ Pa·s, ale przy przepływie wznoszącym. Przedstawiona na rys. 3.10 mapa jest właściwa dla cieczy o lepkości η_c zbliżonej do 1,6 Pa·s



Rys. 3.9. Uniwersalna mapa pierścieniowego opadającego w rurach pionowych przepływu dwufazowego gaz – ciecz bardzo lepka wg [19], struktury przepływu: granica pomiędzy filmem gładkim i zafalowanym (granica przejścia AL – AW), granica pomiędzy przepływem zafalowanym i hydraulicznym (granica przejścia AW – AH)



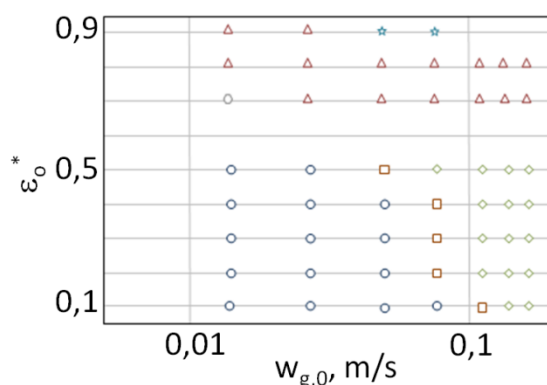
Rys. 3.10. Mapa dla wznoszącego w rurze pionowej przepływu dwufazowego gaz-ciecz bardzo lepka wg [60], struktury przepływu: B – pęcherzykowa, S – rzutowa, C – rdzeniowa, A – pierścieniowa

W porównaniu do dobrze znanej mapy przepływu powietrze-woda Taitel'a z 1980 roku (wg [60]) przejście do przepływu pierścieniowego jest zwykle przesunięte w kierunku niższych prędkości pozornych gazu. Podobne zachowanie przepływu zostało potwierdzone przez Taitel'a i in., którzy prowadzili badania gazu ziemnego i ropy naftowej. Zazwyczaj mikro-pęcherzyki występowały w zbiorniku z cieczą i były trudne do usunięcia bez ogrzewania. Jest więc prawdopodobne, że mikro-pęcherzyki występują także w warstwie przyściennej cieczy dla przepływu pierścieniowego.

3.4.3. Mapy przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz

W literaturze dostępnych jest niewiele publikacji dotyczących przepływu trójfazowego. W większości są to prace charakteryzujące przepływ w rurociągach poziomych [38, 66, 67, 68, 69]. Ze względu na brak opracowań na temat opadającego przepływu trójfazowego przytoczono wybrane pozycje literaturowe odnoszące się do wznoszącego przepływu trójfazowego w celu rozpoznania dostępnych map opracowanych dla takiego przepływu.

W pracach [43, 69], przedstawiono mapy dla wznoszącego przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz dla czterech różnych rodzajów przepływu mieszaniny olej-woda. Dla przykładu przedstawiono po jednej z zaproponowanych przez autorów prac [43, 69], struktur co przedstawiono na rys. 3.11 i 3.12.



Rys. 3.11. Mapa przepływu dla wznoszącego pionowego przepływu trójfazowego olej-gaz-woda w rurze o średnicy 125 mm. Całkowity przepływ cieczy wynosił $80\text{m}^3/\text{dobę}$ wg [43], struktury przepływu: \circ - przepływ pęcherzykowy oleju w wodzie, \square - przejściowy przepływ pęcherzykowo-rzutowy oleju w wodzie, \diamond - przepływ rzutowy oleju w wodzie, \ominus - przejściowy przepływ pęcherzykowo-rzutowy emulsji, \triangle - przepływ rzutowy emulsji, \star - przepływ rzutowy wody w oleju

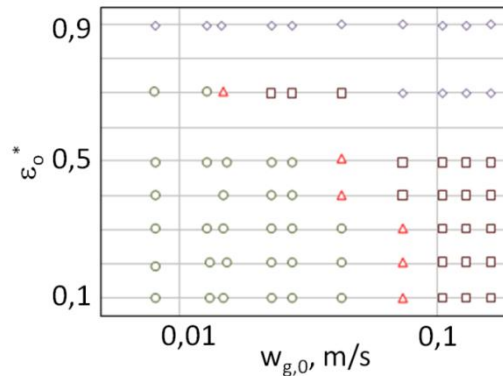
Przy niskich wartościach udziału (koncentracji) oleju, w stosunku do całkowitego strumienia mieszaniny cieczy ($\varepsilon_0^* < 0,7$) obserwowano głównie strukturę oleju w wodzie. Struktura pęcherzykowa przechodziła w korkową wraz ze wzrastającym strumieniem przepływu gazu, przy czym przepływ rzutowy pojawiał się przy niskich pozornych prędkościach gazu przy wzrastającym ε_0^* głównie z powodu wzrostu całkowitej lepkości cieczy przy wzroście przepływu oleju. Doprowadzenie fazy gazowej powodowało powstawanie emulsji wodno-olejowej. Z powodu zmiany warunków przepływu dwie niemieszające się ciecze przekształcały się w mieszaninę. Emulsja powstawała przy niskich pozornych prędkościach gazu i wzrastającym całkowitym przepływie cieczy.

Przy niskich wartościach udziału oleju inwersja faz w cieczy nie występowała nawet, przy $\varepsilon_0^* = 0,7$ [31, 34, 70], co mogło być spowodowane dużą średnicą rury i niskimi współczynnikami przepływu. Punkt inwersji cieczy zależał od prędkości przepływu mieszaniny woda-olej i pozornej prędkości przepływu gazu. Inwersja cieczy występowała przy $\varepsilon_0^* = 0,9$ wraz ze wzrostem całkowitego przepływu cieczy i przesuwała się do obszaru niskiego ε_0^* przy zmieszaniu z gazem. Główną przyczyną była dyspersja pęcherzyków powietrza w oleju i wodzie, która niszczyła koalescencję zdyspergowanych kropeł cieczy i wymagała wyższych koncentracji zdyspergowanej fazy, żeby pokonać i osłabić wpływ mieszania pęcherzyków w celu osiągnięcia nowej koalescencji pomiędzy olejem i wodą. Zatem punkt inwersji przesuwał się do obszaru wyższego udziału objętościowego wody w cieczy [71].

Poniżej, na rys. 3.12 przedstawiono przykładową mapę przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz wg [69].

Mapy te, zostały opracowane dla trójfazowego przepływu olej-gaz-woda przy pionowym przepływie wznoszącym w rurze o średnicy 125mm, przy wykorzystaniu parametrów $w_{g,0}$ i ε_0^* dla czterech różnych przepływów mieszaniny trójfazowej. W przypadku gdy $\varepsilon_0^* < 0,7$ dominującą strukturę przepływu typu ciecz-ciecz stanowił olej w wodzie, a pęcherzykowy przepływ gaz-ciecz przechodzi w przepływ rzutowy wraz ze wzrostem fazy gazowej. Zauważono także, że przepływ rzutowy oleju w wodzie pojawiał się przy niskich prędkościach pozornych gazu i wzrastającej ilości fazy oleju. Wysoka lepkość zastępcza mieszaniny cieczy wywołana przez wzrastający przepływ oleju (ε_0^*) powodowała występowanie przepływu rzutowego oleju w wodzie, przy niskich prędkościach pozornych gazu. Granica pojawiania się przepływu

rzutowego przesuwiała się do większych prędkości pozornych gazu wraz ze wzrostem przepływu mieszaniny cieczy. Gdy $\varepsilon_o^* \geq 0,7$ dominującą strukturą przepływu był przepływ rzutowy emulsji, gdzie następowało stabilne przejście struktur przepływu z oleju w wodzie na wodę w oleju [69].



Rys. 3.12. Mapa przepływu dla wznoszącego pionowego przepływu trójfazowego olej-gaz-woda w rurze o średnicy 125 mm. Całkowity przepływ cieczy wynosi $20\text{m}^3/\text{dobę}$ wg [69], struktury przepływu: \circ - przepływ pęcherzykowy oleju w wodzie, \triangle - przejściowy przepływ pęcherzykowo-rzutowy oleju w wodzie, \square - przepływ rzutowy oleju w wodzie, \diamond - przepływ rzutowy emulsji

Natomiast autorka pracy [9] w wyniku przeprowadzonych badań przedstawiła mapę wznoszącego przepływu trójfazowego gaz-ciecz pseudojednorodna, co przedstawiono na rys. 3.13.

Za pomocą tej mapy można określić rodzaj wznoszącego przepływu trójfazowego gaz-ciecz pseudojednorodna z dużą dokładnością (blisko 70% dla struktury pierścieniowej i prawie 100% dla struktury korkowej i pianowej).

Z kolei na rys. 3.14 przedstawiono ostateczną wersję mapy przepływu z zaznaczonymi zakresami występowania struktur trójfazowych dla układu ciecz-ciecz w kanale pionowym. Autorka pracy [9] opracowała także równanie (3.19) do określania granicznej koncentracji oleju w cieczy dwufazowej, przepływającej współprądowo z fazą gazową w rurach pionowych,

$$\varepsilon_{o,gr}^* = \frac{\varepsilon_{o,inw}^*}{1 + 8,2 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re}_g^{0,472}}, \quad (3.19)$$

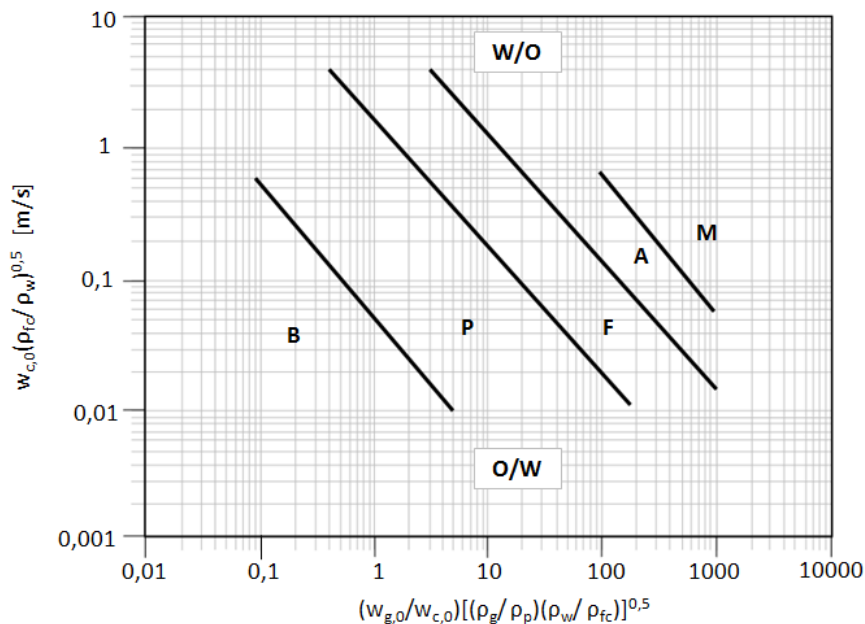
gdzie:

$$\varepsilon_{o,inw}^* = 0,5 + 0,1108 \log \frac{\eta_o}{\eta_w} \quad (3.20)$$

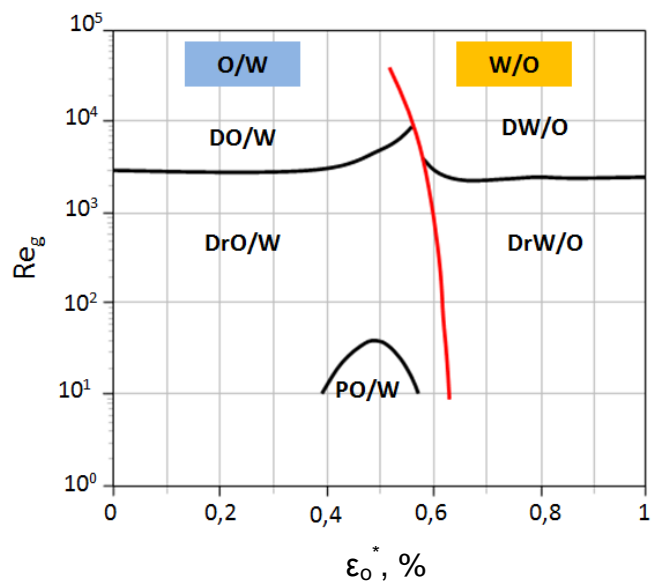
oraz

$$Re_g = \frac{w_{g,0} d \rho_g}{\eta_g} \quad (3.21)$$

dla którego wartości współczynnika korelacji $r = 0,912$, a średnia wartość odchylenia standardowego wynosi $0,186$.



Rys. 3.13. Mapa wznoszącego przepływu trójfazowego gaz-ciecz pseudojednorodna wg [9], struktury przepływu: B - pęcherzykowa, P - korkowa, F - pianowa, A - pierścieniowa, M – kropelkowa



Rys. 3.14. Zakresy występowania struktur dla układu ciecz-ciecz w przepływie trójfazowym w kanale pionowym na tle linii granicznych wg [9]. Struktury przepływu: DrO/W - krople oleju w wodzie, DO/W - dyspersja oleju w wodzie, PO/W - korki oleju w wodzie, DrW/O - krople wody w oleju, DW/O - dyspersja wody w oleju

Ze względu na bezwymiarowe współrzędne, mapy przedstawione na rys. 3.13 i 3.14 mają zastosowanie również dla innych niż zaprezentowane w pracy [9] przepływów trójfazowych.

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że zarówno przy przepływie dwufazowym jak i trójfazowym w kanałach pionowych pojawiają się zróżnicowane struktury przepływu. W przytoczonych pracach występuje podobne nazewnictwo określonych struktur przepływu zwłaszcza przy przepływie dwufazowym gaz-ciecz bardzo lepka. Natomiast przy przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz obserwuje się częściowo odmienne struktury i mapy przepływu. Zróżnicowania te mogą być wynikiem subiektywnej oceny tworzących się struktur przepływu oraz zróżnicowanych warunków w jakich przepływ się odbywa, a także różnych właściwości fizycznych poszczególnych faz.

3.5. Udziały objętościowe faz

Udział objętościowy faz jest jedną z podstawowych wielkości opisujących wielofazowy przepływ mieszaniny w rurach. Udział objętościowy faz definiowany jest jako udział objętościowy gazu w stosunku do całkowitej objętości wszystkich faz występujących w przepływie wielofazowym. Pomiar udziału objętościowego gazu powinien uwzględniać rozmieszczenia poszczególnych składników mieszaniny wewnątrz rurociągów [72].

3.5.1. Udziały objętościowe w przepływie dwufazowym ciecz-ciecz

Określenie udziału objętościowego faz w mieszaninie dwufazowej typu ciecz-ciecz nie jest tak powszechnie znane jak w przypadku dobrze już rozpoznanych przepływów z udziałem fazy gazowej. W związku z tym podejmowano próby zastosowania metod właściwych dla układów typu gaz-ciecz. Ogólnie, prace dotyczące udziałów objętościowych faz przy przepływie dwufazowym ciecz-ciecz można podzielić na prace oparte na modelu rozdzielonych faz i zmodyfikowanej postaci parametru Lockharta-Martinellogo oraz wykorzystujące model poślizgowy drift-flux [8].

Równania opisujące udziały objętościowe faz mieszaniny dwufazowej ciecz-ciecz w oparciu o zmodyfikowany parametr Lockharta-Martinellogo zawarto m.in. w pracach

[14, 73, 74] natomiast te, opierające się na modelu poślizgowym Zuber-Findlaya opisano m.in. w pracach [7, 44, 75, 76].

Autorzy pracy [51] sprawdzili zasadność korzystania z wybranych równań i do obliczania rzeczywistego udziału objętościowego fazy bardziej lepkiej (olej smołowy) zaproponowali modyfikację metody Stommy [78], której postać przedstawiono poniżej

$$R_o = \frac{\varepsilon_o - x_o}{2 \left[\ln \left(\frac{1 - x_o}{1 - \varepsilon_o} \right) - (\varepsilon_o - x_o) \right]}, \quad (3.22)$$

przy czym udział masowy oleju x_o oblicza się z równania

$$x_o = \frac{\rho_o \cdot w_{o,0}}{(\rho_o \cdot w_{o,0} + \rho_w \cdot w_{w,0})}. \quad (3.23)$$

Z kolei, autor pracy [7] podał uogólnione równania opisujące szeroki zakres przepływów dwufazowych ciecz-ciecz, które przedstawiono poniżej:

- dla układów O/W i W/O oraz $\rho_o \approx \rho_w$ i W+O

$$\frac{w_{o,0}}{R_o} = 1,095w_{c-c} \quad (3.24)$$

- dla układów O/W i W/O oraz $\rho_o/\rho_w \neq 1$

$$\frac{w_{fc,0}}{R_{fc}} = 1,004w_{c-c} + 0,0248 \quad (3.25)$$

przy czym równanie (3.25) opisuje udział fazy ciągłej w mieszaninie ciecz-ciecz, stąd należy określić, która ciecz tę fazę stanowi.

3.5.2. Udziały objętościowe w przepływie dwufazowym gaz-ciecz

W literaturze przedmiotu występuje deficyt publikacji dotyczących udziałów objętościowych faz dla cieczy o dynamicznym współczynniku lepkości przewyższającym 100 mPa·s. Dla zwiększenia bezpieczeństwa pracy urządzeń i systemów odprowadzających ciepło z rur, pierwszorzędne znaczenie ma modelowanie

przewidywania udziałów objętościowych faz. W przepływach dwufazowych gęstość mieszaniny oraz wartości spadków ciśnienia zależą w dużej mierze od udziałów objętościowych faz. Jednakże dotychczasowe modele przewidywania struktur przepływu i udziałów objętościowych były jedynie doświadczalnie potwierdzone dla przepływów cieczy o lepkościach do 0,055 Pa·s wg [77, 78, 79, 80, 81]. Odnaleźć można niewiele prac związanych z pomiarami udziałów objętościowych faz o wysokiej lepkości. Spisak i Idzik [82] mierzyli udziały objętościowe przy pionowym przepływie rzutowym mieszaniny powietrze-olej smarowy o dynamicznym współczynniku lepkości do 4,8 Pa·s, w rurze o średnicy 25 mm. Z kolei autorzy pracy [81] badali przepływ wody i roztworów gliceryny o lepkości do 0,055 Pa·s. Badano jedynie przepływ pierścieniowy.

Istniejące korelacje doświadczalne wymagają często znajomości wartości prędkości poślizgu i dynamicznej lepkości jako parametrów wejściowych [77, 83, 84, 85, 86]. Modele te są stosowane w ograniczonym zakresie przepływów dwufazowych z udziałem cieczy o lepkości poniżej 0,03 Pa·s.

Niemniej jednak autor pracy [87] (wg [88]) proponuje zależność (3.26) jako najbardziej zgodną z jego badaniami doświadczalnymi, w porównaniu z innymi opisywanymi w literaturze metodami. Zależność ta opiera się na modelu drift-flux opracowanym przez Zuber'a i Findlay'a [89] w szerokim zakresie lepkości cieczy.

$$R_{g,op} = \frac{\varepsilon_g \cdot R_g}{2,32 \cdot R_g - \varepsilon_g}, \quad (3.26)$$

gdzie:

$$R_g = 1 - \frac{\varepsilon_g^2 - x_g^2}{2 \left[\ln \left(\frac{1 - x_g}{1 - \varepsilon_g} \right) - (\varepsilon_g - x_g) \right]}, \quad (3.27)$$

w której

$$x_g = \frac{w_{g,0} \cdot \rho_g}{w_{g,0} \cdot \rho_g + w_{c,0} \cdot \rho_c} \quad (3.28)$$

oraz

$$\varepsilon_g = \frac{w_{g,0}}{w_{g,0} + w_{c,0}} \quad (3.29)$$

Z kolei Schmidt i in. w pracy [60] badali udziały objętościowe i struktury przepływu przy współprądowym pionowym przepływie wznoszącym mieszaniny gazu

i cieczy o lepkościach do 7 Pa·s. Udziały objętościowe wyznaczano przy pomocy densytometrii i promieni gamma. Autorzy pracy [60] porównali wyniki badań udziałów objętościowych faz z kilkoma modelami opracowanymi m. in. przez autorów prac [83, 84, 77, 85, 86]. W wyniku porównania wywnioskowali, że model Lockharta-Martinelliego [83] zapewniał najmniejsze rozbieżności w porównaniu z wartościami zmierzonymi udziałów objętościowych. Z kolei Premoli i in. [84] próbowali zaadaptować własne równania obliczania udziałów objętościowych faz do eksperymentów z cieczami o umiarkowanej lepkości, jednak okazały się one nieodpowiednie do wykorzystania przy cieczach o tych lepkościach. Zbyt duże wartości udziałów objętościowych obliczono także za pomocą równania Claxton'a i in. [86]. Model ten również był nieodpowiedni przy wysokich lepkościach cieczy. Dodatkowo, obliczone wartości udziałów objętościowych dla wody były w większości przypadków zbyt niskie. Podsumowując, autorzy pracy [60] stwierdzili, że żadna z zastosowanych korelacji dostępnych w literaturze nie była odpowiednia dla zmierzonych wartości udziałów objętościowych faz dla cieczy o lepkościach rzędu (1÷7) Pa·s. Dlatego, w pracy [60] wyprowadzono dwie nowe metody określania wartości udziałów objętościowych faz dla cieczy bardzo lepkich.

Pierwsza z zaproponowanych metod do określania wartości udziałów objętościowych faz opierała się na modelu drift-flux opisanym przez Zuber'a i Findlay'a [89]. Jako alternatywę modelu drift-flux podano poślizg międzyfazowy, który może być wykorzystywany przy obliczaniu udziałów objętościowych. Oba modele, zarówno drift-flux jak i model poślizgowy były przywoływane w literaturze do korelacji doświadczalnych spadków ciśnienia i udziałów objętościowych.

Z kolei w pracy [72] wyznaczano udział objętościowy faz przy pierścieniowym i rozwarstwionym przepływie dwufazowym gaz-olej.

3.5.3. Udziały objętościowe faz w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz

Autorka pracy [9] w wyniku przeprowadzonych badań własnych proponuje wartość udziałów objętościowych poszczególnych faz obliczać z następujących zależności opracowanych w oparciu o model drift-flux we wznoszącym przepływie trójfazowym powietrze-woda-olej:

- 1) udział objętościowy gazu (powietrza)

$$R_g = \frac{w_{g,0}}{\left[1 + 0,481(1 - \varepsilon_g)^{0,172}\right] w_{3F} + w_{g-3F}} \quad (3.30)$$

gdzie prędkość dryftu w_{g-3F} dla przepływu z dominującą fazą wodną tj. dla $\varepsilon_o^* < \varepsilon_{o,gr}^*$ określona jest następującym równaniem

$$w_{g-3F} = 1,41 \left(\frac{\check{g}\sigma_w(\rho_w - \rho_g)}{\rho_w^2} \right)^{0,25} (1 - \varepsilon_g)^3 \quad (3.31)$$

z kolei dla $\varepsilon_o^* \geq \varepsilon_{o,gr}^*$, czyli przepływu z dominującą fazą olejową ma następującą postać

$$w_{g-3F} = 1,41 \left(\frac{\check{g}\sigma_o(\rho_o - \rho_g)}{\rho_o^2} \right)^{0,25} (1 - \varepsilon_g)^3 \quad (3.32)$$

2) udział objętościowy cieczy o mniejszej lepkości (woda)

$$R_w = \frac{w_{w,0}(1 - R_g)}{\left[1 + 0,175(1 - \varepsilon_w^*)^{0,151}\right] w_{c,0} - w_{w-c}} \quad (3.33)$$

gdzie prędkość dryftu w_{w-c} wody w ciekłej mieszaninie wodno-olejowej oblicza się z zależności

$$w_{g-3F} = 1,41 \left(\frac{\check{g}\sigma_{w-o}\Delta\rho_{w-o}}{\rho_w^2} \right)^{0,25} (1 - \varepsilon_w^*)^3 \quad (3.34)$$

gdzie wartość napięcia powierzchniowego na granicy faz ciekłych wynosi

$$\sigma_{w-o} = \sigma_w - \sigma_o \quad (3.35)$$

natomiast

$$\Delta\rho_{w-o} = \rho_w - \rho_o \quad (3.36)$$

udział objętościowy cieczy o większej lepkości (olej) oblicza się jako uzupełnienie do jedności

$$R_o = 1 - R_g - R_w \quad (3.37)$$

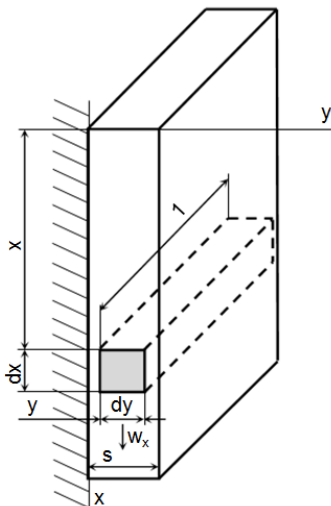
Z przeprowadzonego przeglądu literatury można wywnioskować, że określenie wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz, zarówno przy przepływie dwufazowym jak i trójfazowym dążyły w większości do zastosowania modelu drift-flux. W przytoczonych opracowaniach podane zależności mają zastosowanie dla określonych warunków przepływu np. przy przepływie pierścieniowym czy rozwarstwionym [72].

3.6. Grubość filmów cieczy

Grubość filmu cieczy decyduje o prędkości i udziałach objętościowych faz, a także warunkuje wielkość powierzchni międzyfazowej i stopień zafalowania filmu cieczy [5]. W różnych urządzeniach warstewki filmów cieczy przepływają we wnętrzu rur, po ściankach urządzeń lub po elementach wypełnienia w takich urządzeniach jak kolumny z wypełnieniem, wieże chłodnicze czy chłodnice filmów cieczy.

3.6.1. Grubość filmów cieczy dla spływu grawitacyjnego

Najprostszym przypadkiem przepływu jest laminarny spływ filmu cieczy po ścianie pionowej. Charakteryzuje się on przepływem gładkiego filmu cieczy, o grubości s , którego charakter przepływu uwarunkowany jest właściwościami cieczy. Przedstawiony na rys. 3.15 schemat takiego spływu pozwala na jego modelowanie.



Rys. 3.15. Schemat dla modelowania spływu grawitacyjnej cieczy po ścianie wg [90]

Przy modelowaniu spływu laminarnej cieczy zakłada się stan równowagi pomiędzy siłami ciężkości a siłami tarcia w cieczy, w elemencie cieczy spływającej grawitacyjnie o bokach dx , dy , 1 (rys. 3.15). Wtedy

$$dV = dx \cdot dy \cdot 1. \quad (3.38)$$

Siła ciężkości jest proporcjonalna do przyspieszenia, które wywołuje i wynosi

$$F = m \cdot a = m_c \cdot \check{g}. \quad (3.39)$$

Uwzględniając wzór na gęstość bezwzględna

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho \cdot V \quad (3.40)$$

i podstawiając do równania (3.39) otrzymano

$$F = \rho \cdot V \cdot \check{g}. \quad (3.41)$$

Zastępując $F = S_1$ to pochodna

$$dS_1 = \rho \cdot dV \cdot \check{g}, \quad (3.42)$$

gdzie

$$dV = dx \cdot dy \cdot 1, \quad (3.43)$$

czyli

$$dS_1 = dx \cdot dy \cdot 1 \cdot \rho \cdot \check{g}. \quad (3.44)$$

Siła tarcia ogólnie

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta V}{\Delta h} = F_t = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta V}{\Delta h} \quad (3.45)$$

podstawiając oznaczenia: $F_t = S_2$; $S = F$; $dV = dw_x$; $dh = dy$,

pochodna po czasie τ wynosi

$$dS_2 = \eta \cdot \frac{dw_x}{dy} \cdot dx \cdot 1 \cdot dy \quad (3.46)$$

bo $dF = dx \cdot 1$.

Po zróżniczkowaniu równania (3.46) względem y , wypadkowa siły tarcia działająca na element ciecży wynosi

$$dS_2 = \eta \cdot \frac{d^2w_x}{dy^2} \cdot dx \cdot dy \cdot 1. \quad (3.47)$$

Równowaga zachodzi, gdy

$$dS_1 + dS_2 = 0 \rightarrow dS_1 = -dS_2, \quad (3.48)$$

czyli:

$$dx \cdot dy \cdot 1 \cdot \rho \cdot \check{g} = -\eta \cdot \frac{d^2w_x}{dy^2} \cdot dx \cdot dy \cdot 1 \quad (3.49)$$

$$-\frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} = \frac{d^2w_x}{dy^2}. \quad (3.50)$$

Równanie (3.50) całkujemy dwukrotnie:

$$\frac{dw_x}{dy} = -\int \frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot dy = -\frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot y + C \quad (3.51)$$

$$w_x = -\frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot \frac{y^2}{2} + C \cdot y + D. \quad (3.52)$$

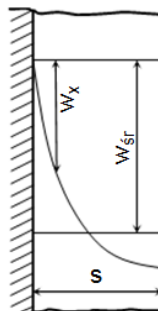
Przyjmuje się następujące warunki brzegowe: dla $y = 0$; $w_x = 0$.

Przy ścianie, gdzie $y=0$, prędkość również zanika, co jest zgodne ze wszystkimi dotychczasowymi założeniami dotyczącymi warstwy przyściennej. Dlatego $D = 0$.

Drugim warunkiem jest dla $y = s$ oraz

$$\frac{dw_x}{dy} = 0. \quad (3.53)$$

Rozkład prędkości przedstawiono na rys. 3.16.



Rys. 3.16. Rozkład prędkości w warstwie spływającej po ścianie wg [90]

Wtedy, z równania (3.51)

$$C = \frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot s \quad (3.54)$$

i ostatecznie

$$w_x = -\frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot \frac{y^2}{2} + \frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot sy. \quad (3.55)$$

Wyznaczenie prędkości średniej

$$\int_{y=0}^{y=s} w_x \cdot dy = w_{\check{s}r} \cdot s. \quad (3.56)$$

Z równania (3.55) wyznaczono wspólny czynnik przed nawias

$$\int_{y=0}^{y=s} \frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot \left(sy - 1 \cdot \frac{y^2}{2} \right) dy = \frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot \left(\frac{s^3}{2} - \frac{s^3}{6} \right) = w_{\check{s}r} \cdot s. \quad (3.57)$$

Po doprowadzeniu do wspólnego mianownika i uporządkowaniu równania

$$w_{\check{s}r} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot s^2. \quad (3.58)$$

Ponieważ strumień masy cieczy wynosi

$$G_c = w_{\check{s}r} \cdot f \cdot \rho, \quad (3.59)$$

gdzie

$$f = s \cdot 1. \quad (3.60)$$

Podstawiając do równania (3.59) otrzymano

$$G_c = w_{\check{s}r} \cdot s \cdot 1 \cdot \rho, \quad (3.61)$$

stąd

$$w_{\check{s}r} = \frac{G_c}{s \cdot 1 \cdot \rho} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\rho \cdot \check{g}}{\eta} \cdot s^2, \quad (3.62)$$

lub przestawiając i uporządkowując

$$s^3 = \frac{G_c}{1 \cdot \rho} \cdot \frac{3\eta}{\rho \cdot \check{g}} = \frac{G_c}{\eta \cdot 1 \cdot \rho} \cdot 3 \cdot \frac{\eta^2}{\rho \cdot \check{g}} = 3 \cdot \frac{G_c}{1 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{\eta^2}{\rho^2 \cdot \check{g}} \right) \quad (3.63)$$

oraz wstawiając zależność

$$\frac{G_c}{1} = \Gamma, \quad \frac{\text{kg}}{(\text{m} \cdot \text{s})}, \quad (3.64)$$

czyli jednostkowe natężenie zraszania i podstawiając do równania (3.63) otrzymano

$$s^3 = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{4\Gamma}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{\eta^2}{\rho^2 \cdot \bar{g}}\right), \quad (3.65)$$

stąd

$$s = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot Re_z^{1/3} \cdot \vartheta_z}. \quad (3.66)$$

Używając symboli

$$Re_z = \left(\frac{4\Gamma}{\eta}\right) \quad (3.67)$$

czyli liczby Reynoldsa dla sływu grawitacyjnego oraz

$$\vartheta_z = \left(\frac{\eta^2}{\rho^2 \cdot \bar{g}}\right) \quad (3.68)$$

czyli zastępczy wymiar poprzeczny dla przepływu niewymuszonego.

Po podstawieniu wartości liczbowych do równania (3.66) otrzymano

$$s = 0,90856 \cdot \vartheta_z \cdot Re_z^{1/3} \quad (3.69)$$

czyli wzór na zredukowaną grubość warstewki cieczy w postaci przybliżonej

$$s_r = \frac{s}{\vartheta_z} \approx Re_z^{1/3}. \quad (3.70)$$

Równanie (3.70) jest ważne tylko dla przepływu laminarnego filmu cieczy po gładkiej powierzchni. Wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa dla cieczy na powierzchni filmu cieczy powstają najpierw fale sinusoidalne a następnie nieregularne rzutowe kształty. Dla sływającej wody, charakter jej przepływu zmienia się następująco:

$Re_z \leq 3,5$ - gładka powierzchnia sływającego filmu;

$3,5 < Re_z \leq 8$ - fale sinusoidalne;

$8 < Re_z \leq 400$ - przesuwające się progi;

$Re_z \geq 400$ - grube wypukłości wraz z falami.

Strukturę filmu cieczy można określić z ogólnego równania (3.71) dla charakterystycznej liczby Reynoldsa [93]

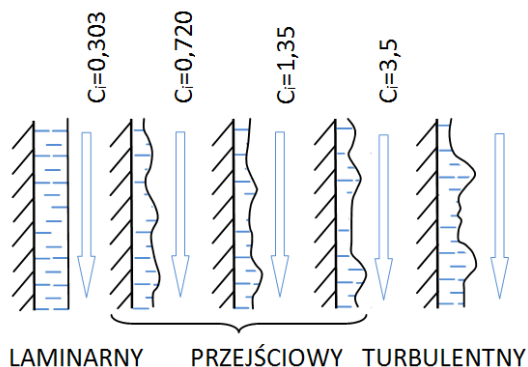
$$Re_z = C_i \cdot \left(\frac{\rho_c \cdot \sigma^3}{\eta_c^4 \cdot \bar{g}}\right)^{0,1} = C_i \cdot K_F^{0,1}, \quad (3.71)$$

gdzie:

$$K_F = \left(\frac{s^3 \cdot \rho_c}{\eta_c^4 \cdot \bar{g}}\right). \quad (3.72)$$

C_i - stała, której wartość dobiera się wg rys. 3.17,

K_F - liczba charakterystyczna dla filmu cieczy uwzględniająca siły naprężeń powierzchniowych.



Rys. 3.17. Struktury spływającego filmu cieczy wg [91].

W literaturze przedmiotu istnieje wiele publikacji na temat wyznaczania grubości filmów różnych cieczy. Badania dotyczyły grubości filmów środków powierzchniowo czynnych czy cieczy newtonowskich i dotyczyły spływu filmowego cieczy po powierzchniach gładkich i chropowatych [92]. Poniżej przedstawiono równania teoretyczne i półempiryczne (tab. 3.18) oraz doświadczalne (tab. 3.19) opisujące średnią zredukowaną grubość filmu cieczy spływającego po powierzchniach gładkich [92].

Tabela 3.18

Równania teoretyczne i półempiryczne opisujące średnią zredukowaną grubość filmu cieczy spływającego po powierzchniach gładkich [19]

Lp.	Autor	Równanie	Nr równania	Uwagi
1.	Nusselt [93]	$s_r = 0,9086Re_z^{1/3}$	(3.73)	$Re_z < 2100$ rozwiązanie równania Naviera-Stokesa
2.	Lević [94]	$s_r = 0,845Re_z^{1/3}$	(3.74)	$Re_z \in (30 \div 1100)$ teoria spływu falowego filmu cieczy
3.	Cholpanov i in. [95]	$s_r = 0,7143Re_z^{1/3} + 0,4447$	(3.75)	$Re_z \in (20 \div 320)$ $Re_z \in (320 \div 666)$ rozwiązanie równania Naviera-Stokesa
		$s_r = 0,4664Re_z^{1/3} + 2,155$	(3.76)	
4.	Kozioł i in. [96]	$s_r = 0,7756Re_z^{0,355}$	(3.77)	$Re_z \in (50 \div 1550)$ $Re_z > 1550$ z analizy prac różnych autorów
		$s_r = 0,1778Re_z^{0,556}$	(3.78)	

c. d. tabeli 3.18

5.	Broniarz-Press [97]	$s_r = 0,907Re_z^{0,33}$	(3.79)	$Re_z < 1260$ $Re_z > 1260$ z analizy zmodyfikowanego uniwersalnego rozkładu prędkości w filmie cieczy
		$s_r = 0,1753Re_z^{0,563}$	(3.80)	

Tabela 3.19

Równania doświadczalne opisujące średnią zredukowaną grubość filmu cieczy spływającego po powierzchniach gładkich [92]

Lp.	Autor	Równanie	Nr równania	Uwagi
1.	Collier, Hewitt [98]	$s_r = 0,7580Re_z^{0,353}$	(3.81)	$Re_z \in (2 \div 100)$
		$s_r = 0,4938Re_z^{4/9}$	(3.82)	$Re_z \in (100 \div 1000)$
		$s_r = 0,2566Re_z^{0,54}$	(3.83)	$Re_z > 1000$
2.	Jayanti, Hewitt [99]	$s_r = 0,7071Re_z^{0,5}$	(3.84)	$Re_z < 50$
		$s_r = 0,6323Re_z^{0,5286}$	(3.85)	$Re_z \in (50 \div 1483)$
		$s_r = 0,0504Re_z^{0,875}$	(3.86)	$Re_z > 1483$
3.	Brötz [100, 101]	$s_r = 0,0683Re_z^{2/3}$	(3.87)	$Re_z \in (2360 \div 17\ 200)$
4	Brauer [102, 103, 104]	$s_r = 0,2078Re_z^{8/15}$	(3.88)	$Re_z \in (1600 \div 8000)$
5.	Portalski [105]	$s_r = 0,4177Re_z^{4/9}$	(3.89)	$Re_z > 1150$
6.	Feind [106]	$s_r = 0,2660Re_z^{1/2}$	(3.90)	$Re_z \in (1600 \div 16\ 000)$
7.	Živajkin Volgin [107, 108]	$s_r = 0,1410Re_z^{7/12}$	(3.91)	$Re_z \in (2300 \div 14\ 000)$
8.	Černobylskij, Voromcov [109]	$s_r = 0,1288Re_z^{0,6}$	(3.92)	$Re_z \in (1600 \div 16720)$
9.	Kutateladze [110]	$s_r = 0,1523Re_z^{0,575}$	(3.93)	$Re_e > 1600$
10.	Kosky [111]	$s_r = 0,1364Re_z^{7/12}$	(3.94)	$Re_e > 1100$
11.	Lukač i in. [112]	$s_r = 0,805Re_z^{0,368}$	(3.95)	$Re_z > 1000$
12.	Koneru i in. [113]	$s_r = 0,682Re_z^{0,389}$	(3.96)	$Re_z \in (100 \div 2000)$
		$s_r = 0,0782Re_z^{0,673}$	(3.97)	$Re_z > 2000$
13.	Alekseenko i in. [114]	$s_r = 0,1365Re_z^{7/12}$	(3.98)	$Re_z > 1100$
14.	Kozlov i współpracownicy [115]	$s_r = 0,0877Re_z^{0,635}$	(3.99)	$Re_z \in (8 \cdot 10^3 \div 10^5)$
15.	Takahama, Kato [116]	$s_r = 0,2281Re_z^{0,526}$	(3.100)	$Re_z > 1100$
16.	Mostifizadeh [117]	$s_r = 0,1721Re_z^{0,562}$	(3.101)	$Re_z > 1100$

c.d. tabeli 3.19

17.	Kozioł i in. [96]	$s_r = 1,164Re_z^{0,306}$	(3.102)	$Re_z \in (270 \div 1250)$
		$s_r = 1,201Re_z^{0,552}$	(3.103)	$Re_z \in (1250 \div 3720)$
18.	Kvurt i in. [118]	$s_r = 0,9795Re_z^{1/3}$	(3.104)	$Re_z < 1600$
19.	Geršakova [119]	$s_r = 0,2066Re_z^{8/15}$	(3.105)	$Re_z > 1600$
20.	Broniarz [120]	$s_r = 0,528Re_z^{0,42}$	(3.106)	$Re_z < 995$, stal
		$s_r = 0,3513Re_z^{0,48}$	(3.107)	$Re_z < 950$, stal skorodowana
		$s_r = 0,5607Re_z^{0,421}$	(3.108)	$Re_z < 1050$, miedź
		$s_r = 0,4796Re_z^{0,442}$	(3.109)	$Re_z < 1010$, mosiądz
		$s_r = 0,337Re_z^{0,494}$	(3.110)	$Re_z < 1070$, aluminium
		$s_r = 0,7629Re_z^{0,3793}$	(3.111)	$Re_z < 990$, szkło
		$s_r = 0,7788Re_z^{0,37}$	(3.112)	$Re_z < 1075$, szkło organiczne
		$s_r = 0,3827Re_z^{0,471}$	(3.113)	$Re_z < 1100$, polichlorek winylu
21.	Černyšev [121]	$s_r = 0,4506Re_z^{0,452}$	(3.115)	$Re_z \in (100 \div 300)$
		$s_r = 1,1563Re_z^{0,279}$	(3.116)	$Re_z \in (300 \div 1000)$
		$s_r = 0,1595Re_z^{0,566}$	(3.117)	$Re_z \in (1000 \div 2000)$
22.	Ho, Hummel [122]	$s_r = 0,6391Re_z^{0,378}$	(3.118)	$Re_z \in (100 \div 2000)$

Z kolei w tabeli 3.20 zamieszczono natomiast równania średnich zredukowanych grubości filmów cieczy otrzymanych przez autora pracy [19].

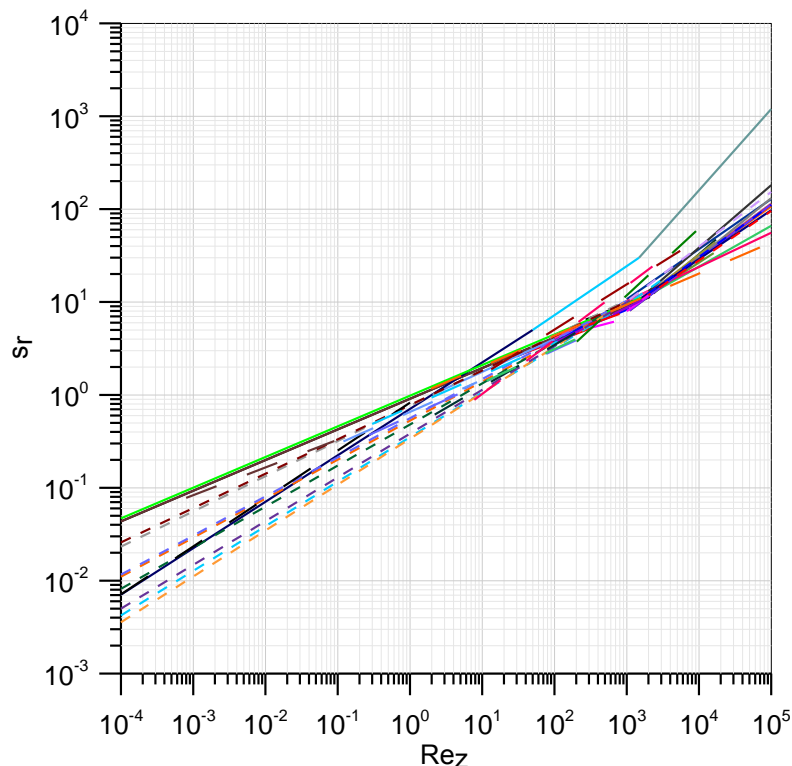
Tabela 3.20

Równania doświadczalne opisujące średnią zredukowaną grubość filmów cieczy spływających w pionowych rurach gładkich [19]

Lp.	Autor	Równanie	Nr równania	Uwagi
1.	Czernek [19]	$s_r = 0,8252Re_z^{0,516}$	(3.119)	$Re_z < 1,969$
		$s_r = 0,9335Re_z^{0,334}$	(3.120)	$Re_z \geq 1,969$

Na rys. 3.18 przedstawiono zróżnicowane wartości średniej zredukowanej grubości filmu cieczy otrzymanych przez autorów prac [19, 92], natomiast tabele (3.18 – 3.20) zawierają (zaznaczone na analogiczny kolor co krzywe zawarte na wykresie) numery równań, przypisane nazwiskom autorów zawartych w tych tabelach.

Z rys. 3.18 wynika, że największa zgodność wartości s_r , zaczerpniętych z literatury zawierają się w zakresie liczb Reynoldsa $50 < Re_z < 10^4$, natomiast w zakresach $Re_z < 50$ i $Re_z > 10^4$, wartości s_r wykazują największe rozbieżności.



Rys. 3.18. Średnia zredukowana grubość filmu cieczy spływającego po powierzchniach gładkich

3.6.2. Grubość filmów cieczy w przepływie z fazą gazową

O ile istnieje wiele dotychczas opracowanych zależności dotyczących obliczania grubości filmów cieczy przy przepływie dwufazowym [13, 123, 124, 125, 126, 127] to w przypadku przepływu trójfazowego nie opracowano dotąd uniwersalnych równań pozwalających na wyznaczenie grubości poszczególnych filmów cieczy przy takich właśnie przepływach.

Szeroki przegląd literaturowy dotyczący metod pomiaru i zależności matematycznych wyznaczających grubość filmów cieczy przy przepływie dwufazowym został zamieszczony w pracy magisterskiej [128] autorki niniejszej pracy, co przedstawiono w tabeli 3.21.

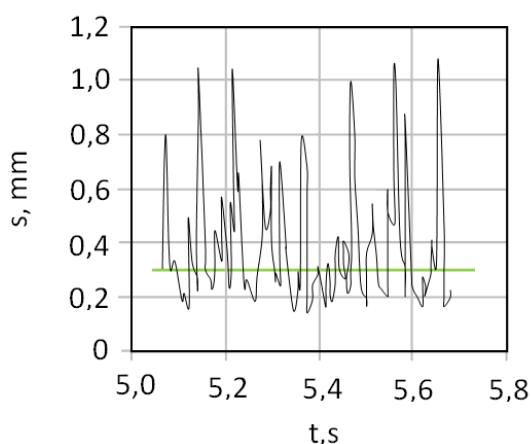
Willets w pracy [123] badał grubość filmu cieczy i własności fali przy wznoszącym przepływie ciec-z-gaz. Badania przeprowadził w rurze o średnicy

wewnętrznej 10,26 mm dla różnych mieszanin cieczy (tabela 3.22), zmieniając napięcie powierzchniowe mieszanin dwufazowych. W warunkach normalnych siły naprężenia powierzchniowego są małe w stosunku do siły grawitacyjnej i są zazwyczaj pomijane przy modelach przepływu dwufazowego. W wyniku badań opracował korelacje na grubość filmu cieczy przy wznoszącym przepływie ciec-z-gaz, ale bez bezpośredniego zastosowania przy przepływach w warunkach mikrogravitacji [126].

Natomiast Azzopardi w pracy [124] przeprowadzał badania nad charakterystykami zaburzenia fal przy pionowym, wznoszącym przepływie pierścieniowym dwóch faz. W wyniku analiz badań opisał własności fal tj. prędkość fal, częstotliwość i odległość fal [126].

Z kolei Bousman w pracy [125] mierzył grubość filmu cieczy i inne własności w warunkach mikrogravitacji. Próbował sprawdzić wpływ zmian lepkości cieczy i napięcia powierzchniowego na grubość filmu cieczy. Stwierdził, że wzrost lepkości cieczy prowadzi do grubszego filmu cieczy, a redukcja napięcia powierzchniowego w przepływie ciec-z-gaz prowadzi do pocienienia filmu cieczy. Jednakże obserwacje polegały na ocenie subiektywnej i trudno jest wywnioskować, czy grubsza warstwa filmu cieczy może być w rzeczywistości warstwą cieczy z większymi zaburzeniami fal, które obserwator potraktował jako gruby film cieczy. Z drugiej jednak strony autor pracy [125] zaobserwował, że grubość filmu cieczy maleje wraz ze wzrostem prędkości fazy gazowej [126].

Natomiast autor pracy [126] w wyniku przeprowadzonych badań przedstawił struktury przepływu dwufazowego gaz-ciecz oraz zmierzoną grubość filmu cieczy w funkcji czasu co przedstawiono na rys. 3.19. Zieloną linią zaznaczono natomiast średnią grubość filmu cieczy, która wynosiła 0,3 mm.



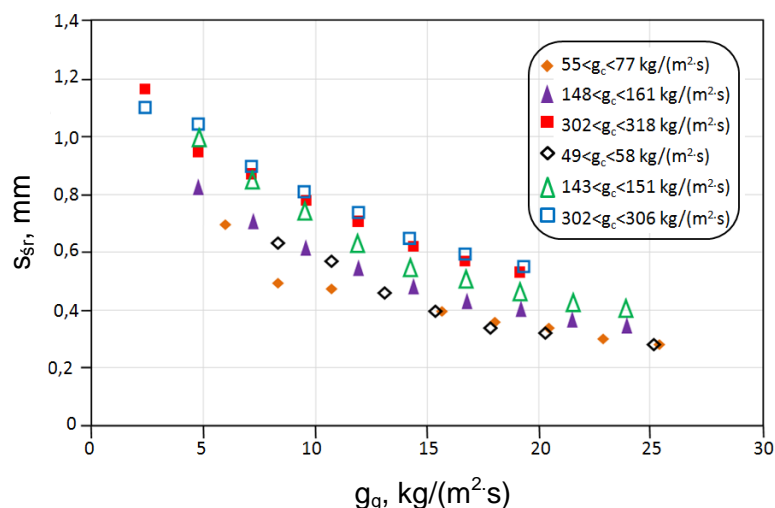
Rys. 3.19. Przebieg zmian grubości filmu cieczy wg [126]

Z kolei na rys. 3.20 przedstawiono zmierzone wartości grubości filmów cieczy w funkcji strumienia masowego gazu w zakresie wartości $g_g=(49-318)\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ oraz punkty pomiarowe uzyskane zarówno w warunkach normalnych jak i mikrogravitacji.

Tabela 3.21

Pozycje literaturowe dotyczące pomiaru grubości filmów cieczy przy przepływie wielofazowym

Lp.	Autor opracowania	rok	Czynniki robocze	Kierunek przepływu	Zakres badań i średnica kanału
1.	Willets [123]	1987	powietrze-woda, powietrze-roztwory wodne, powietrze-fluoroheptan, hel-woda	dwufazowy, pionowy, wznoszący	grubość filmu cieczy, własności fal d=10,26 mm
2.	Azzopardi [124]	1986	woda-powietrze	dwufazowy, pionowy, wznoszący, pierścieniowy	prędkość fal, częstotliwość fal, odstęp fal d=31,8 mm
3.	Bousman [125]	1995	powietrze-woda, powietrze-woda/gliceryna,	dwufazowy, pierścieniowy	wpływ zmian lepkości cieczy i napięcia powierzchniowego na grubość filmu cieczy d=12,7 mm
4.	De Jong i in. [126]	2003	powietrze-woda	dwufazowy, pionowy, wznoszący	średnia grubość filmu cieczy, minimalna grubość filmu cieczy, częstotliwość i prędkość fal d=9,525 mm
5.	Hajiloo i in. [127]	2000	powietrze-woda	dwufazowy, opadający, pierścieniowy	grubość filmu cieczy, spadki ciśnienia d=(1,56 – 4,12) mm
6.	Czernek [19]	2004	powietrze-olej	dwufazowy, pionowy, opadający	stan zafalowania powierzchni fal, grubość filmu cieczy d= (12,5; 16; 22) mm



Rys. 3.20. Średnia grubość filmu cieczy w funkcji strumienia masowego gazu wg [126]

Z rysunku 3.20 wynika, że zmiana strumienia masowego gazu ma znaczący wpływ na grubość filmu cieczy. Wraz ze wzrostem g_g grubość filmu cieczy maleje. Z kolei wzrost strumienia masowego cieczy w mniejszym stopniu wpływa na jej grubość. Obserwowano także, że przy wzroście przepływu fazy ciekłej, grubość filmu cieczy wzrastała przy stałym strumieniu masowym gazu. Jednocześnie zauważono, że dla danej wartości g_g i g_c redukcja sił ciężkości ma minimalny wpływ na grubość filmu cieczy. Średnia różnica wynosiła 11% (mniejsza dla przypadku mikrogravitacji), co oznaczało, że w tych warunkach uzyskano cieńszą warstwę filmu cieczy, ponieważ wzrost g_g wpływał na wyższą prędkość gazu w rdzeniu, a tym samym większe przenoszenie pędu do warstwy filmu cieczy, co oznaczało wzrost średniej prędkości cieczy. Dlatego, dla tego samego przepływu filmu cieczy i założeniu braku znacznego porywania kropeł, obserwowano niewielką redukcję grubości filmu cieczy. Z kolei wraz ze wzrostem g_c obserwowano większą ilość transportowanego płynu w warstwie cieczy. Ponieważ płyn był nieściśliwy, więc średnia prędkość i grubość filmu cieczy mogła rosnąć [126].

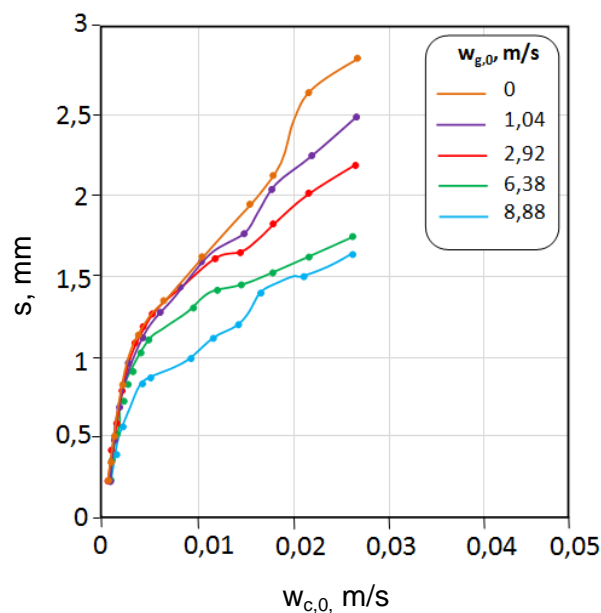
Z kolei w pracy [127] prowadzono badania w zakresie wartości liczb Reynoldsa dla cieczy i gazu $5070 < Re_c < 26700$ i $3390 < Re_g < 21400$ oraz prędkości pozornych dla cieczy i gazu odpowiednio: $(0,32 - 0,78)\text{m/s}$ i $(2,52 - 9,46)\text{m/s}$. Średnią grubość filmu s_r uzyskano z korelacji Henstock'a i Hanratty [129]:

$$\frac{s_r}{d} = \frac{6,59 \cdot F}{(1 + 1400 \cdot F)^{1/2}}; \quad (3.121)$$

$$F = \gamma \cdot (v_c/v_g) \cdot (\rho_c/\rho_g)^{1/2} \cdot Re_g^{-0,9}; \quad (3.122)$$

$$\gamma = \left[(0,707 \cdot Re_c^{0,5})^{2,5} + (0,0379 \cdot Re_c^{0,9})^{2,5} \right]^{0,4}. \quad (3.123)$$

Autor pracy [19] podczas wykonywania badań określał m. in. grubość filmu cieczy. W tym celu wykorzystywał optoelektroniczny układ pomiarowy, w skład którego wchodziły sondy optyczne z oprogramowaniem. Badaną cieczą był olej grzewczy Iterm-12, a pomiar grubości jego warstwy sprowadzał się do pomiaru tłumienia sygnału optycznego za pomocą fotodekodera, który oświetlany był z przeciwległej strony oświetlaczami typu LED. W oparciu o przeprowadzone badania nad hydrodynamiką filmu cieczy na rys. 3.21 przedstawiono wybrane zmierzone wartości grubości filmu oleju o lepkości $\eta_0 = 1,517 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ w rurze o średnicy $d = 22 \text{ mm}$.



Rys. 3.21. Grubość filmu cieczy przy opadającym przepływie dwufazowym powietrza i oleju w rurze o średnicy $d = 22 \text{ mm}$ i lepkości oleju $\eta_0 = 1,517 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ wg [19]

Z analizy danych zawartych na wykresie wynika, że wzrost prędkości fazy gazowej, przy stałej prędkości cieczy, powodował zawsze zmniejszenie grubości filmu cieczy. Zauważyć można także, że przy małych prędkościach przepływu fazy gazowej, grubości filmów cieczy są zbliżone do wartości otrzymanych dla spływu grawitacyjnego cieczy.

W wyniku przeprowadzonych przez autora pracy [19] obliczeń, uzyskano równania dla wartości zredukowanej grubości filmu cieczy, która jest zależna od zakresy liczby Reynoldsa dla warunków zraszania otrzymując następujące zależności:

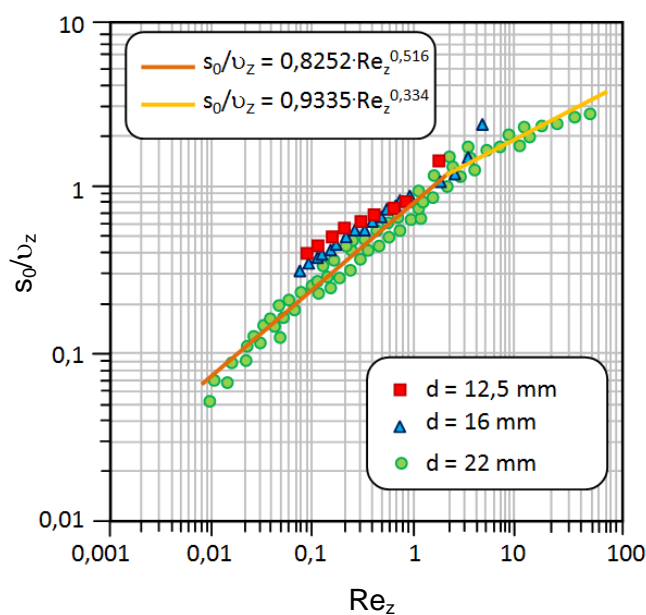
$$\frac{s_0}{\nu_z} = 0,825Re_z^{0,516} \text{ dla } Re_z < 1,969 \quad (3.124)$$

dla której współczynnik korelacji $r = 0,9656$, a średnia wartość odchylenia standardowego wynosiła 0,1771 oraz

$$\frac{s_0}{\nu_z} = 0,9335Re_z^{0,334} \text{ dla } Re_z \geq 1,969 \quad (3.125)$$

dla której współczynnik korelacji $r = 0,9238$, a średnia wartość odchylenia standardowego wynosiła 0,146.

Uzyskane za pomocą równań (3.124 i 3.125) krzywe przedstawiono na rys. 3.22. Z układu krzywych na wykresie widać, że silniejszy przyrost wartości zredukowanej grubości filmu cieczy występuje przy $Re_z < 2$, na co może mieć wpływ wzrastający stopień zafalowania powierzchni filmu cieczy.



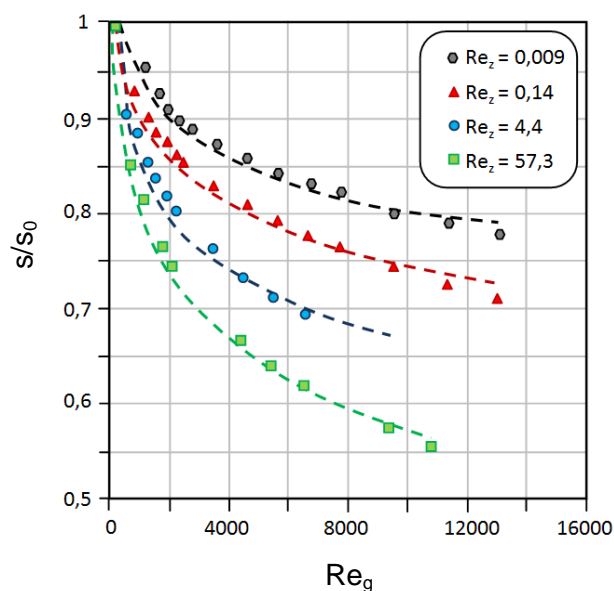
Rys. 3.22. Zredukowana grubość filmu cieczy przy spływie grawitacyjnym oleju Iterm-12 w rurach o różnych średnicach wg [19]

Autor pracy [19] opracował także zależność do określania wpływu strumienia gazu na zmiany grubości płynącej warstwy cieczy w strudze dwufazowej, w postaci

$$\frac{s}{s_0} = \frac{1}{1 + 5,68 \cdot 10^{-3} Re_z^{0,132} Re_g^{0,471}}, \quad (3.126)$$

której wartość współczynnika korelacji $r = 0,9856$, a średnia wartość odchylenia standardowego wynosiła 0,183. Graficzną interpretację równania (3.126) przedstawiono na rys. 3.23.

Z rozmieszczenia punktów doświadczalnych na rys. 3.23 wynika, że wzrost wartości liczby Reynoldsa dla gazu wpływa zawsze na zmniejszenie się grubości filmu cieczy. Redukcja grubości filmu cieczy s w stosunku do grubości s_0 dla spływu grawitacyjnego cieczy zwiększa się wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa dla warunków zraszania, co znacznie umożliwiła redukcję grubości filmu cieczy (przy dwufazowym przepływie pierścieniowym), która przy jej spływie grawitacyjnym posiadałaby dużo większą wartość.



Rys. 3.23. Wpływ strumienia gazu na zmiany grubości płynącej warstwy cieczy w strudze dwufazowej w stosunku do grubości występujących dla warunków spływu grawitacyjnego wg [19]

Z przeprowadzonego przeglądu literaturowego dotyczącego grubości filmów cieczy wynika duża różnorodność zarówno pod względem sposobów wyznaczania i obliczania grubości warstwy cieczy, szczególnie w przypadku przepływów dwufazowych. Jednocześnie w zawartej w pracy literaturze tylko nieliczne pozycje uwzględniają ciecze o dużej lepkości. Natomiast w odniesieniu do przepływów trójfazowych w przytoczonej literaturze nie spotkano się z metodami i zależnościami matematycznymi pozwalającymi na wyznaczenie grubości filmów cieczy przy takich przepływach.

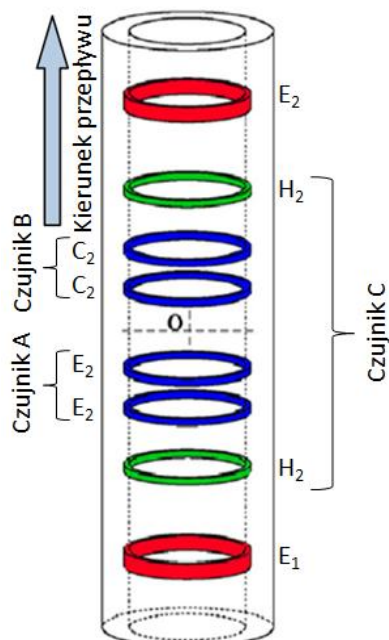
3.7. Przewodność elektryczna składników mieszaniny wielofazowej

Przemysłowe wykorzystanie przepływów wielofazowych wymaga metod przewidywania warunków takich przepływów [1], zwłaszcza w kontekście oceny struktur przepływu. Jednym z mało docenianych sposobów jest wykorzystanie w takim przypadku zjawiska konduktywności ciekłych składników mieszaniny.

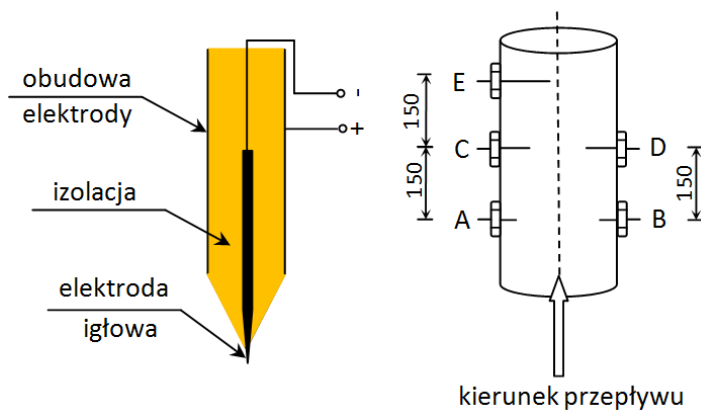
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań literaturowych oraz badań własnych, w których wykorzystywano różne zjawiska, w tym rezystancyjność faz, do określania charakteru przepływu wielofazowego. Ze względu na wielkość oporności elektrycznej właściwej, można wyróżnić izolatory, czyli dielektryki, półprzewodniki i przewodniki. Każdy ze składników mieszaniny wielofazowej cechuje się odmiennymi od pozostałych cechami fizykochemicznymi [7, 42], co może być wykorzystane w ocenie stanu rozproszenia poszczególnych faz, z wykorzystaniem zjawiska przewodności elektrycznej faz.

W literaturze przedmiotu również odnoszono się do zastosowania metod konduktancji przy określaniu ciągłości faz w przepływie. Autorzy pracy [43] badali wznoszący przepływ trójfazowy wykorzystując pionowy układ czujników wieloelektrodowych do pomiaru przewodności, natomiast ciągłość fazy ciekłej określana była poprzez układ przewodzenia mini sond. Na rys. 3.24 przedstawiono schemat rozmieszczenia czujników pomiarowych, wykorzystywanych przy określaniu przewodności elektrycznej faz w przepływie trójfazowym. Układ elektrod pomiarowych, przedstawionych na rys. 3.24 składał się z ośmiu pierścieni wykonanych ze stali nierdzewnej, podzielonych na cztery pary i zamontowanych na wewnętrznej ścianie rury wykonanej z akrylu o średnicy wewnętrznej 125 mm. E_1 i E_2 były elektrodami wzbudzającymi, rejestrującymi wartość napięcia z częstotliwością 20kHz. Czujniki pomiarowe A i B były wykorzystywane do pomiaru prędkości osiowej. Czujnik C pozwalał na określenie średniej wartości zmierzonych udziałów objętościowych faz. Do scharakteryzowania struktur przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej wykorzystywano sygnały prądu zmiennego. Poza opisanym układem pierścieni, do określenia struktur przepływu składników dwufazowej fazy ciekłej olej-woda wykorzystano układ mini sond przedstawionych na rys. 3.25. Jak pokazano na tym rysunku, mini sonda przewodząca była podłączona do elektrody igłowej umieszczonej w obudowie, a przestrzeń między nimi wypełniona była materiałem izolacyjnym. Głębokość umieszczonych czujników pomiarowych (A, B, C, D i E)

wynosiła odpowiednio: $1/8d$, $1/8d$, $1/4d$, $1/4d$ i $1/2d$, gdzie $d=125$ mm i jest średnicą wewnętrzną rury. Odległość czujników pomiarowych w kierunku przepływu wynosiła 150 mm.

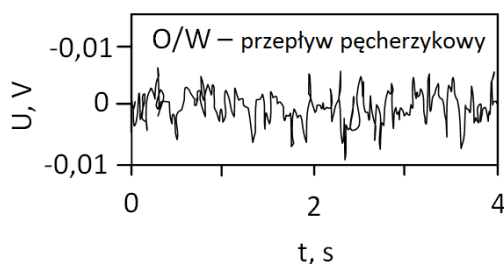


Rys. 3.24. Schemat układu elektrod do pomiaru przewodności w przepływie wg [43]



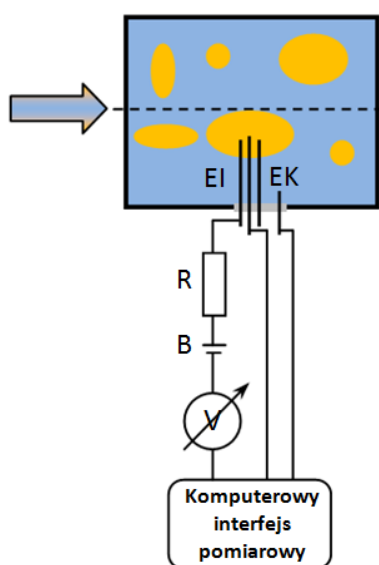
Rys. 3.25. Schemat instalacji mini sond do określania ciągłości faz wg [43]

Gdy elektroda igłowa była otoczona przez ciecz przewodzącą (wodę), wtedy pętla okręgu tworzyła pomiędzy elektrodą a obudową sygnały wyjściowe niskiego napięcia. Natomiast, gdy elektrodę otaczała ciecz izolacyjna (olej), pętla okręgu była przzerwana i sygnał wyjściowy był wysokonapięciowy. Celem zilustrowania wyników badań autorów pracy [43], na rys. 3.26 przedstawiono przykładową charakterystykę napięciową, który autorzy [43] uzyskali dla przypadku przepływu pęcherzykowego oleju w wodzie. Jak wynika z przebiegu linii strukturę taką cechował niski poziom sygnału z elektrody igłowej oraz występowanie nieznacznych wahań wartości mierzonego napięcia.

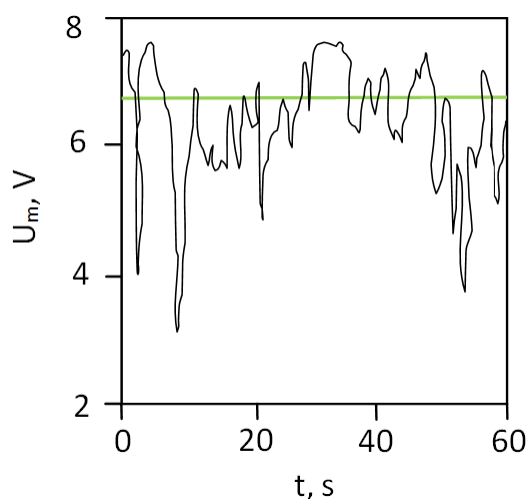


Rys. 3.26. Charakterystyka napięciowa przepływu trójfazowego olej-powietrze-woda ($w_{o,0}=0,0019\text{m/s}$; $w_{w,0}=0,017\text{m/s}$; $w_{g,0}=0,043\text{m/s}$) wg [43]

Z kolei autor pracy [7] wykorzystywał metodę pomiaru konduktancji układu woda-olej, do weryfikacji typu kropeł pojawiających się w zakresie dyspersyjnych struktur przepływu ciekłej mieszanki w rurach poziomych. Schemat opracowanego przez autora [7] układu przedstawiono na rys. 3.27. Jedną z elektrod stanowił drut o średnicy 0,6 mm, który usytuowano wewnątrz rurki zawierającej materiał izolacyjny, o średnicy wewnętrznej 0,8 mm, która była drugą elektrodą. Gdy elektroda miała kontakt z wodą, wtedy występowało napięcie, a w przypadku kontaktu elektrody z olejem napięcie nie pojawiało się. Napięcie rejestrowano z częstotliwością 49kHz, a jego wartość mierzono co $\approx 0,02$ ms. Na rys. 3.28 przedstawiono wybraną część charakterystyki zmian mierzonego napięcia z wykorzystaniem elektrody igłowej. Przy życiu tego typu układu pomiarowego rozpoznawano typy kropeł i wyznaczano ich wielkość.



Rys. 3.27. Istota oceny typu układu ciecz-ciecz elektrodą igłową wg [7].



Rys. 3.28. Fragment rzeczywistego przebiegu zmian napięcia elektrody igłowej dla układu typu olej/woda wg [7].

W podsumowaniu przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że wykorzystanie metod pomiaru przewodności elektrycznej układu gaz-ciecz-ciecz pozwala na ilościowe określenie charakterystycznych wielkości opisujących naturę wielofazowego przepływu mieszanin gazowo-cieczowych. Metody te, mogą także stanowić istotne narzędzie do identyfikacji struktur w przepływie wielofazowym oraz być pomocne przy określaniu dominacji poszczególnych faz w takim przepływie. Pozwalają one także dokonać oceny tworzących się form przepływu i stanowić uzupełnienie wizualnej identyfikacji struktur w przepływie wielofazowym.

3.8. Podsumowanie przeglądu literatury

Z dokonanego przeglądu literaturowego wynika, że opracowania dotyczące przepływów dwufazowych jak i trójfazowych z uwzględnieniem cieczy bardzo lepkiej przy opadającym przepływie stanowią niewielki procent w opublikowanych do tej pory pracach. Szczególnie w odniesieniu do współprądowego, opadającego przepływu trójfazowego ilość opracowań jest ograniczona. Odnaleziono w literaturze zaledwie kilka prac, w których określano struktury przepływu oraz mapy przepływu, a także określano wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz przy przepływie trójfazowym.

Przeprowadzony przegląd literaturowy dowodzi, że w przepływie trójfazowym gaz- ciecz-ciecz występują zróżnicowane struktury przepływu, jednakże odnoszą się one jedynie dla warunków przy przepływie wznoszącym.

Podobnie jak do braku w literaturze struktur przepływu, nie opracowano do tej pory map dla opadającego przepływu trójfazowego. Natomiast przytoczone w niniejszej pracy mapy opracowane dla wznoszącego przepływu trójfazowego są słuszne jedynie dla ograniczonych warunków przepływowych.

Również brak jest informacji na temat udziałów objętościowych poszczególnych faz przy opadającym przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz, a zwłaszcza danych dotyczących cieczy bardzo lepkich, jako jednej z faz ciekłych. Z kolei, przytoczone w pracy pozycje literaturowe dotyczące określenia wartości udziałów objętościowych opierały się w zasadzie na modelu drift-flux i posiadały ograniczony zakres zastosowania.

Analogicznie, nie spotkano się w literaturze z próbami modelowania za pomocą zależności matematycznych grubości warstwy cieczy przy opadającym przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz. Jedynie w odniesieniu do przepływów dwufazowych istnieje wiele propozycji obliczania tej wielkości, ale również z nielicznymi wyjątkami co do stosowalności z udziałem cieczy bardzo lepkich.

Podsumowując szczegółowe studia literaturowe stwierdzono brak opracowań dotyczących opadającego przepływu trójfazowego w zakresie struktur i map przepływu, udziałów objętościowych oraz grubości filmów cieczy. Ze względu na stwierdzone braki w literaturze na temat hydrodynamiki opadającego w rurach pionowych przepływu trójfazowego i ograniczony zasób wiedzy w tym obszarze zdecydowano się podjąć badań doświadczalnych oraz opisać zależności pozwalające na szersze poznanie hydrodynamiki opadającego, pierścieniowego przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz bardzo lepka.

4. CEL I ZAKRES PRACY

Mając na uwadze brak jednoznacznych opracowań dotyczących opisu współprądowego opadającego w rurach pionowych przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz oraz znaczne rozbieżności w opisie i interpretacji zjawisk charakterystycznych dla przepływów wielofazowych w kanałach o równej konfiguracji, zdecydowano się na podjęcie własnych badań doświadczalnych. Podjęte w tym kierunku działania pozwoliłyby na poszerzenie i uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy na temat hydrodynamiki przepływu strugi trójfazowej zawierającej gaz i dwie niemieszające się ciecze.

Stąd też, za cel pracy przyjęto eksperymentalne określenie wpływu parametrów przepływowych oraz właściwości składników mieszaniny wielofazowej na rodzaj tworzących się struktur przepływu, wartości udziałów objętościowych faz oraz grubości tworzących się filmów cieczy, podczas spływu w rurach pionowych cieczy dwufazowej woda-olej oraz współprądowego, pierścieniowego przepływu mieszaniny trójfazowej powietrze-woda-olej.

Dla tak przyjętego celu pracy, postanowiono ją realizować w następującym zakresie:

1. Przeprowadzenie szczegółowych badań doświadczalnych obejmujących identyfikację struktur przepływu wielofazowego oraz określenie wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz i określenie wartości grubości różnych jakościowo filmów cieczy dwufazowej woda-olej, odpowiednio w warunkach jej spływu grawitacyjnego oraz współprądowego przepływu z fazą gazową, tj. powietrzem.
2. Przeprowadzenie szczegółowej analizy danych doświadczalnych pod kątem określenia parametrów przepływowych i właściwości składników mieszaniny dla tworzenia się określonych struktur przepływu oraz ich wpływu na wartości udziałów objętościowych faz oraz grubości filmów cieczy.
3. Opracowanie map przepływu wielofazowego opisujących obszary występowania struktur przepływu w filmach cieczy z dominacją fazy wodnej i olejowej.

4. Opracowanie zależności opisujących wybrane, charakterystyczne parametry hydrodynamiki pierścieniowego przepływu mieszaniny wielofazowej, a mianowicie wartości udziałów objętościowych faz oraz wartości grubości filmów cieczy.

5. BADANIA WŁASNE

Badania eksperymentalne opadającego przepływu trójfazowego gazu i dwóch niemieszających się cieczy ukierunkowane były na wykonanie określonego w rozdziale 4 celu pracy i obejmowały swoim zakresem badania struktur przepływu, pomiar udziałów objętościowych poszczególnych faz w mieszaninie trójfazowej oraz określenie grubości filmów każdej z cieczy bazowych oraz ich mieszaniny jako udziału dwufazowego ciec-ciecz.

5.1. Charakterystyka czynników roboczych

W badaniach doświadczalnych hydrodynamiki przepływu trójfazowego gazu i dwóch wzajemnie niemieszających się cieczy, wykorzystano powietrze, wodę i cztery jakościowo różne oleje. Za ciecze olejowe posłużyły dwa oleje grzewcze (jako nośniki ciepła w urządzeniach grzewczych) Iterm 6 Mb i Iterm 12, jeden olej smarowy Iterm 30 MF oraz jeden olej maszynowy L-AN 15, których wartości gęstości, lepkości i napięcia powierzchniowego w temperaturze 20°C przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1.

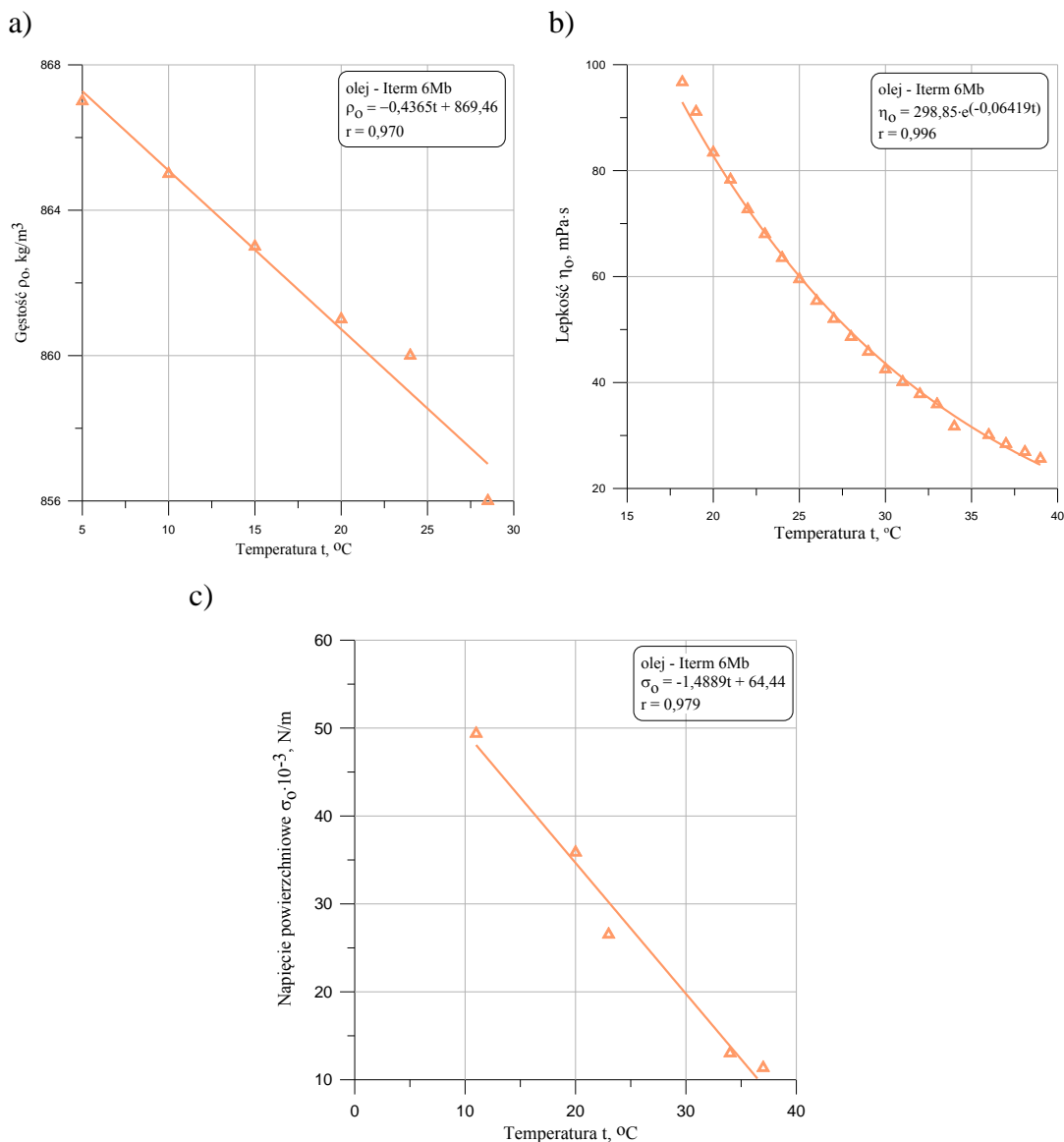
Charakterystyka właściwości fizycznych olejów

Olej	Gęstość, kg/m^3	Lepkość, $Pa \cdot s$	Napięcie powierzchniowe, N/m
L-AN 15	859,81	0,029	0,03247
Iterm 6 Mb	860,73	0,083	0,03585
Iterm 12	881,55	0,37	0,06143
Iterm 30 MF	880,85	2,19	0,09123

Wybrane do badań oleje charakteryzowały się znacznie większą lepkością i mniejszą gęstością w porównaniu do wody, która stanowiła drugą fazę w ciekłej mieszaninie dwufazowej.

Jako fazy gazowej użyto powietrza, które było pobierane z zewnętrznego układu instalacji centralnej.

Na rys. 5.1 zamieszczono, celem przykładu wybraną charakterystykę zmian gęstości, lepkości i napięcia powierzchniowego wykorzystanego w badaniach oleju ITERM 6Mb w funkcji temperatury, w zakresie której przeprowadzone były badania.



Rys. 5.1. Charakterystyka zmian a) gęstości, b) lepkości, c) napięcia powierzchniowego oleju grzewczego ITERM 6Mb w funkcji temperatury

Należy zaznaczyć, że analogiczne charakterystyki zmian właściwości fizycznych opracowano również dla pozostałych, wykorzystywanych w badaniach olejów. Bazując na wynikach przeprowadzonych w tym celu dodatkowych badań, wszystkie pomiary wykonano za pomocą przyrządów dostępnych w laboratorium Katedry Inżynierii Procesowej. W przyjętym zakresie badań, wartości współczynnika lepkości dynamicznej olejów wyznaczano lepkościomierzem Brookfield'a DV-II – typu

stożek – płytka. Charakterystykę gęstości olejów w funkcji temperatury wyznaczano metodą wagową, przy użyciu piknometru i aerometru. Natomiast wartości napięcia powierzchniowego wyznaczano tzw. metodą pęcherzykową.

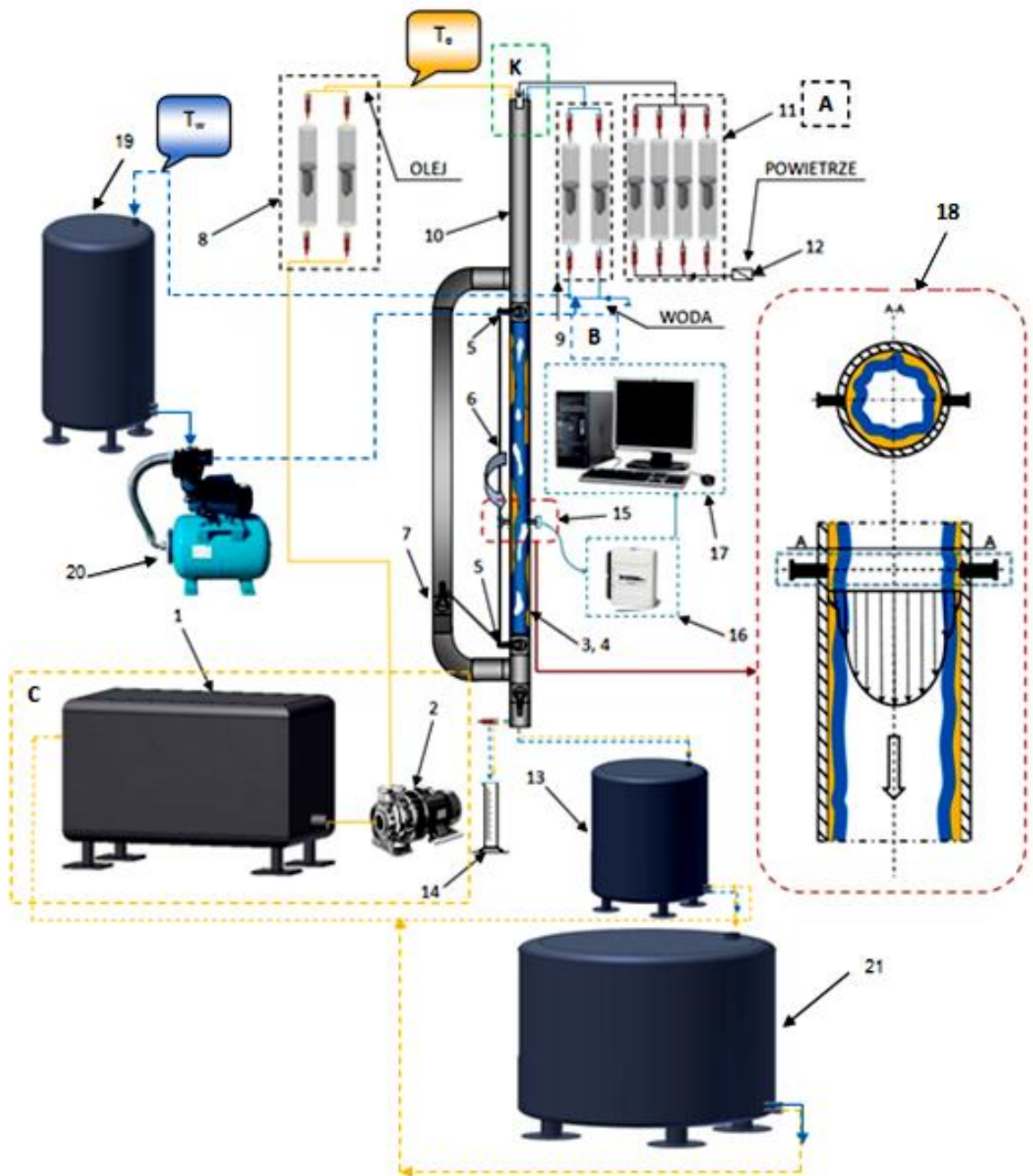
Z kolei, właściwości wody i powietrza przyjmowano z tablic właściwości tych czynników [131]. Opracowane szczegółowe zależności dla składników mieszaniny były wykorzystywane zarówno przy określaniu zakresu badań jak i obliczeń zależności opisujących charakterystyczne wielkości przepływu wielofazowego.

5.2. Instalacja badawcza

Badania doświadczalne przepływu trójfazowego prowadzono na specjalnie do tego celu zmodernizowanej i wyposażonej w nowe elementy aparatury pomiarowej instalacji doświadczalnej, której schemat przedstawiono na rys. 5.2. Widok ogólny stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 5.3. Podstawowymi elementami instalacji był pionowy kanał pomiarowy (3) wykonany z pleksiglasu o średnicy wewnętrznej 12,5mm, układ zasilania powietrzem (A), wodą (B) i olejem (C), odpowiednie układy pomiarowe strumienia przepływu oleju, wody i powietrza (8, 9, 11), komorę wytwarzania mieszaniny trójfazowej (K) oraz separatory (13, 21).

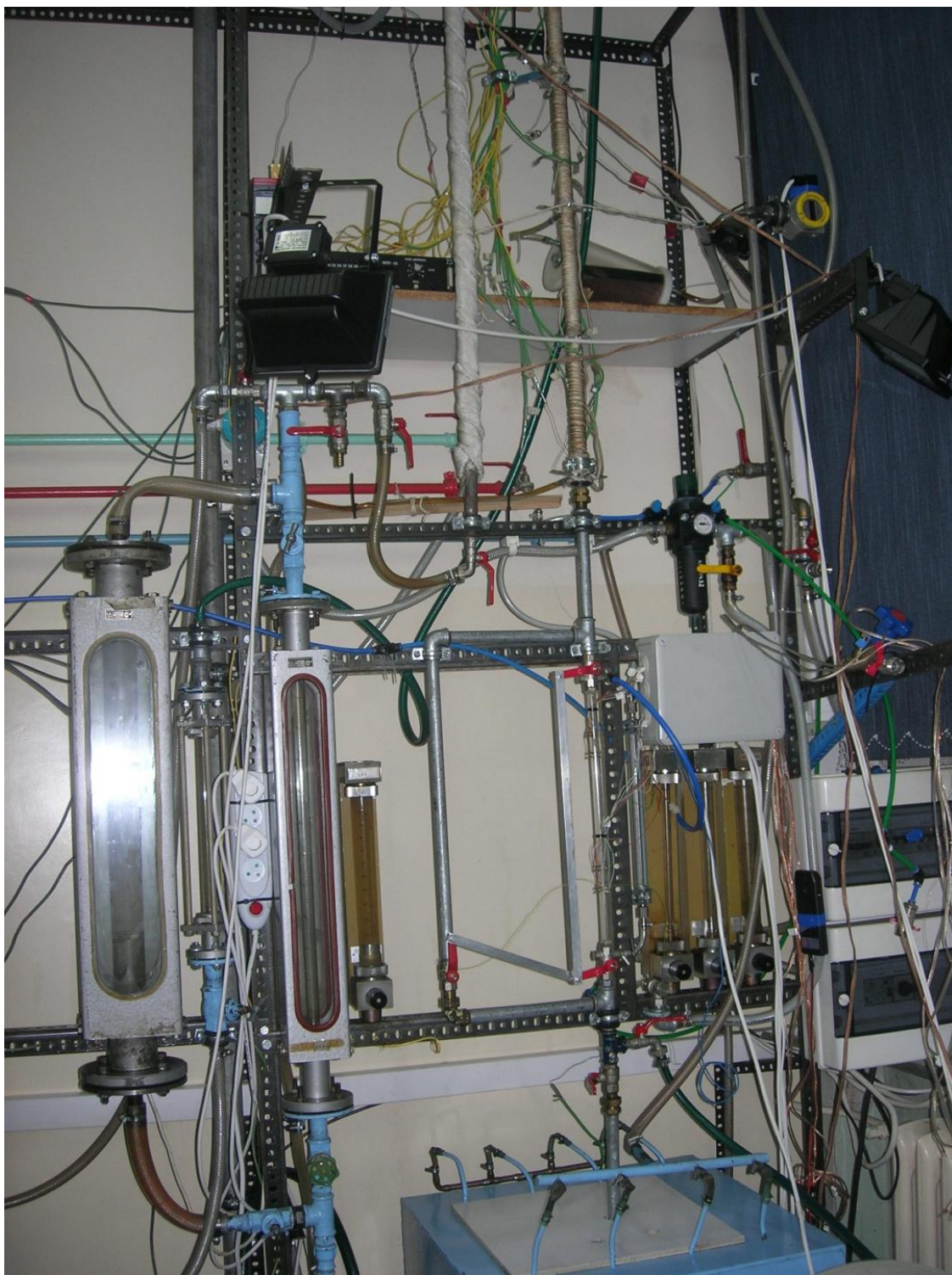
Czynniki robocze doprowadzane z odpowiednich układów zasilania (A, B, C) kierowane były do układu regulacji i pomiaru strumienia przepływu (8, 9, 11), a następnie do układu zasilania (K), gdzie następowało wytworzenie strugi wielofazowej. Olej tłoczony był do instalacji i układu zasilania (z dyszą centralną) za pomocą pompy zębatej (2), napędzanej silnikiem prądu stałego, umożliwiającego płynność regulacji obrotów pompy. Przed wlotem do układu zasilania mierzono temperaturę oleju (T_o). Woda pobierana była bezpośrednio z sieci wodociągowej, skąd po odgazowaniu w zbiorniku wody (19) za pomocą hydroforu (20) kierowana była do układu zasilania, poprzez baterię rotametrów wody, służących do regulacji i pomiaru jej strumienia przepływu. Temperaturę wody mierzono w zbiorniku w punkcie (T_w). Natomiast powietrze pobierane było z centralnej instalacji ciśnieniowej. Po przejściu przez zawór redukcyjny (12) (który utrzymywał stałe ciśnienie w instalacji, co zapobiegało wahaniom pływaków w rotametrach) kierowane było do baterii rotametrów, gdzie regulowano i mierzono jego strumień przepływu. Powstała mieszanina wielofazowa przepływała początkowo przez nieprzezroczysty odcinek

kanału pomiarowego (10), gdzie następowała stabilizacja parametrów przepływu i kształtowanie się określonej struktury przepływu w wyniku różnych wartości strumieni przepływu i właściwości faz. Natomiast w części przezroczystej kanału pomiarowego (3) dokonywano obserwacji i identyfikacji tworzących się struktur przepływu, pomiaru wartości udziałów objętościowych faz (4) oraz określania dominacji poszczególnych faz w przepływie cieczy dwufazowej typu woda-olej (15). Po opuszczeniu kanału pomiarowego mieszanina trójfazowa przepływała do separatora pośredniego (13), w którym następowało oddzielenie gazu od cieczy. Następnie za pomocą pompy, oddzielona ciecz przetłaczana była do właściwego separatora (21) o pojemności 1000m^3 , gdzie następowało grawitacyjne rozdzielanie jej składników na olej i wodę.



Rys. 5.2. Schemat instalacji eksperymentalnej

1 – zbiornik oleju, 2 – pompa zębata, 3 i 4 – przezroczysty odcinek kanału pomiarowego i obserwacja struktur, 5 – zawory odcinające, 6 – mechanizm odcinający, 7 – zawór kulowy, 8 – bateria rotametrów oleju, 9 – bateria rotametrów wody, 10 – nieprzezroczysty kanał pomiarowy, 11 – bateria rotametrów powietrza, 12 – zawór redukcyjny, 13 i 21 – separatory, 14 – cylinder miarowy, 15 – sondy pomiarowe, 16 – karta pomiarowa, 17 – komputerowy system akwizycji danych pomiarowych, 18 – przekrój kanału pomiarowego, 19 – zbiornik wody, 20 – hydrofor, układ zasilania: C – olejem, B – wodą, A – powietrzem, K – komora wytwarzania mieszaniny wielofazowej

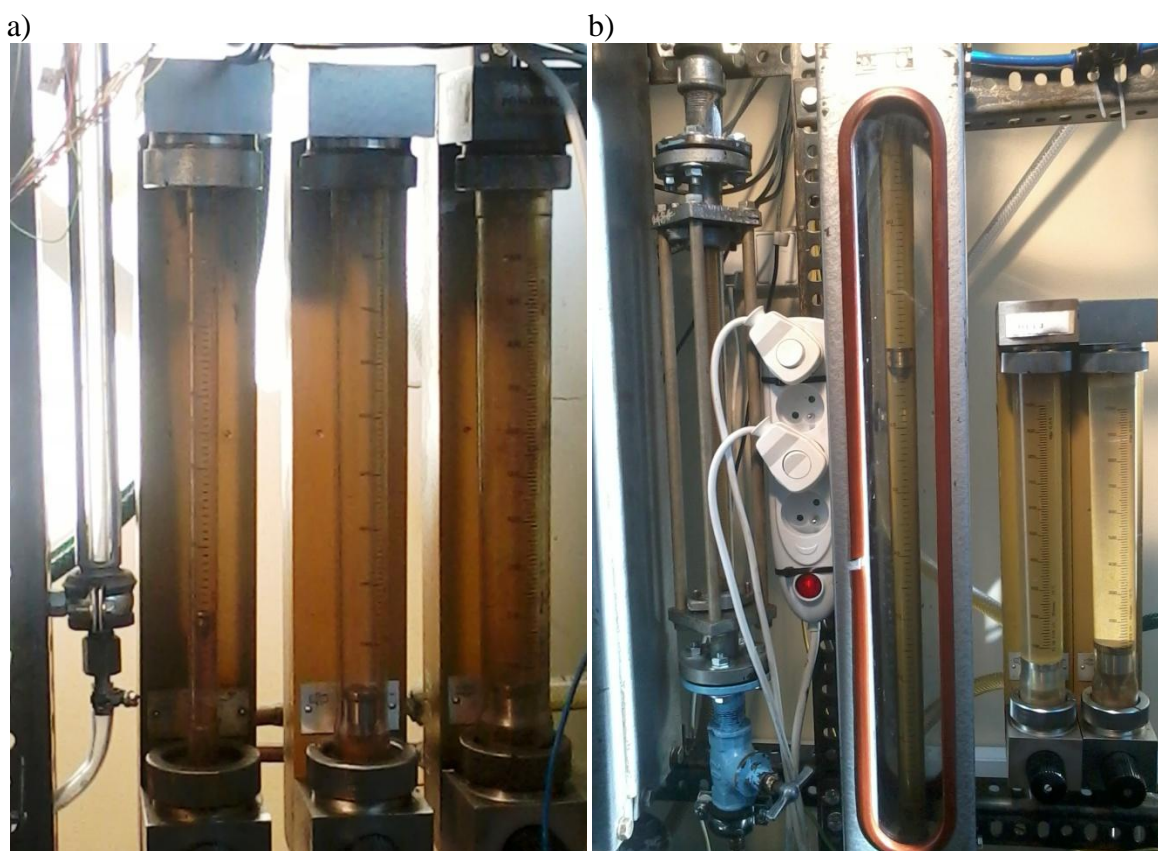


Rys. 5.3. Widok ogólny instalacji doświadczalnej

5.2.1. Układy zasilania i pomiaru strumieni przepływu faz

W zestaw instalacji doświadczalnej wchodziły trzy układy zasilania i pomiaru strumienia przepływu, czyli powietrza, wody i oleju.

Pomiar strumieni przepływu każdej z faz odbywał się za pomocą zestawu przepływomierzy pływakowych typu LD, RIN oraz RUN, wykonanych w klasie 1.0, które umożliwiały pomiar strumienia objętościowego przepływu w obszernym zakresie zmian tej wielkości. Na rys. 5.4 przedstawiono widoki poszczególnych układów pomiaru strumieni przepływu powietrza, wody i oleju.



Rys. 5.4. Widok układów pomiarowych strumieni przepływu a) powietrza, b) wody i oleju.

Wykorzystane w badaniach rotametry, przed rozpoczęciem badań zostały wycechowane w celu bezpośredniego odczytu wartości poszczególnych strumieni przepływu powietrza ze wskazań poszczególnych przepływomierzy. Parametry wzorcowania wszystkich wykorzystanych w badaniach przepływomierzy zamieszczono w tabeli 5.2, podając typ, klasę dokładności oraz zakres pomiarowy każdego

z rotametrów, a także opracowane równanie opisujące cechowanie przyrządów pomiarowych dla średniej temperatury równej 20°C.

Należy jednoznacznie zaznaczyć, że w odniesieniu do badań strumienia oleju, wykonano także szczegółowe charakterystyki w zakresie (15 – 30)°C, co 5°C. Charakterystyki te, wykorzystywano do ustalania odpowiednich strumieni dla danych rodzajów olejów. Niezależnie od pomiaru dokonywanego na rotametrach, okresowo sprawdzano ich wskazania poprzez metodę wagową z wykorzystaniem wagi elektronicznej typu WPT 10, z dokładnością wskazań wynoszącą 1,0 g.

Tabela 5.2

Charakterystyka rotametrów dla przepływu powietrza, wody i oleju w temp. 20°C

Typ rotametriu	Klasa dokładności	Zakres pomiarowy m ³ /h	Równanie
Pomiar przepływu powietrza			
RUN 06	1,0	0,11 – 0,60	$\dot{V}_g = 0,0054dz + 0,06$
LD 7319	1,0	0,43 – 2,09	$\dot{V}_g = 0,0331dz + 0,102$
LD 7728*	1,0	1,0 – 8,0	$\dot{V}_g = dz/1000$
LD 6098	1,0	5,30- 36,08	$\dot{V}_g = 0,0342dz + 1,8836$
Pomiar przepływu wody			
RIN 106	1,0	0,0072 – 0,1044	$\dot{V}_w = 3 \cdot 10^{-7}dz - 10^{-6}$
LD 7734	1,0	0,10 – 1,09	$\dot{V}_w = 0,0011dz - 0,0061$
Pomiar przepływu oleju			
L-AN 15			
RIN 164	1,0	0,012 – 0,16	$\dot{V}_o = 0,1523e^{0,029dz}$
LD 6101	1,0	0,0053 – 0,33	$\dot{V}_o = 2,2526 \cdot 10^{-5}dz^{1,7969}$
Item 6 Mb			
RIN 164	1,0	0,00096 – 0,055	$\dot{V}_o = 2,8 \cdot 10^{-4}dz^{1,7562}$
LD 6101	1,0	0,0053 – 0,33	$\dot{V}_o = 2,25 \cdot 10^{-5}dz^{1,7969}$
Item 12			
RIN 164	1,0	0,001- 0,012	$\dot{V}_o = 0,0134e^{0,0273dz}$
LD 6101	1,0	0,006 – 0,096	$\dot{V}_o = 0,073e^{0,0031dz}$
Item 30 MF			
RIN 164	1,0	$7,31 \cdot 10^{-5} - 0,0043$	$\dot{V}_o = 6,0913 \cdot 10^{-10}dz^{1,5225}$ $\dot{V}_o = 2,2867 \cdot 10^{-11}dz^{2,3563}$
LD 6101	1,0	$0,65 \cdot 10^{-3} - 0,022$	$\dot{V}_o = 1,5574 \cdot 10^{-10}dz^{1,5335}$ $\dot{V}_o = 2,1551 \cdot 10^{-10}dz^{1,4709}$

*charakterystyka rotametriu podana wg producenta, ze względu na możliwość bezpośredniego odczytu strumienia powietrza w m³/h

5.2.2. Kanał pomiarowy

Głównym elementem instalacji był pionowy kanał pomiarowy (10), składający się zarówno ze stalowej części nieprzezroczystej rurociągu oraz z części wykonanej z pleksiglasu (część obserwacyjna rurociągu) o średnicy wewnętrznej 12,5mm i długości całkowitej 2,5m.

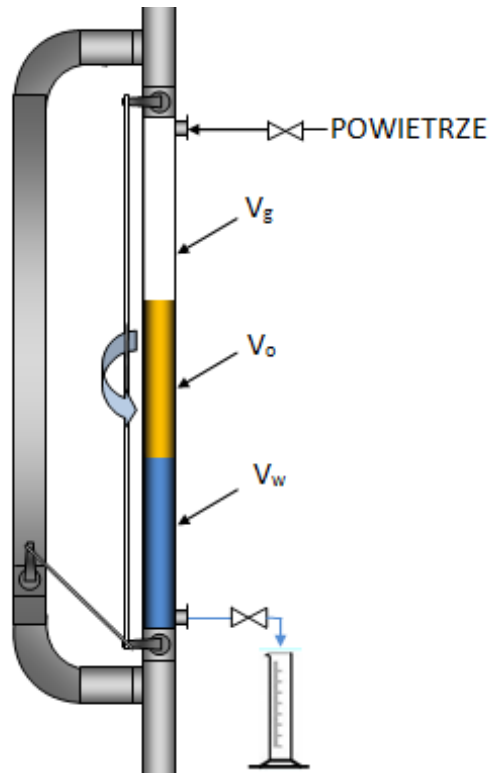
Całkowitą długość kanału pomiarowego stanowiły właściwie dwa odcinki. Nieprzezroczysty odcinek kanału pomiarowego miał długość 2m. Natomiast odcinek transparentny kanału pomiarowego miał długość 0,5m. W części początkowej kanału następowało kształtowanie się przepływu pierścieniowego oraz jego stabilizacja. Z kolei w części przezroczystej, służącej jako odcinek pomiarowy dokonywano obserwacji tworzących się struktur przepływu trójfazowego oraz ich identyfikacji i rejestracji za pomocą kamery oraz aparatu cyfrowego. W tej części instalacji zamontowano także sondy pomiarowe służące do oceny konduktywności poszczególnych faz ciekłych, pozwalających na określenie charakteru ciekłej mieszaniny typu woda-olej.

Rejestracja struktur przepływu

Określenie występujących podczas przepływu mieszaniny wielofazowej struktur przepływu odbywało się w części przezroczystej kanału pomiarowego (3) o długości 0,5m, gdzie obserwowano już ustabilizowane formy przepływu. Transparentny, a zarazem obserwacyjny odcinek kanału pomiarowego został oświetlony dwiema lampami halogenowymi o mocy 150W każda, co umożliwiło wykonanie bardzo dobrej jakości archiwizacji danej struktury w formie zdjęć lub krótkich filmów rejestrujących przepływ wybranej struktury za pomocą aparatu cyfrowego firmy Canon 300D z czasem migawki 1/4000. Podczas przeprowadzania badań wykonywano po kilka zdjęć danej struktury przy danych strumieniach wszystkich czynników, a przy wybranych strumieniach rejestrowano także film obrazujący stan zachowania się danej struktury. Na podstawie zbioru wykonanych podczas pomiarów zdjęć i filmów oraz wartości napięcia na sondach pomiarowych, przeprowadzono analizę danych, co umożliwiło ocenę i specyfikację poszczególnych form pierścieniowego spływu oraz przepływu z fazą gazową, wody oraz różnych jakościowo olejów, w mieszaninie cieczy dwufazowej.

Pomiar udziałów objętościowych faz

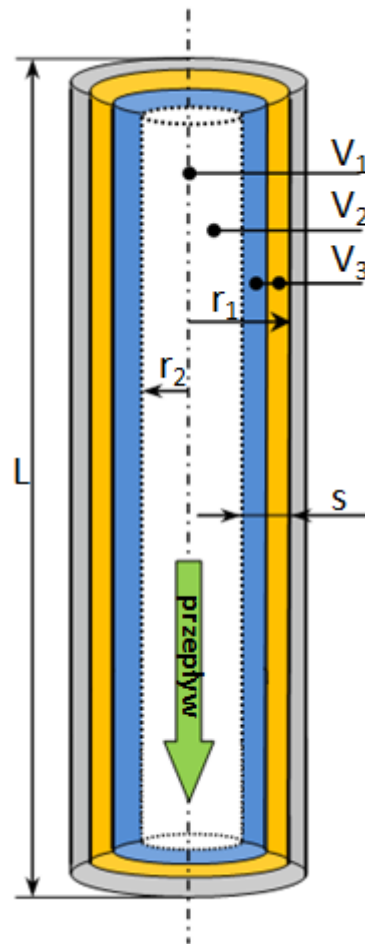
Mieszanina trójfazowa, opuszczając nieprzezroczysty odcinek kanału pomiarowego (10) przepływała do odcinka przezroczystego (obserwacyjnego) (3, 4), wyposażonego na jego początku i końcu w sprzężone ze sobą zawory kulowe (5) konstruujące tzw. „pułapkę”, czyli jedną z najlepszych metod służących do pomiaru rzeczywistych udziałów objętościowych faz przy przepływie wielofazowym wg [9]. Po szybkim zamknięciu zaworów odcinających (5), „zamknięta” w pułapce mieszanina cieczy gromadziła się w dolnej części kanału pomiarowego, a następnie za pomocą sprężonego powietrza wytłaczana była do cylindrów miarowych o znanej objętości, które stanowiły legalizacyjny osprzęt laboratoryjny o klasie dokładności 0,1, co dawało błąd pomiaru +/-1ml. W cylindrach tych, po grawitacyjnym rozdzielaniu się faz ciekłych odczytywano objętość oleju i wody wyrażoną w mililitrach. Zwykle, czas separacji wynosił dobę lub kilka dni (w zależności od lepkości użytych w badaniach olejów). W momencie, w którym kanał pomiarowy stanowił „pułapkę”, mieszanina trójfazowa przepływała tzw. „by-pass'em”, na którym także zamontowano zawór kulowy (7), który sprzężony z zaworami (5) zapewniał równoczesne zamknięcie przezroczystego kanału pomiarowego i otwarcie „by-pass'u” lub na odwrót. Znając objętość oleju i wody oraz całkowitą objętość kanału, możliwe było wyznaczenie udziału objętościowego fazy gazowej. Na rys. 5.5 przedstawiono schemat mechanizmu pułpkowego i układ pomiarowy udziałów objętościowych pojedynczych faz.



Rys. 5.5. Schemat mechanizmu pułapkowego i układ pomiarowy udziałów objętościowych poszczególnych faz

Grubość filmów cieczy

Pomiary grubości filmów poszczególnych cieczy oraz ich mieszaniny dwufazowej wyznaczano pośrednio, bazując na zmierzonych wartościach udziałów objętościowych faz ciekłych, w sposób przedstawiony na rys. 5.6, na podstawie którego obliczano grubości poszczególnych filmów cieczy przy danych wartościach strumieni przepływu każdej z faz. W celu określenia wpływu prędkości fazy gazowej i faz ciekłych na grubość płynącej warstwy cieczy, badania przeprowadzono dla spływu grawitacyjnego każdej z cieczy oraz ich przepływów z fazą gazową dla przepływu dwufazowego typu gaz-ciecz jak i przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz.



Rys. 5.6. Schemat obliczania grubości filmów poszczególnych cieczy;
 r_1 – promień rury, r_2 – promień wewnętrzny pierścienia cieczy, L – długość kanału pomiarowego, s – grubość filmu cieczy, V_1 – objętość całkowita kanału, V_2 – objętość fazy gazowej, V_3 – objętość cieczy

Korzystając z oznaczeń na rys. 5.6 i znając długość kanału pomiarowego oraz promień wewnętrzny rury, a także dysponując zmierzoną objętością każdej z faz ciekłych – „złapanych” metodą pułapkową, lokalną grubość filmów cieczy obliczano wg równania (5.1),

$$s = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot L}}, \quad (5.1)$$

w którym:

$$s = r_1 - r_2, \quad (5.2)$$

$$V_c = V_3 = V_1 - V_2, \quad (5.3)$$

$$V_c = (\pi \cdot r_1^2 \cdot L) - (\pi \cdot r_2^2 \cdot L), \quad (5.4)$$

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 - \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot L}}, \quad (5.5)$$

gdzie: s [mm], V_c [ml], L [mm].

5.2.3. Układ do pomiaru przewodności cieczy dwufazowej

Przemysłowe wykorzystanie przepływów wielofazowych wymaga obiektywnych metod przewidywania warunków ich przepływu [130], zwłaszcza w kontekście oceny określonych struktur przepływu. Jednym z mało docenianych sposobów diagnostyki jest wykorzystanie w takim przypadku zjawiska konduktywności do oceny charakteru przepływu mieszaniny cieczy wodno-olejowych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań własnych nad możliwością wykorzystania zjawiska przewodności elektrycznej, do określenia dominacji faz ciekłych przy trójfazowym przepływie mieszaniny powietrze – woda – olej. Każdy ze składników tej mieszaniny cechuje się odmiennymi od pozostałych cechami fizykochemicznymi [7, 42], co może być wykorzystane w ocenie stanu rozproszenia poszczególnych faz, z wykorzystaniem tego zjawiska.

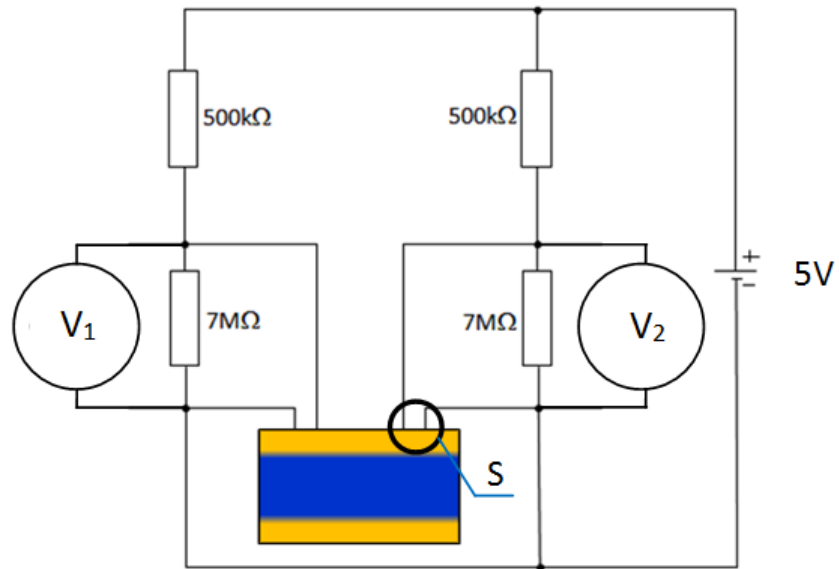
W zakresie badań własnych wykorzystano metodę pomiaru przewodności układu ciecz-ciecz do określenia dominacji poszczególnych faz ciekłych, zarówno w warunkach ich spływu grawitacyjnego jak i przepływu z fazą gazową. W przypadku tym, po stronie fazy ciekłej izolatorem jest faza olejowa a przewodnikiem woda. Badania prowadzono w rurze pionowej o średnicy wewnętrznej 12,5mm. Wykorzystano układ dwóch sond pomiarowych rozmieszczonych koncentrycznie w dwóch płaszczyznach ściany wykonanej z pleksiglasu.

Wartość spadku napięcia mierzono za pomocą karty pomiarowej firmy National Instruments współpracującej z oprogramowaniem DIAdem Evaluation Version. Badania przeprowadzono z udziałem różnych jakościowo olejów: Iterm 12, Iterm 30MF i L-AN 15.

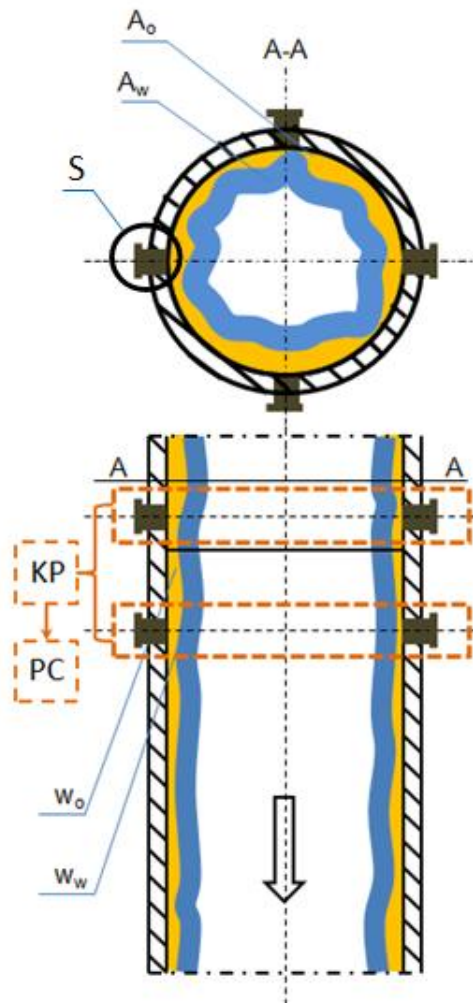
Na rys. 5.7 a) przedstawiono schemat elektryczny wykorzystywany w układzie pomiarowym przy określaniu konduktancji poszczególnych faz ciekłych przepływających w kanale, a na rys. 5.7 b) odpowiednio, przekrój kanału pomiarowego

z układem sond. Na kolejnych schematach przedstawiono obliczenia szacunkowych wartości napięcia możliwego do uzyskania, indywidualnie dla fazy olejowej i fazy wodnej. W przypadku wody tworzył się obwód szeregowo-równoległy, a w przypadku oleju tylko szeregowy. Ponieważ rezystancja oleju, jako izolatora była bardzo duża, stąd też pominięto ją w przedstawionych przykładowych obliczeniach.

a)

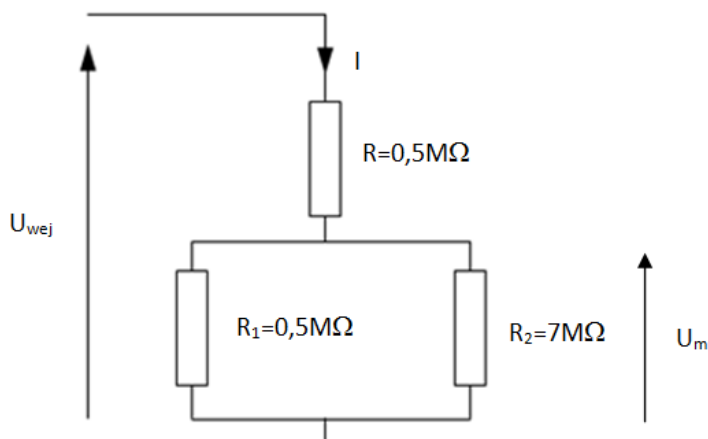


b)



Rys. 5.7. Układ pomiarowy: a) schemat elektryczny zastosowany do pomiaru konduktancji faz ciekłych, b) przekrój kanału pomiarowego z układem sond

a) Woda



U_{wej} – napięcie wejściowe
(zasilania)

$$U_{wej} = \left(R + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot I$$

U_m – napięcie mierzone

$$U_m = \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot I$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_{wej}}{R + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{U_{wej}}{R + R_z} \rightarrow U_{wej} = I \cdot (R + R_z)$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{U_m}{R_z} \rightarrow U_m = I \cdot R_z$$

Porównując stronami równania:

$$\frac{U_{wej}}{R + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{U_m}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} \rightarrow U_m = \frac{U_{wej} \cdot R_z}{R + R_z}$$

oraz podstawiając:

$$\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = R_z$$

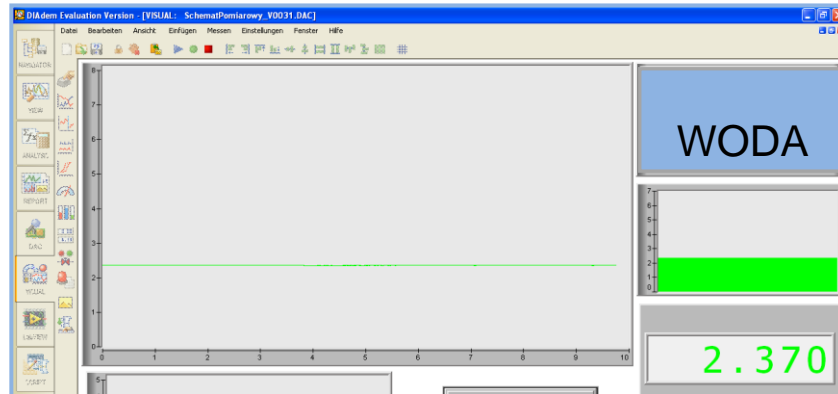
a następnie podstawiając dane liczbowe otrzymamy wartość napięcia mierzonego:

$$R_z = \frac{(0,5 \cdot 7) M\Omega}{0,5 M\Omega + 7 M\Omega} = 0,467 M\Omega$$

ostatecznie:

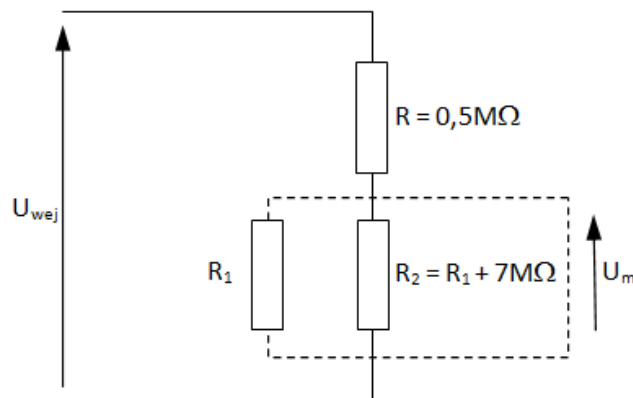
$$U_m = \frac{5V \cdot 0,467 M\Omega}{0,5 M\Omega + 0,467 M\Omega} = 2,4V$$

Na rys. 5.8a przedstawiono porównanie wyniku obliczeniowego z eksperymentalnym.



Rys. 5.8a. Programowe okno pomiarowe - porównanie wartości napięcia zmierzonego dla wody

b) Olej

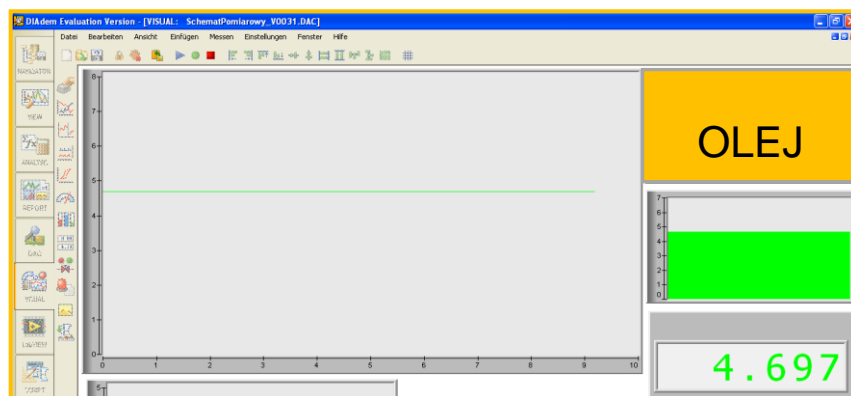


$$U_m = \frac{U_{wej} \cdot R_1}{R + R_1}$$

Podstawiając dane liczbowe otrzymamy ostatecznie wartość napięcia mierzonego:

$$U_m = \frac{5V \cdot 7M\Omega}{0,5M\Omega + 7M\Omega} = 4,7V$$

Ponizej porównano wynik obliczeniowy z eksperymentalnym.



Rys. 5.8b. Programowe okno pomiarowe - porównanie wartości napięcia zmierzonego dla oleju

Akwizycja danych pomiarowych

Do rejestracji wartości napięcia poszczególnych faz ciekłych przy przepływie cieczy dwufazowej zastosowano komputerowy system archiwizacji danych pomiarowych (17).

Sygnaly wyjściowe z sond elektrycznych (15) służących do określania obecności poszczególnej fazy ciekłej na ścianie kanału pomiarowego rejestrowane były za pomocą komputera, wyposażonego w 16 kanałową analogowo-cyfrową kartę pomiarową NI USB-6210 firmy National Instruments (16). Karta ta umożliwiała rejestrację sygnałów napięciowych w zakresie od (0 – 5)V. Pozostałe parametry w przepływie trójfazowym, takie jak np. strumień przepływu poszczególnych faz w mieszaninie wielofazowej archiwizowane były manualnie w oparciu o wskazania poszczególnych przepływomierzy (8, 9, 11), z uwagi na brak przetworników elektronicznych.

5.3. Zakres i metodyka badań

Badania własne przeprowadzono w szerokim zakresie zmian parametrów przepływowych przy całkowitym wykorzystaniu możliwości przepływowych i technicznych instalacji doświadczalnej. W trakcie badań tak dobierano zakresy zmian strumieni przepływu poszczególnych składników mieszaniny wielofazowej, aby otrzymać zarówno laminarny jak i burzliwy charakter ich przepływu. Zakres zmian parametrów przepływowych dla przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej przedstawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3

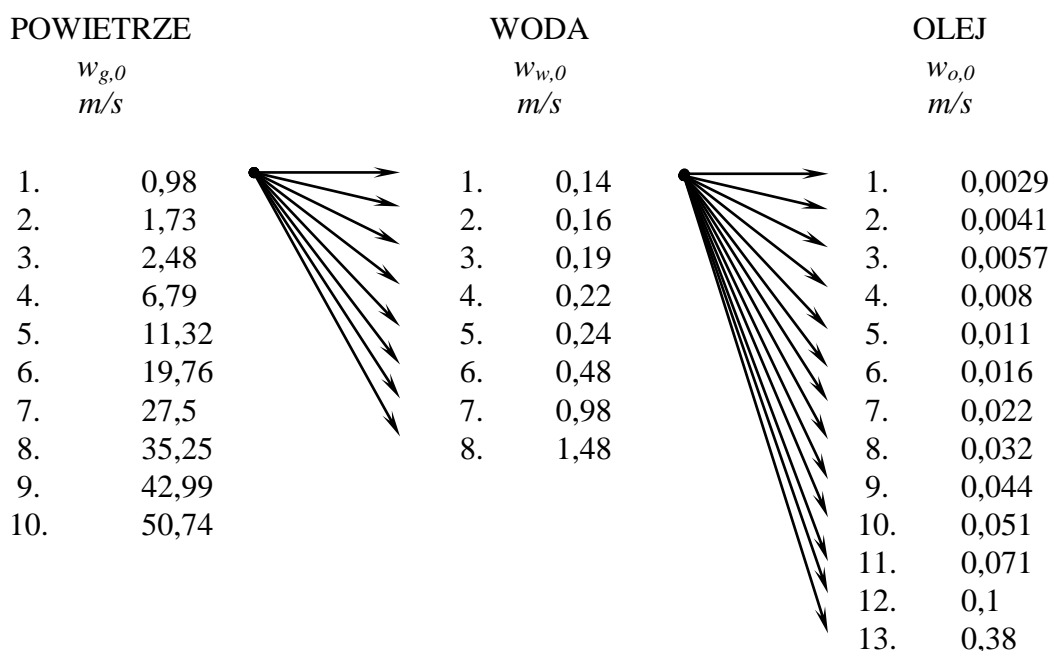
Zakres zmian parametrów przepływowych mieszaniny wielofazowej

Składnik mieszaniny	Strumień przepływu	Prędkość pozorna	Liczba Reynoldsa	Włotowy udział objętościowy faz
	V_i	$w_{i,0}$	Re_i	ε_i
	m^3/h	m/s	-	-
Powietrze	(0 – 36,1)	0 ÷ 81,7	206,13 ÷ 38710,3	0,1 ÷ 0,99
Woda	(0,007 – 1,1)	0,02 ÷ 2,5	181,5 ÷ 2632	0,095 ÷ 0,98
Olej L-AN 15	(0,012 ÷ 0,33)	0,028 ÷ 0,75	11,5 ÷ 300,75	0,027 ÷ 0,94
Olej Iterm 6Mb *	(0,00096 ÷ 0,33)	0,0022 ÷ 0,75	0,30 ÷ 110,47	0,024 ÷ 0,9
Olej Iterm 12	(0,001 ÷ 0,17)	0,0028 ÷ 0,22	0,12 ÷ 20,11	0,0086 ÷ 0,94
Olej Iterm 30MF	($7,31 \cdot 10^{-5}$ ÷ 0,022)	(0,000165 ÷ 0,05)	0,0007 ÷ 12,05	0,0017 ÷ 0,7

* badania wykonano tylko dla przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz w warunkach spływu grawitacyjnego, ze względu na znaczną emulgację tego składnika mieszaniny przy wzroście jej prędkości, spowodowanej fazą gazową

W oparciu o wyniki pomiarów temperatur na wlocie do kanału oraz w zbiornikach wody i oleju uwzględniano je przy obliczeniach właściwości fizycznych czynników roboczych, wykorzystując właściwe charakterystyki zmian właściwości każdego z użytych olejów, natomiast dla wody i powietrza korzystano z danych zawartych w tablicach procesowych [131]. Badania przepływu wielofazowego polegały na określaniu struktur przepływu i pomiarze udziałów objętościowych faz z jednoczesnym określeniem wartości przewodności elektrycznej poszczególnych faz ciekłych, zarówno przy spływie grawitacyjnym dwóch cieczy niemieszających się, jak i ich przepływie z gazem. Grubość filmu cieczy określono pośrednio, z wykorzystaniem wartości udziału objętościowego wody i oleju.

Badania przepływu mieszaniny trójfazowej w kanale pionowym przeprowadzono dla dziesięciu stałych wartości strumienia przepływu powietrza, dla których wykonano pomiary dla ośmiu i trzynastu stałych wartości strumienia przepływu odpowiednio różnych olejów i wody. Na rys. 5.9 przedstawiono wybrany algorytm zmian prędkości przepływu składników mieszaniny trójfazowej dla poszczególnych punktów pomiarowych, opisane jako prędkości pozorne każdej z faz w mieszaninie trójfazowej.



Rys. 5.9. Przykładowy schemat doboru prędkości przepływu składników mieszaniny trójfazowej

W toku badań, po nastawieniu zaplanowanych strumieni przepływu poszczególnych składników mieszaniny trójfazowej obserwowano i ewentualnie poprawiano wskazania przepływomierzy sterowanych manualnie, w celu zapewnienia stałych wartości strumieni. Po ustaleniu się przepływu dokonywano jednoczesnego odczytu wskazań przepływomierzy, zapisywano temperaturę poszczególnych czynników, obserwowano i rejestrowano za pomocą aparatu bądź kamery cyfrowej tworzące się struktury przepływu oraz mierzono wartości rzeczywistych udziałów objętościowych faz. Ponadto, przy przepływie dwóch cieczy tj. wody i wybranego oleju dokonywano określenia dominacji faz, wykorzystując przyrząd do określania przewodności elektrycznej wpływających składników mieszaniny dwufazowej. Otrzymane wartości napięcia zapisywano w programie DIAdem, a w razie konieczności również w arkuszu kalkulacyjnym. Dla określonych wartości parametrów przepływowych wykonywano po trzy pomiary, a następnie po weryfikacji zapisywano jeden właściwy punkt pomiarowy. Każdy pomiar trwał (w zależności od właściwości fizycznych olejów wykorzystanych w badaniach) od (10 – 90) sekund. Po wykonaniu serii zaplanowanych badań dokonywano ich weryfikacji w celu wyeliminowania znacznych odstępstw od założonych nastawień przepływomierzy. Ogółem, uzyskano około 10 000 punktów pomiarowych.

Badania hydrodynamiki przepływu mieszaniny wielofazowej w kanale pionowym przeprowadzono w zakresie zmian strumieni przepływu powietrza, wody i czterech różniących się pod względem lepkości olejów, warunkujących otrzymanie obszernego zakresu zmian struktur przy spływie grawitacyjnym oraz przepływie dwu- i trójfazowym.

6. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

6.1. Struktury i mapy opadającego przepływu wielofazowego w kanale pionowym

Podczas realizacji badań własnych diagnozowano występowanie znacznej ilości zróżnicowanych form przepływu wielofazowego. Zróżnicowanie to, związane było z szerokim zakresem zmian wartości strumieni przepływu każdej z faz występujących w badaniach, czyli powietrza, wody i oleju. Ponieważ badania tego typu charakteryzowały się dużą dynamiką przepływu, zatem celem miarodajnego opisu tworzących się struktur przepływu, zarówno typu ciecz-ciecz jak i gaz-ciecz-ciecz prowadzono jednocześnie obserwacje wizualne oraz dokonywano zapisu danej struktury przepływu w postaci zdjęć i filmów za pomocą aparatu cyfrowego. Dodatkowo, każdy pomiar uzupełniano wynikami badań konduktywności celem określenia charakteru przepływu mieszaniny cieczy wodno-olejowych. Diagnostyka ta, służyła określeniu dominacji poszczególnych faz ciekłych w przepływie. W przypadku tym, po stronie fazy ciekłej izolatorem była faza olejowa, a przewodnikiem woda.

Celem dokładnego opisanie zidentyfikowanych w trakcie badań struktur przepływu wielofazowego zastosowano trójczłonowe nazewnictwo, za autorką pracy [9], w której pierwszy człon nazwy określał charakter struktury przepływu mieszaniny typu gaz-ciecz (np. A – pierścieniowa), drugi człon odnosił się do struktury przepływu cieczy rozproszonej (np. D – dyspersja), a trzeci człon wskazywał na rodzaj składnika rozproszonego i ciągłego czyli takiego, który dominował w przepływie (np. O/W – olej w wodzie).

6.1.1. Przepływ dwufazowy ciecz-ciecz

➤ Struktury przepływu




Podczas badań własnych spływu cieczy wodno-olejowej w kanale pionowym, zidentyfikowano siedem podstawowych struktur przepływu: po trzy struktury z dominującą fazą wodną i olejową oraz jedną strukturę pośrednią, której emulsyjny charakter przepływu sprawiał, że zaliczono ją do struktury pośredniej typu (W+O).

W tabeli 6.1 zamieszczono zidentyfikowane podczas badań własnych struktury opadającego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz, właściwe dla przypadku

dominacji fazy wodnej w przepływie. Natomiast w tabeli 6.3 zawarto fotografie struktur odpowiednie dla przypadku przepływu, w którym dominowała faza olejowa. Dwie kolejne tabele (6.2 i 6.4) zawierają opis charakterystyk każdej ze struktur przepływu dwufazowego, osobno dla przepływu z dominującą fazą wodną oraz olejową. Z kolei, w tabeli 6.8 przedstawiono odrębną strukturę przepływu o charakterze emulsji, przy której nie można było jednoznacznie stwierdzić, która z faz dominowała w przepływie. W tabeli tej, przedstawiono także szczegółowy opis zaobserwowanej podczas badań własnych struktury.

Tabela 6.1

Struktury opadającego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz z dominacją fazy wodnej

Struktura przepływu		
DOMINUJĄCA FAZA WODNA (O/W)		
		
DrDO/W	FDO/W	DO/W

Dodatkowe uzupełnienie opisu poszczególnej struktury przepływu stanowiła zamieszczona w tabelach 6.6 i 6.7 charakterystyka napięciowa, która w sposób obiektywny potwierdzała występowanie określonej fazy ciekłej na ścianie kanału, co w sposób wyczerpujący uzupełniało prowadzone obserwacje wizualne danej struktury występującej w przepływie. W tabelach tych umieszczono także schematy zidentyfikowanych w trakcie badań własnych struktur przepływu z odpowiednim podziałem dotyczącym dominacji każdej z faz.

Tabela 6.2

Klasyfikacja struktur opadającego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz z dominacją fazy wodnej


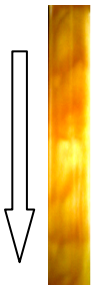

Symbol struktury	Charakterystyka struktury
DOMINUJĄCA FAZA WODNA (O/W)	
DrDO/W	Kroplo-dyspersyjna oleju w wodzie
	Faza wodna wypełniała większą część kanału pomiarowego i pozostawała w stałym kontakcie ze ścianką kanału. Olej płynął (w zależności od koncentracji w mieszaninie cieczy) w postaci pojedynczych kropelek lub skupiska dużej ilości mniejszych kropelek. Przy niskiej koncentracji fazy olejowej w przepływie i niskich prędkościach fazy wodnej, olej płynął w mieszaninie cieczy w postaci większych, odrębnych kropelek. Natomiast wzrost prędkości przepływu wody oraz stopnia koncentracji oleju w mieszaninie ciekłej powodował powstawanie większej ilości kropelek oleju, ale o mniejszej średnicy.
FDO/W	Pianowo-dyspersyjna oleju w wodzie
	Woda była fazą dominującą w przepływie i pojawiała się przy ścianie kanału. Zawierała także drobne kropelki oleju. Ze względu na intensywny i oscylacyjny charakter przepływu mieszaniny cieczy, tworząca się struktura przybierała cechy piany. Na powierzchni cienkiej warstwy filmu wody znajdującej się przy ścianie kanału obserwowano pojawiające się drobne fale, które zaburzały powierzchnię spływającej warstwy wody.
DO/W	Dyspersyjna oleju w wodzie
	Zdyspergowana mieszanina oleju i wody przepływała przy ścianie kanału. Charakter przepływu był dynamiczny, co powodowało, że mieszanina cieczy płynęła z dużą prędkością, co wpływało na ulokowanie mieszaniny faz ciekłych na ścianie kanału. Przy ścianie kanału występowała również w formie pierścienia cienka warstewka samej wody, o niższym stopniu zafalowania, której grubość uzależniona była od prędkości przepływu obu faz ciekłych w przepływie.

Tabela 6.3

Struktury opadającego przepływu dwufazowego typu ciec-ciecz z dominującą fazą olejową

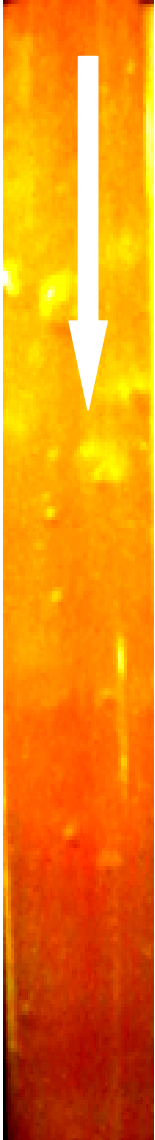


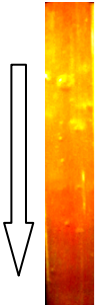
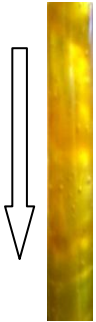

Struktura przepływu		
DOMINUJĄCA FAZA OLEJOWA (W/O)		
		
DrDW/O	IDW/O	DW/O

Tabela 6.4

Klasyfikacja struktur opadającego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz z dominacją fazy olejowej

Symbol struktury	Charakterystyka struktury
DOMINUJĄCA FAZA OLEJOWA (W/O)	
DrDW/O	Kroplowo-dyspersyjna wody w oleju
	<p>Olej płynął przy ścianie kanału oraz wypełniał go w znacznej objętości. Zawierał także krople wody o zróżnicowanym rozmiarze, które przy opadającym przepływie w kanale pionowym były „porywane” przez ciągłą fazę olejową. W zależności od koncentracji w mieszaninie cieczy krople wody miały postać większych, pojedynczych kropelek lub mniejszych i drobniejszych kropelek.</p>
IDW/O	Przerywano-dyspersyjna wody w oleju
	<p>Struktura taka, powstawała przy niskich prędkościach przepływu ciągłej fazy olejowej i niewielkim udziale fazy wodnej w postaci licznych, drobnych kropelek. Powstające obszary wodno-olejowe naprzemiennie występowały na ścianie kanału. Ponieważ przepływ nie był zbyt intensywny, można było zauważyć, dosyć dobrze odgraniczone obszary poszczególnych cieczy, zarówno oleju jak i wody.</p>
DW/O	Dyspersyjna wody w oleju
	<p>Zdyspergowana mieszanina cieczy płynęła przy ścianie kanału pomiarowego w formie pierścienia o różnym zafalowaniu. Na ścianie kanału występowała także cienka warstewka oleju. Podczas takiego przepływu mieszanina cieczy stawała się prawie nieprzezroczysta przypominając emulsję o charakterze „płynnego masła”.</p>

Ponieważ w badaniach własnych wykorzystano metodę pomiaru przewodności układu ciecz-ciecz do określania dominacji poszczególnych faz ciekłych dla przepływu dwufazowego olej-woda, stąd celem wprowadzenia zasadności stosowania wymienionej metody a także przykładu, w tabeli 6.5 przedstawiono rzeczywiste

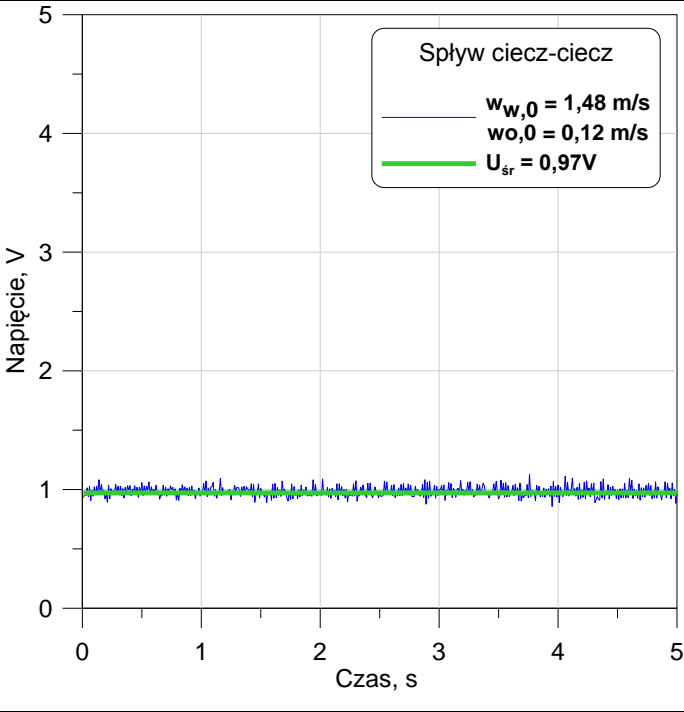

charakterystyki zmian napięcia dla przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz. Charakterystyki te odpowiadają przepływowi:

- z dominacją fazy wodnej;
- emulsji – przypadek, w którym nie można było jednoznacznie określić, która z faz ciekłych dominuje w przepływie;
- z dominacją fazy olejowej.

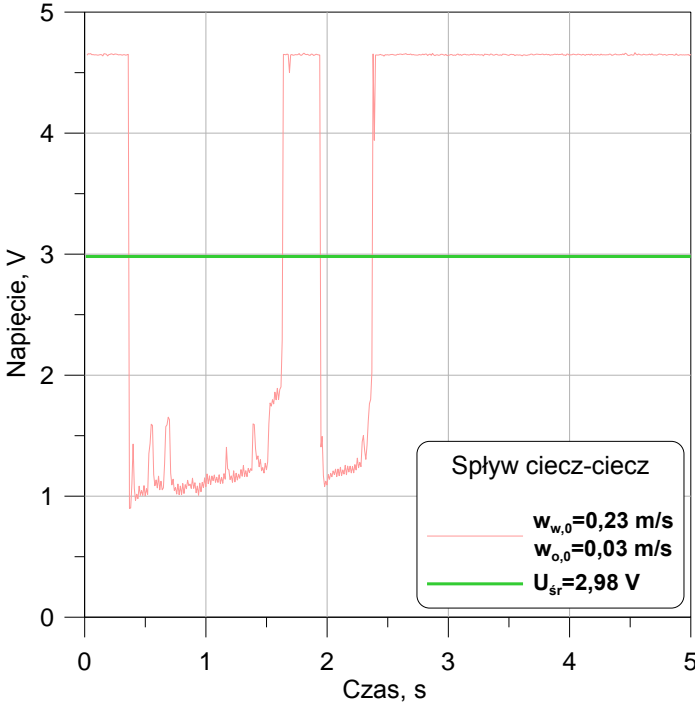

Na przebiegach załączonych charakterystyk napięciowych zaznaczono także średnie wartości napięcia.

Tabela 6.5

Rzeczywiste przebiegi zmian napięcia przy przepływie ciecz-ciecz

DOMINUJĄCA FAZA WODNA (O/W)	Schemat struktury
 <p style="text-align: center;">Spływ ciecz-ciecz</p> <ul style="list-style-type: none"> — $w_{w,0} = 1,48 \text{ m/s}$ — $w_{o,0} = 0,12 \text{ m/s}$ — $U_{sr} = 0,97 \text{ V}$ 	
<p>Charakterystyka napięciowa odpowiadała sytuacji, kiedy miał miejsce przepływ cieczy dwufazowej z dominującą fazą wodną. Wartość napięcia była minimalna, na poziomie około 1V i pozostawała stała w tym zakresie. Przebieg taki jednoznacznie wskazywał na obecność wody na ścianie kanału pomiarowego. Wartość minimalna napięcia dla wody wahała się zawsze w zakresie od około (1 – 2)V. Zakres ten był zmienny, w zależności od aktualnego składu elektrolitycznego wody pobieranej do badań.</p>	

cd. tabeli 6.5

EMULSJA (O+W)	Schemat struktury
	
<p>Charakterystyka napięciowa odpowiadała sytuacji, kiedy zachodził przepływ emulsji. Emulsja była rodzajem przepływu, w którym nie można było jednoznacznie stwierdzić, która z faz była fazą dominującą w przepływie. Charakter przepływu był dynamiczny i następowało silne emulgowanie się mieszaniny dwufazowej. Struktura taka tworzyła się przy dużych strumieniach przepływu obu czynników roboczych oraz porównywalnych wartościach udziałów objętościowych faz. Charakterystyka napięciowa wahała się w zakresie od około (1 – 4,6)V, czyli w zakresach odpowiadających zarówno dominacji wody, jak i oleju, co powodowało znaczne trudności w ocenie dominacji faz. Średnia wartość napięcia pozostawała na poziomie około 3V.</p>	

cd. tabeli 6.5

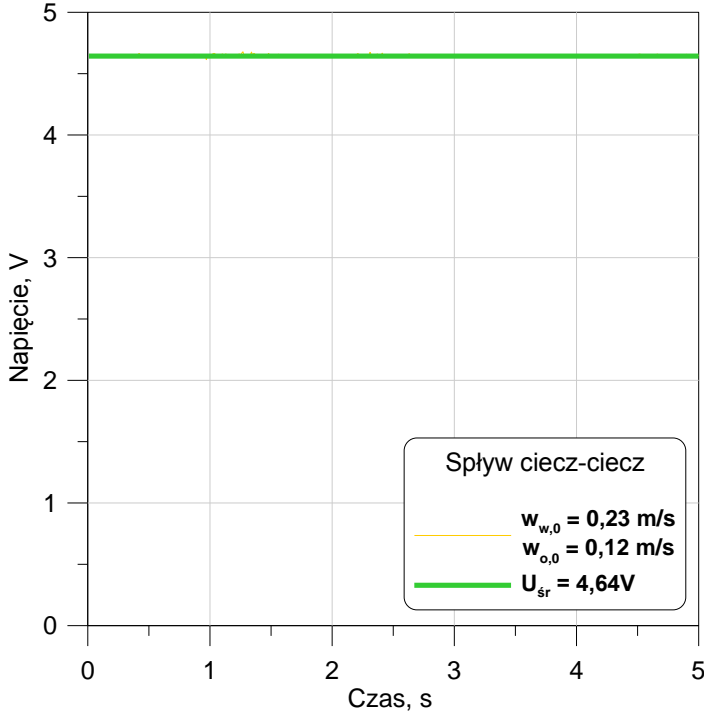
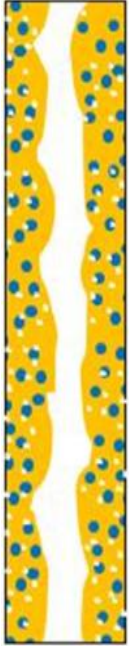

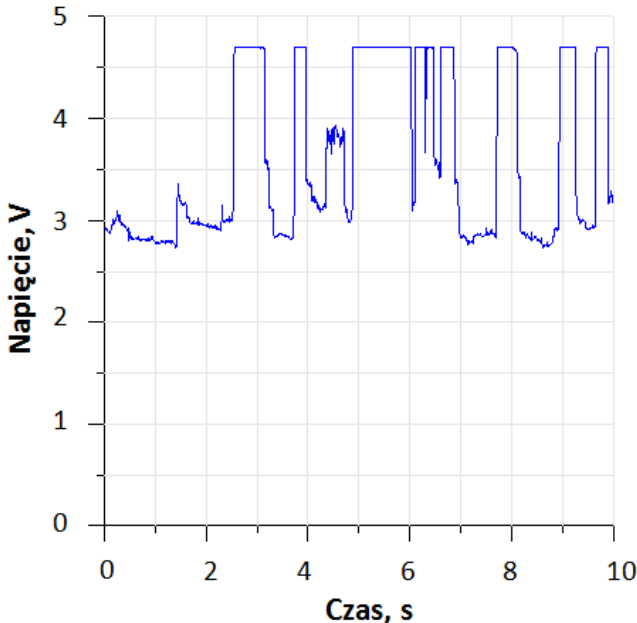
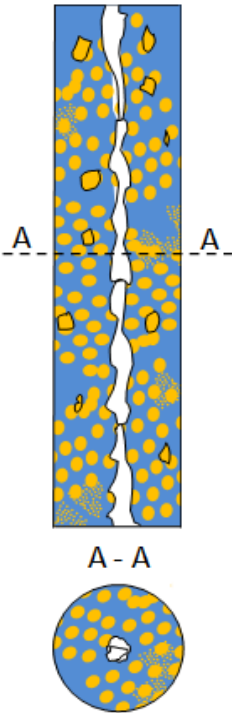
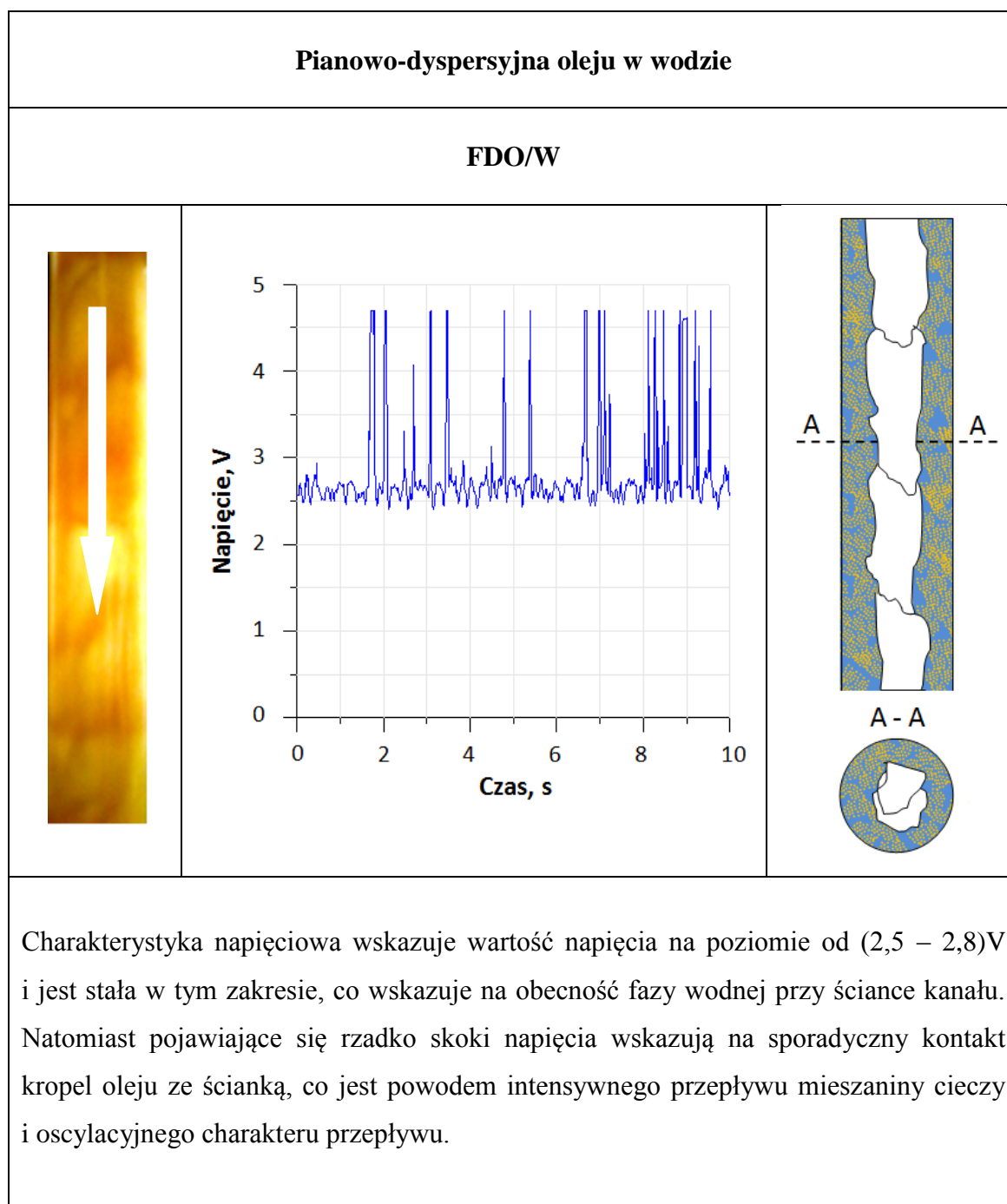
DOMINUJĄCA FAZA OLEJOWA (W/O)	Schemat struktury
 <p data-bbox="347 383 1054 1093">Sptyw ciecz-ciecz</p> <ul data-bbox="758 884 1029 985" style="list-style-type: none">$w_{w,0} = 0,23 \text{ m/s}$$w_{o,0} = 0,12 \text{ m/s}$$U_{sr} = 4,64\text{V}$	
<p data-bbox="263 1171 1406 1429">Charakterystyka napięciowa odpowiadała sytuacji, kiedy w przepływie dominowała faza olejowa i to ona występowała na ścianie kanału pomiarowego. Wartość napięcia osiągała maksymalną granicę dla oleju, czyli około 4,6V i również pozostawała stała w tym zakresie. Również wartość średnia napięcia kształtowała się na poziomie równym z wartością odpowiadającą przebiegowi rzeczywistemu.</p>	

Tabela 6.6

Struktury opadającego przepływu dwufazowego woda-olej z dominującą fazą wodną

DOMINUJĄCA FAZA WODNA (O/W)		
Kroplo-dyspersyjna oleju w wodzie		
DrDO/W		
Fotografia struktury	Charakterystyka napięciowa	Schemat struktury
		
<p>Charakterystyka napięciowa wskazuje znaczne wahania, od wartości minimalnej dla wody (ok. 2,7V) do wartości maksymalnej, charakterystycznej dla oleju (ok. 4,7V). Wartość napięcia w trakcie przepływu pozostaje w granicach od (2,75 – 3,25)V, co wskazuje na dominację fazy wodnej, natomiast skoki napięcia do wartości 4,7V wskazują na przepływ kropelek oleju w ciągłej fazie wodnej.</p>		



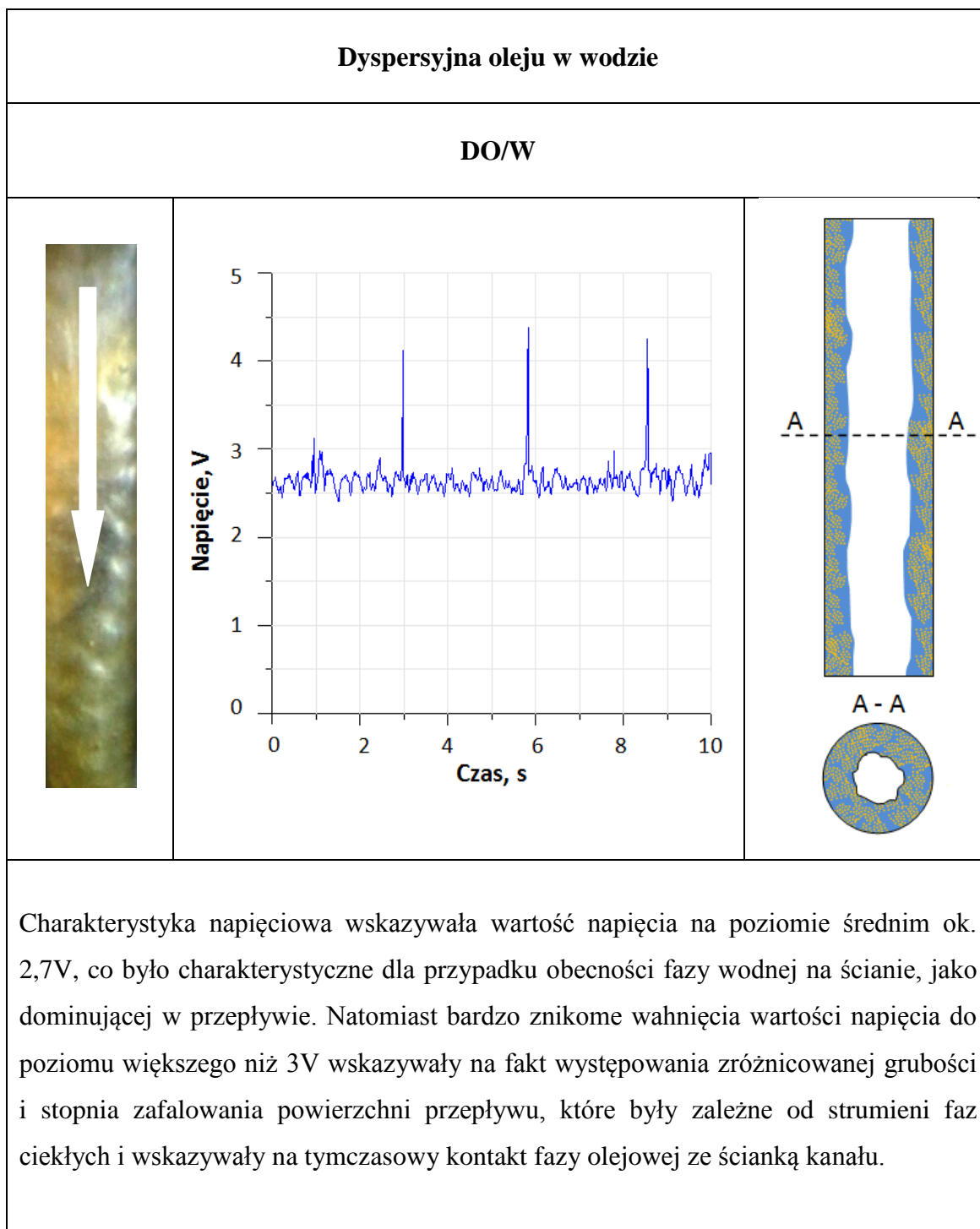
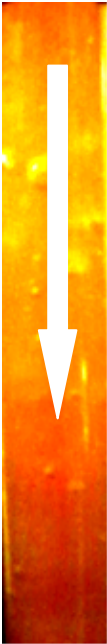
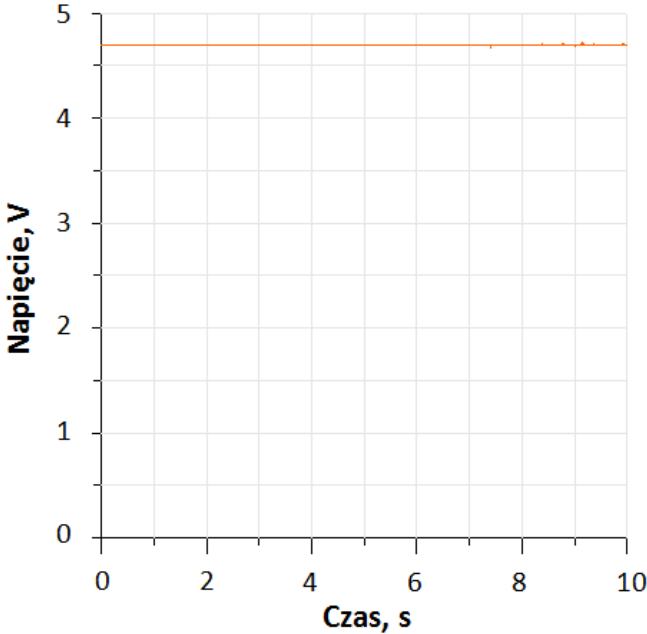
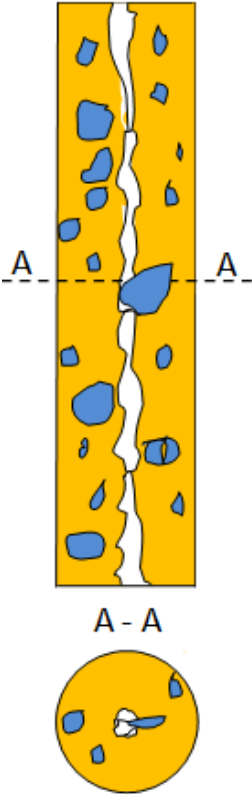
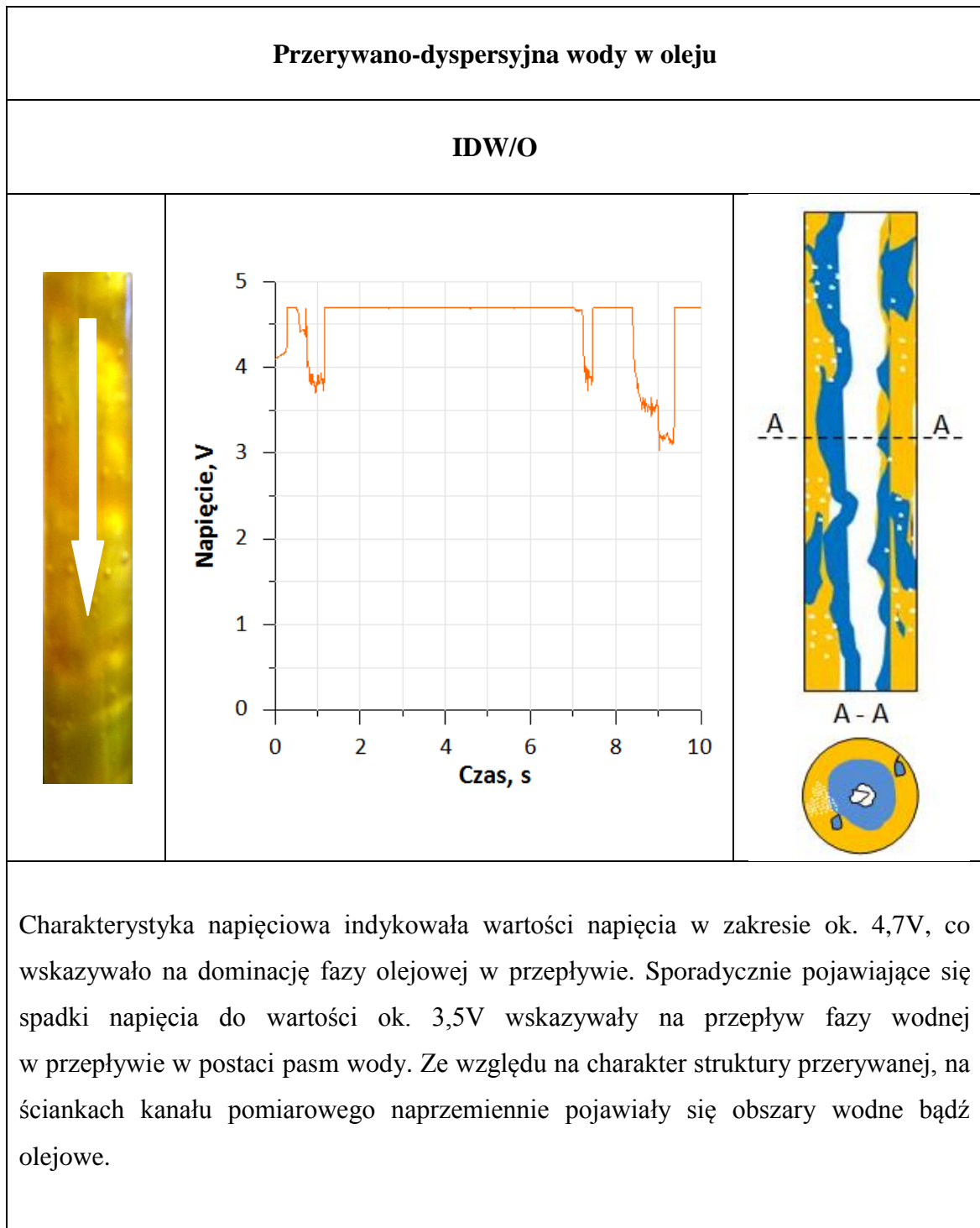


Tabela 6.7

Struktury opadającego przepływu dwufazowego woda-olej z dominującą fazą olejową

DOMINUJĄCA FAZA OLEJOWA (W/O)		
Kroplo-dyspersyjna wody w oleju		
DrDW/O		
Fotografia struktury	Charakterystyka napięciowa	Schemat struktury
		
<p>Charakterystyka napięciowa wskazywała na wartość napięcia rzędu ok. 4,7V, co potwierdza fakt, że olej był fazą dominującą w przepływie. Natomiast nieznaczne wahnięcia wartości napięcia wskazywały, że w przepływie pojawiały się nieliczne krople wody, których obecność powodowała nieznaczny spadek wartości napięcia.</p>		



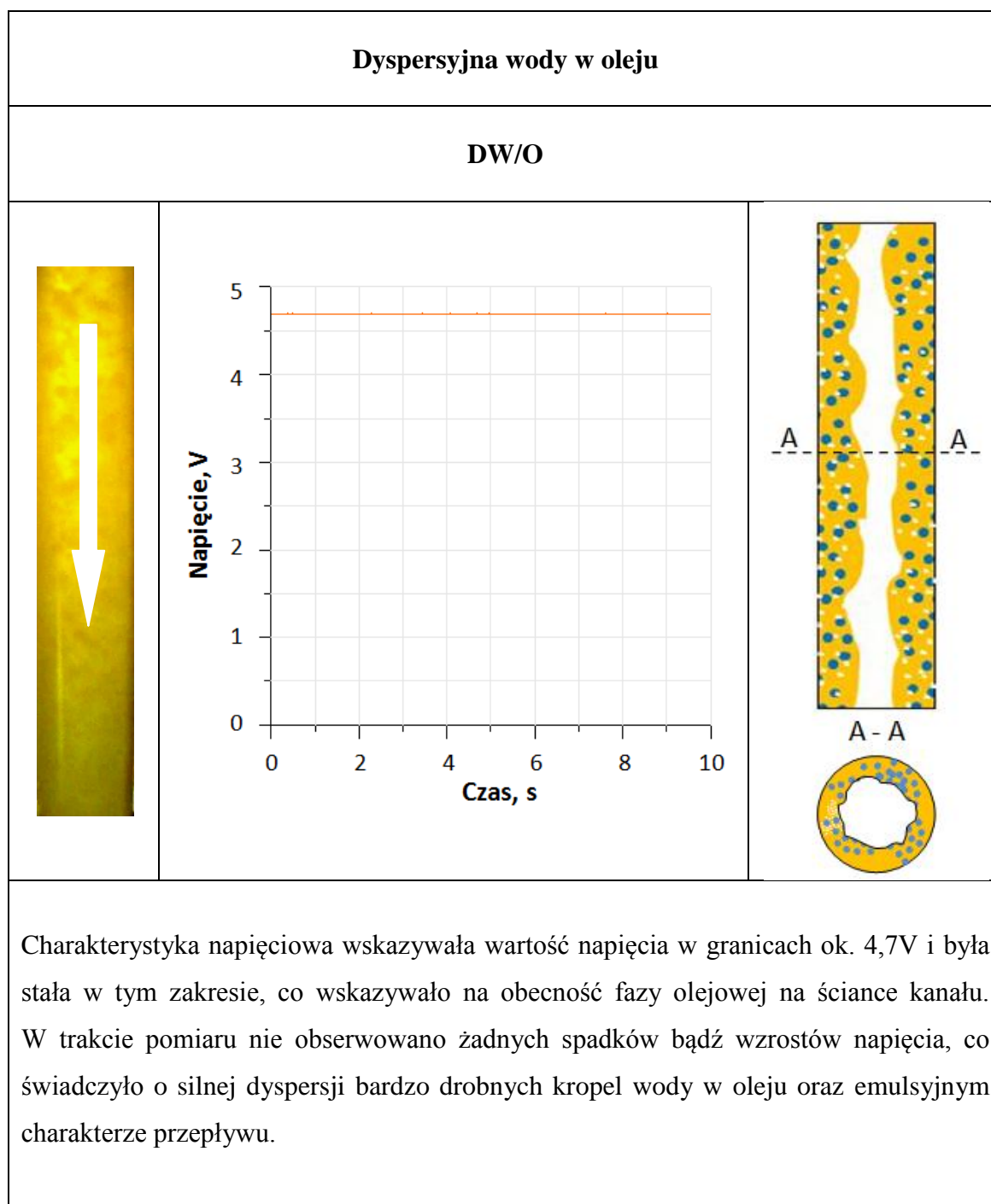
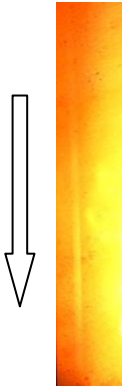

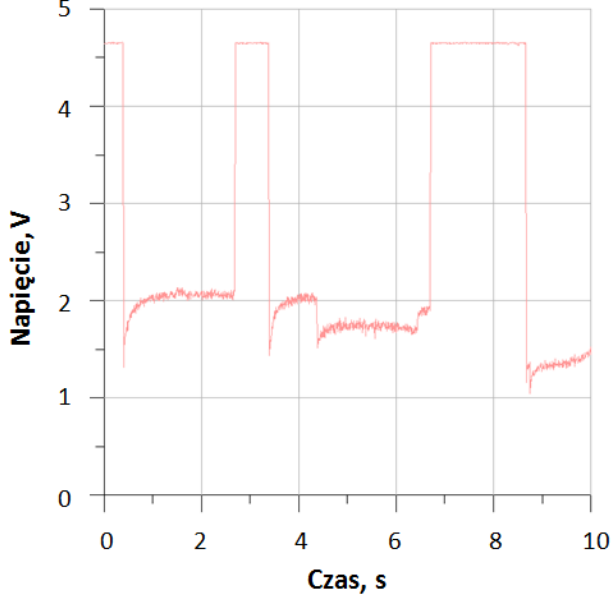
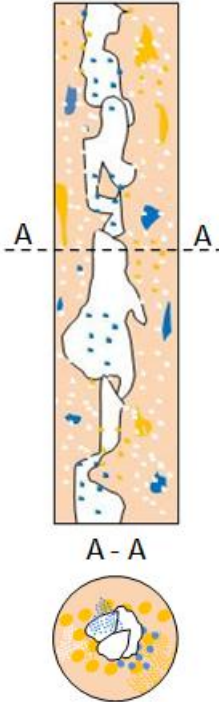


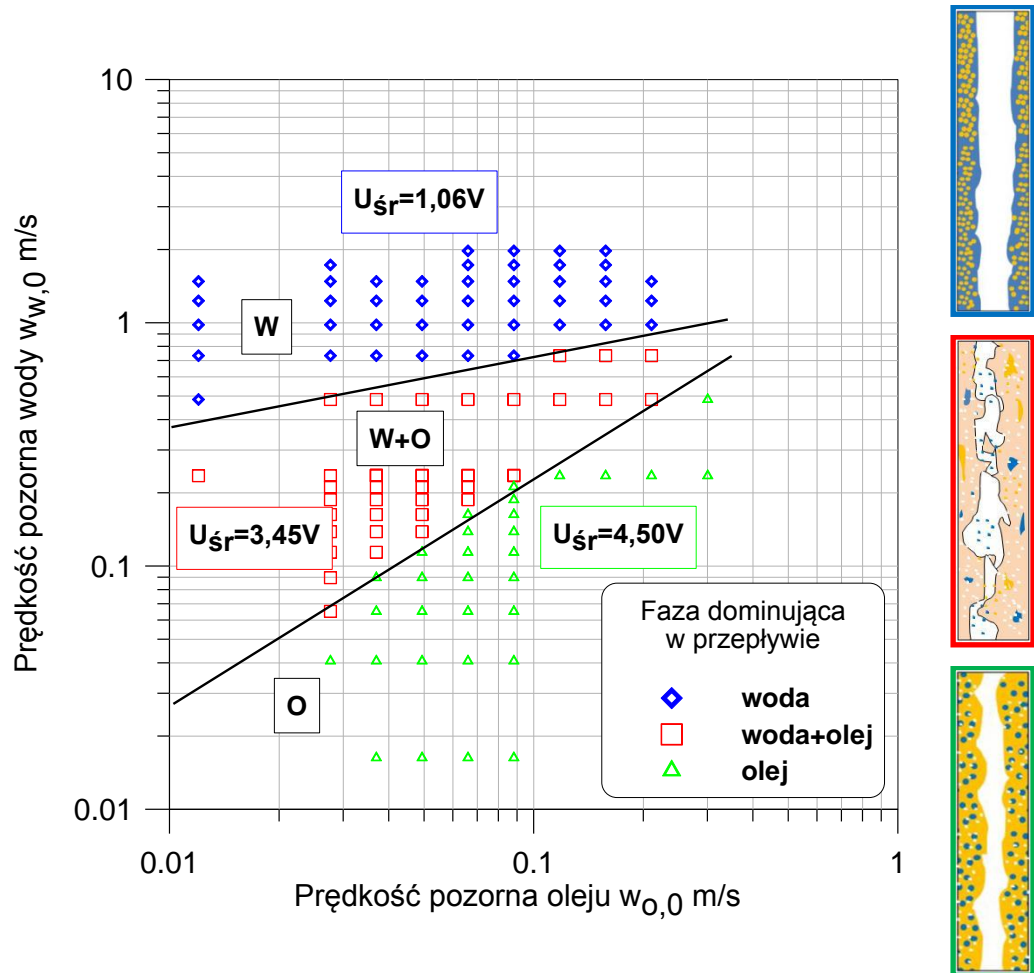
Tabela 6.8

Struktura opadającego przepływu dwufazowego o charakterze emulsji typu woda-olej

Symbol struktury	Charakterystyka struktury	
EMULSJA (W+O)		
E(W+O)	Emulsja wody i oleju	
	Emulsja była rodzajem przepływu, w którym nie można było jednoznacznie stwierdzić, która z faz była fazą dominującą w przepływie. Charakter przepływu był dynamiczny i następowało silne emulgowanie się mieszaniny dwufazowej. Struktura taka tworzyła się przy dużych strumieniach przepływu obu czynników roboczych oraz porównywalnych wartościach udziałów objętościowych faz. Obserwacje wizualne były także utrudnione, ponieważ struktura miała cechy „płynnego masła”.	
Fotografia struktury	Charakterystyka napięciowa	Schemat struktury
		
Charakterystyka napięciowa wahała się w zakresie od około (1 – 4,6)V, czyli w zakresach odpowiadających zarówno dominacji wody, jak i oleju, co powodowało znaczne trudności w ocenie dominacji faz. Średnia wartość napięcia pozostawała na poziomie około 3V.		

➤ **Mapa opadającego przepływu dwufazowego ciecz-ciecz**

Wykonana ocena struktur przepływu, zarówno o obserwacje wizualne, jak i z wykorzystaniem metody konduktancji faz ciekłych oraz przedstawiona na tej podstawie klasyfikacji struktur umożliwiła opracowanie mapy przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz. Aby opracować mapę przepływu dwufazowego, przy każdym pomiarze (w zależności od strumienia poszczególnych faz) opisywano powstałą strukturę oraz dokonywano pomiaru wartości napięcia, które charakteryzowało określoną formę przepływu. Następnie, w oparciu o zapisane dane doświadczalne, punkty pomiarowe naniesiono na wykres w określonym układzie współrzędnych. Przedstawiona w pracy mapa (rys. 6.1), sporządzona została w oparciu o układ współrzędnych odpowiadający prędkości pozornej oleju oraz prędkości pozornej wody.



Rys. 6.1. Mapa opadającego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz,
 U_{sr} - średnia wartość napięcia

Nowo opracowana mapa przepływu dwufazowego woda-olej ilustruje obszary dominacji poszczególnych faz ciekłych w przepływie, tj. obszary z dominacją fazy wodnej, olejowej oraz przypadek, w którym przepływ faz cechuje charakter przerywany lub emulsyjny, czyli struktura, której charakter nie pozwala jednoznacznie określić, która z faz jest fazą dominującą w przepływie. Na mapie tej podano także wartość średniego napięcia w danym obszarze przepływu.

Rozpatrując rozkład punktów eksperymentalnych na zaprezentowanej mapie zauważyć można, że elementarne punkty charakterystyczne dla określonych struktur przepływu, tworzą ściśle skupiska punktów, co umożliwia wykreślenie granic odznaczających zakresy ich pojawiania się. Rozmieszczenie punktów na wykresie oraz linii granicznych uwidacznia, że ich lokalizacja zależy od strumieni przepływu poszczególnych faz w przepływie, oraz wartości udziałów objętościowych wody i oleju w mieszaninie cieczy. Przy wysokim udziale objętościowym oleju i jego niskich prędkościach przepływu, olej płynął przy ścianie kanału oraz wypełniał go w znacznej objętości. Zawierał także krople wody o zróżnicowanym rozmiarze, które przy opadającym przepływie w kanale pionowym były „porywane” przez ciągłą fazę olejową. W zależności od koncentracji w mieszaninie cieczy krople wody miały postać większych, pojedynczych kropelek lub mniejszych i drobniejszych kropelek. Charakterystyka napięciowa wskazywała wartość napięcia w granicach ok. 4,7V i była stała w tym zakresie, co wskazywało na obecność fazy olejowej na ścianie kanału. W trakcie pomiaru nie obserwowano żadnych spadków bądź wzrostów napięcia, co świadczyło o silnej dyspersji bardzo drobnych kropelek wody w oleju oraz emulsyjnym charakterze przepływu. W miarę wzrostu strumienia przepływu fazy wodnej w mieszaninie cieczy następowało tworzenie się struktur przepływowych i emulsji. W przypadku tym, emulsja była rodzajem przepływu, w którym nie można było jednoznacznie stwierdzić, która z faz była fazą dominującą w przepływie. Charakter przepływu był dynamiczny i następowało silne emulgowanie się mieszaniny dwufazowej. Struktura taka tworzyła się przy dużych strumieniach przepływu obu czynników roboczych oraz porównywalnych wartościach udziałów objętościowych faz. Obserwacje wizualne były także utrudnione, ponieważ struktura miała cechy „płynnego masła”. Charakterystyka napięciowa przy strukturach przerywanych i emulsyjnych wahała się w zakresie od około (1 – 4,6)V, czyli w zakresach odpowiadających zarówno dominacji wody, jak i oleju, co powodowało znaczne trudności w ocenie dominacji faz.

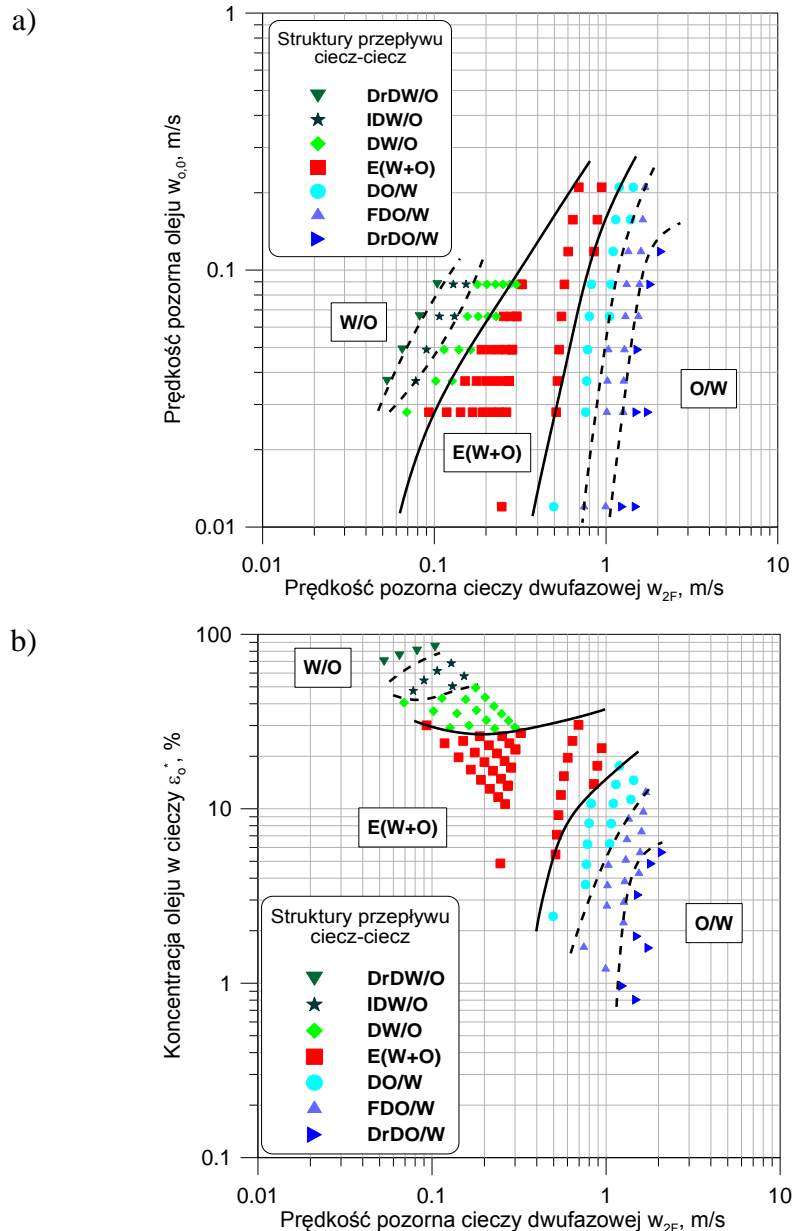
Średnia wartość napięcia pozostawała na poziomie około 3V. Przy dalszym wzroście strumienia przepływu fazy wodnej, a przy stopniowo zmniejszającym się udziale fazy olejowej w przepływie, następowała inwersja przepływu i dominacja wody. W przypadku takim faza wodna wypełniała większą część kanału pomiarowego i pozostawała w stałym kontakcie ze ścianką kanału. Olej płynął (w zależności od koncentracji w mieszaninie cieczy) w postaci pojedynczych kropelek lub skupiska dużej ilości mniejszych kropelek. Przy niskiej koncentracji fazy olejowej w przepływie i niskich prędkościach fazy wodnej, olej płynął w mieszaninie cieczy w postaci większych, odrębnych kropelek. Natomiast wzrost prędkości przepływu wody oraz stopnia koncentracji oleju w mieszaninie cieczowej powodował powstawanie większej ilości kropelek oleju, ale o mniejszej średnicy.

Z kolei, na rys. 6.2a, przedstawiono mapę opadającego przepływu dwufazowego woda-olej z zaznaczeniem obszarów występowania poszczególnych rodzajów struktur przepływu w danym zakresie dominacji poszczególnych faz ciekłych. Na mapie tej, na osi rzędnych umiejscowiono prędkość pozorną oleju, a na osi odciętych sumę prędkości pozornych obu faz ciekłych występujących w przepływie, czyli prędkość pozorną wody i oleju. Z przedstawionej na rys. 6.2a mapy wynika, że określone struktury tworzyły obszary (skupiska) punktów, które były charakterystyczne dla występowania (przy określonych warunkach pomiarowych) danej formy przepływu. W obszarze dominacji fazy olejowej przepływie znalazły się takie struktury przepływu jak: kropłowo-dyspersyjna wody w oleju, przerywano-dyspersyjna wody w oleju i dyspersyjna wody w oleju. Natomiast w obszarze dominacji fazy wodnej w przepływie umiejscowiły się następujące struktury przepływu: dyspersyjna oleju w wodzie, pianowo-dyspersyjna oleju w wodzie oraz kropłowo-dyspersyjna oleju w wodzie. Pomiędzy tymi dwoma zasadniczymi obszarami znajdował się obszar emulsji, czyli stan przejściowy, w którym powstająca struktura przepływu posiadała takie cechy, które w sposób jednoznaczny nie pozwalały na jej zakwalifikowanie do któregośkolwiek obszaru dominacji jednej faz biorących udział w tego rodzaju przepływie.

Natomiast na rys. 6.2b, zobrazowano analogiczną mapę jak na rys. 6.2a, ale przedstawiającą koncentrację oleju w cieczy w zależności od prędkości cieczy dwufazowej. Wartość koncentracji oleju w cieczy jest w tym przypadku wielkością określającą wzajemne usytuowanie ciekłych składników wody i oleju w strudze dwufazowej. Podobnie jak na rys. 6.2a, punkty doświadczalne tworzą swoiste skupiska,

które determinują występowanie charakterystycznych obszarów ich pojawiania się, co zostało odznaczone liniami granicznymi. Szczegółowy opis poszczególnych struktur przepływu zawierają tabele 6.2 i 6.4.

Opracowane mapy opadającego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz pozwalają w zadowalający sposób zidentyfikować poszczególne obszary dominacji faz w przepływie. Mapy te, stanowią podstawę do opracowania uniwersalnej postaci mapy, właściwej także dla przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz.



Rys. 6.2. Mapa opadającego przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz z zakresami występowania określonych struktur przepływu dwufazowego cieczy wzajemnie niemieszających się wyrażone w układzie: a) $w_{o,0}$ - w_{2F} , b) ε_o^* - w_{2F}

6.1.2. Przepływ trójfazowy gaz-ciecz-ciecz

➤ Struktury przepływu

Analogicznie jak dla przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz rozpatrywano także struktury opadającego w rurze pionowej przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej oraz ich nazewnictwo z tą różnicą, że w przypadku przepływu trójfazowego skupiono się przede wszystkim na strukturach charakterystycznych wyłącznie dla ich przepływu pierścieniowego. Przepływ pierścieniowy to taki, w którym mieszanina cieczy płynie przy ścianie kanału, a gaz ze znaczną prędkością jego środkiem w postaci rdzenia, co wpływa na tworzenie się charakterystycznego pierścienia (widocznego dokładnie w przekroju poziomym przez kanał pomiarowy). Ze względu na podobieństwo cech w obu tych przepływach, do zastosowanej nomenklatury przy przepływie dwufazowym dodano prefiks o symbolu „A” wskazujący na pierścieniowy charakter przepływu (z j. ang. Annular).

W tabeli 6.9 przedstawiono rozpoznane podczas badań własnych struktury opadającego przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz, odpowiednie dla przypadku dominacji fazy wodnej w przepływie. Z kolei, w tabeli 6.10 przedstawiono fotografie struktur, charakterystyczne dla przypadku przepływu z dominującą fazą olejową. Natomiast tabele 6.11 i 6.12 zawierają szczegółową analizę poszczególnych struktur przepływu trójfazowego, adekwatne dla przepływu z dominacją fazy wodnej jak i olejowej.

W każdym z przypadków przepływu gazu i mieszaniny wodno-olejowej skupiono się na opisie zachowania się składników fazy ciekłej oraz określano wpływ strumienia gazu na stopień dyspersji każdej z faz ciekłych, odpowiednio przy dominacji fazy wodnej jak i olejowej.

Tabela 6.9

Struktury pierścieniowego opadającego przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz z dominującą fazą wodną




Struktura przepływu		
DOMINUJĄCA FAZA WODNA (O/W)		
		
A-DrDO/W	A-FDO/W	A-DO/W

Tabela 6.10

Klasyfikacja struktur pierścieniowego opadającego przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz z dominacją fazy wodnej


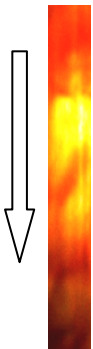
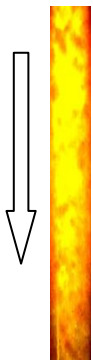
Symbol struktury	Charakterystyka struktury
DOMINUJĄCA FAZA WODNA (O/W)	
A-DrDO/W	Pierścieniowa z kroplowo-dyspersyjnym olejem w wodzie
	<p>Faza wodna wypełniała większą część kanału pomiarowego i pozostawała w stałym kontakcie ze ścianką kanału. Faza gazowa płynęła ze znaczną prędkością środkiem kanału tworząc rdzeń, który intensyfikował przepływ silnie zdyspergowanej mieszaniny cieczy wzdłuż ścianek kanału. Przepływająca mieszanina cieczy tworzyła pierścień o zmiennej grubości i stopniu zafalowania powierzchni. Olej płynął (w zależności od koncentracji w mieszaninie cieczy) w postaci pojedynczych, mniejszych lub większych kropeł.</p>
A-F-DO/W	Pierścieniowa z pianowo-dyspersyjnym olejem w wodzie
	<p>Woda była fazą dominującą w przepływie i pojawiała się przy ścianie kanału. Zawierała także drobne kropelki oleju. Faza gazowa płynęła natomiast ze zwiększoną prędkością środkiem kanału tworząc charakterystyczny pierścień o zróżnicowane grubości i znacznym stopniu zafalowania powierzchni mieszaniny cieczy. Ze względu na intensywny i oscylacyjny charakter przepływu mieszaniny cieczy przybierała ona cechy piany. Na powierzchni cienkiej warstwy filmu wody znajdującej się przy ścianie kanału obserwowano pojawiające się drobne fale, które kształtowały stopień zafalowania całego filmu cieczy.</p>
A-DO/W	Pierścieniowa z dyspersją oleju w wodzie
	<p>Zdyspergowana mieszanina oleju i wody przepływała przy ścianie kanału. Charakter przepływu był dynamiczny, co oznaczało, że mieszanina cieczy płynęła z dużą prędkością, co wpływało na ulokowanie ciekłych składników mieszaniny na ścianie kanału. Mieszanina cieczy wytworzyła pierścień, którego grubość i poziom zafalowania uzależniony był od prędkości przepływu gazu oraz obu faz ciekłych w przepływie. Przy wzrastających prędkościach przepływu obu faz ciekłych oraz dużej prędkości film cieczy stawał się coraz cieńszy i miał charakter przepływu hydraulicznego.</p>

Tabela 6.11

Struktury pierścieniowego opadającego przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz z dominującą fazą olejową

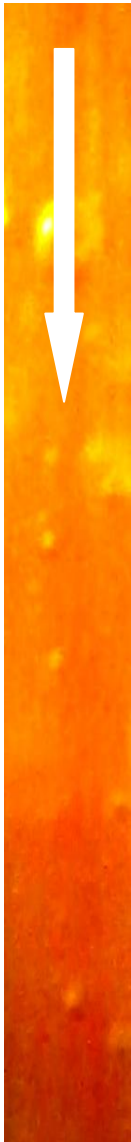


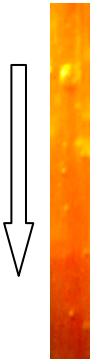

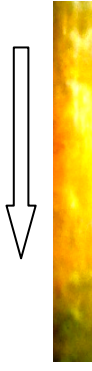
Struktura przepływu		
DOMINUJĄCA FAZA OLEJOWA (W/O)		
		
A-DrDW/O	A-IDW/O	A-DW/O

Tabela 6.12

Klasyfikacja struktur pierścieniowego opadającego przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz z dominacją fazy olejowej

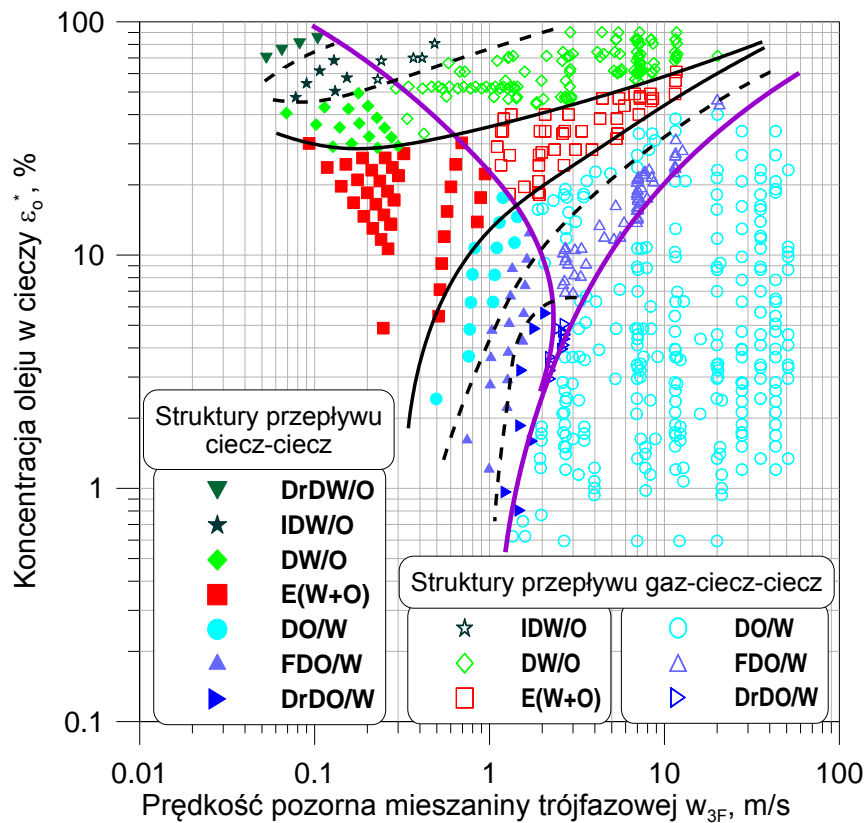
Symbol struktury	Charakterystyka struktury
DOMINUJĄCA FAZA OLEJOWA (W/O)	
A-DrDW/O	Pierścieniowa z kroplo-dyspersyjną wodą w oleju
	<p>Olej płynął przy ściance kanału oraz wypełniał go w znacznej objętości. Zawierał także krople wody o zróżnicowanym rozmiarze, które przy opadającym przepływie w kanale pionowym były „porywane” przez ciągłą fazę olejową. Faza gazowa płynęła ze znaczną prędkością środkiem kanału tworząc rdzeń, który intensyfikował przepływ silnie zdyspergowanej mieszaniny cieczy wzdłuż ścianek kanału. Przepływająca mieszanina cieczy tworzyła pierścień o zmiennej grubości i stopniu zafalowania powierzchni. W zależności od koncentracji w mieszaninie cieczy krople wody miały postać większych, bądź mniejszych pojedynczych drobin.</p>
A-IDW/O	Pierścieniowa z przerywano-dyspersyjną wodą w oleju
	<p>Struktura taka, powstawała przy niskich prędkościach przepływu ciągłej fazy olejowej i niewielkim udziale fazy wodnej w postaci licznych, drobnych kropeł. Powstające obszary wodno-olejowe naprzemiennie występowały na ściance kanału. Ponieważ przepływ nie był zbyt intensywny, można było zauważyć, dosyć dobrze odgraniczone obszary poszczególnych cieczy, zarówno oleju jak i wody. Przepływająca mieszanina cieczy tworzyła pierścień o zmiennej grubości i stopniu zafalowania powierzchni.</p>
A-DW/O	Pierścieniowa z dyspersją wody w oleju
	<p>Zdyspergowana mieszanina wody w oleju płynęła przy ściance kanału pomiarowego. Podczas takiego przepływu mieszanina cieczy stawała się prawie nieprzezroczysta przypominając emulsję o charakterze płynnego masła. Przy wzrastających prędkościach przepływu obu faz ciekłych oraz dużej prędkości przepływu fazy gazowej powstający podczas przepływu pierścień cechował się różnym stopniem zafalowania, a jego grubość ulegała zmniejszeniu przy wzroście prędkości fazy gazowej.</p>

Ze względu na silną dyspersję obserwowanych struktur przepływu i w większości emulsyjny charakter pierścieniowego opadającego przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz, nie była możliwa pełna weryfikacja tworzących się struktur pod kątem wykorzystania metody konduktometrycznej. Powietrze, podobnie jak olej jest izolatorem i nie wykazuje przewodzenia impulsu elektrycznego. Mimo powyższego zdecydowano się realizować takie próby, dla wybranych serii badań. Podjęte próby wykazywały stałą wartość napięcia na poziomie około 3V, co odpowiadało zarówno obecności fazy wodnej jak i olejowej w przepływie, a zatem uniemożliwiała obiektywną ocenę przepływu za pomocą przyłożonego do sond pomiarowych napięcia. Niemniej jednak, uzyskane wyniki badań pozwoliły na określenie minimalnych granic przejścia pomiędzy określonymi strukturami przepływu.

➤ **Mapa opadającego przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz**

Na rysunku 6.3 przedstawiono nowo opracowaną mapę przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej, zawierającą wyniki rejestracji i obserwacji struktur przepływu mieszaniny gazowo-cieczowej z wykorzystaniem oleju Item 12, Item 30MF oraz L-AN 15. Przedstawiony rozkład punktów doświadczalnych, w układzie współrzędnych określających relację koncentracji oleju w cieczy ε_o^* od prędkości przepływu trójfazowego w_{3F} , pozwolił na jednoznaczne wskazanie obszarów występowania określonych struktur. W zależności od wartości prędkości pozornych faz oraz koncentracji oleju w fazie ciekłej stwierdzono występowanie różnych struktur przepływu, w których – analogicznie jak dla warunków spływu cieczy dwufazowej, można było wyróżnić struktury przepływu z dominacją wody oraz oleju. Obserwowano także struktury przepływu pierścieniowego, w których w fazie ciekłej nie można było jednoznacznie określić dominacji jednej z faz. W zakresie prędkości mieszaniny trójfazowej wynoszącej do ok. (3-4) m/s zaobserwowane struktury przepływu były praktycznie analogiczne jak dla warunków spływu grawitacyjnego cieczy dwufazowej. Dla wyższych prędkości mieszaniny trójfazowej, będącej konsekwencją wzrostu prędkości powietrza, składniki fazy ciekłej były silnie wymieszane i tworzyły układ typu emulsji. W tym zakresie obserwowano, w zależności od koncentracji oleju w cieczy, zarówno przepływ dyspersyjny oleju w wodzie – DO/W, jak i przepływ dyspersyjny wody w oleju – DW/O. Nie można było jednak określić granicy pomiędzy

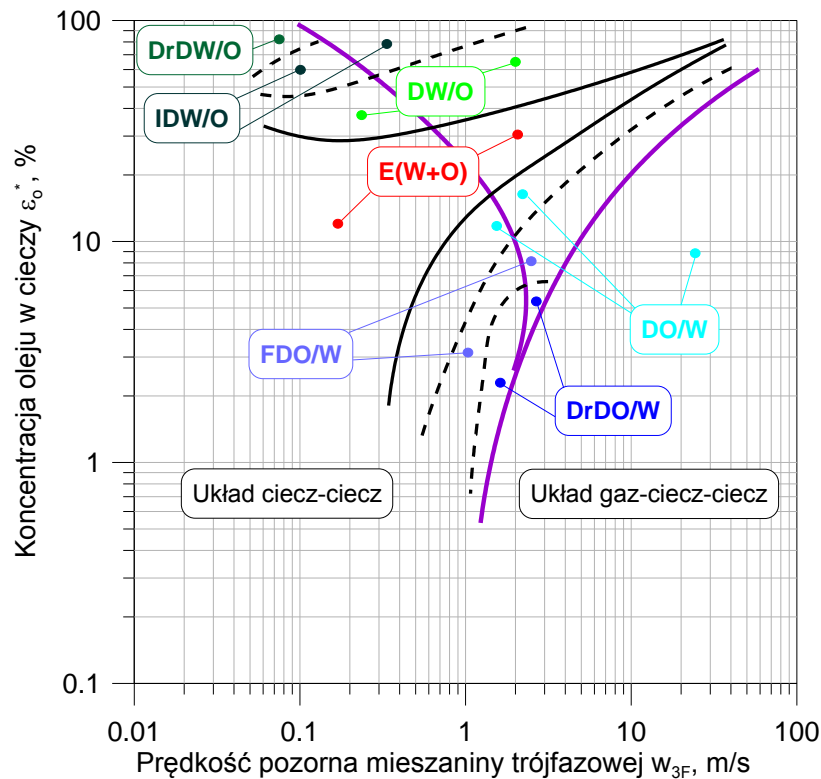
przepływem z dominacją wody lub oleju. Spowodowane to było silnym zemulgowaniem obu ciekłych składników mieszaniny. Zawarte na rysunku linie rozgraniczające obszary występowania poszczególnych struktur przepływu, pozwalają na wskazanie parametrów przepływowych poszczególnych składników mieszaniny trójfazowej, przy których może wystąpić określona struktura przepływu.



Rys. 6.3. Mapa pierścieniowego opadającego przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz

Biorąc pod uwagę fakt występowania, w zakresie określonych prędkości powietrza, wody i oleju, analogicznych struktur przepływu występujących przy przepływie cieczy dwufazowej woda-olej, podjęto próbę opracowania uniwersalnej mapy przepływu. W tym celu połączono zakresy występowania struktur przepływu dwu- i trójfazowego na jednym wykresie, stanowiącym uniwersalną mapę przepływu. Przy zaniku strumienia gazu przepływ trójfazowy typu gaz-ciecz-ciecz staje się przepływem dwufazowym typu ciecz-ciecz. Jak przedstawiono na rys. 6.4, zakres współrzędnych na uniwersalnej mapie opadającego przepływu wielofazowego w rurach pionowych obejmuje szeroki zakres prędkości pozornych faz, typowych dla analizowanych przypadków przepływu. Pogrubioną linią fioletową oddzielono obszar

przepływu typu ciecż-ciecż od obszaru typu gaz-ciecż-ciecż. Ponadto liniami kreskowanymi zaznaczono granice występowania określonych struktur przepływu w obu ich typach, czyli dla przepływu dwufazowego jak i trójfazowego.



Rys. 6.4. Uniwersalna mapa opadającego przepływu wielofazowego

6.2. Udziały objętościowe faz w mieszaninie wielofazowej

6.2.1. Udziały objętościowe faz w opadającym przepływie dwufazowym woda-olej

W oparciu o otrzymane wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych nad hydrodynamiką opadającego przepływu dwufazowego typu woda-olej, dokonano analizy wpływu parametrów przepływowych na wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz uczestniczących w przepływie.

Na rys. 6.5; 6.9; 6.13; 6.17; 6.21 i 6.25 zobrazowano zależności wartości zmierzonego średniego udziału objętościowego wody i oleju od prędkości pozornej wody i oleju przy opadającym przepływie dwufazowym woda-olej w kanale pionowym. Przedstawiono wybrane serie pomiarowe dla rodzajów cieczy charakteryzujących się różnicowanymi wartościami pod względem ich lepkości. Z rozkładu punktów

pomiarowych na wykresach wywnioskować można, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody i oleju wzrastają także wartości ich udziałów objętościowych.

Z kolei na rys. 6.6; 6.10; 6.14; 6.18; 6.22 i 6.26 przedstawiono rozmieszczenie punktów pomiarowych dotyczących porównania rzeczywistych i wlotowych udziałów objętościowych, zarówno wody jak i oleju przy pierścieniowym przepływie dwufazowym typu ciecz-ciecz. Z układu punktów doświadczalnych na wykresach można wyciągnąć wnioski, że występujący w tego typu przepływach poślizg międzyfazowy jest zależny od dominacji poszczególnych faz ciekłych w rozpatrywanym układzie dwufazowym woda-olej. Z przedstawionych wykresów wynika, że różnice w wartościach zmierzonych udziałów objętościowych wody i oleju w stosunku do ich wartości wlotowych udziałów objętościowych są mniejsze, przy wyższych prędkościach pozornych każdej z faz. Ponadto, jeśli w przepływie dominuje olej, wtedy wartości rzeczywistych udziałów objętościowych, w porównaniu z ich wartościami wlotowymi udziałów objętościowych poszczególnych faz są wyższe, niż dla przypadku dominacji wody w przepływie.

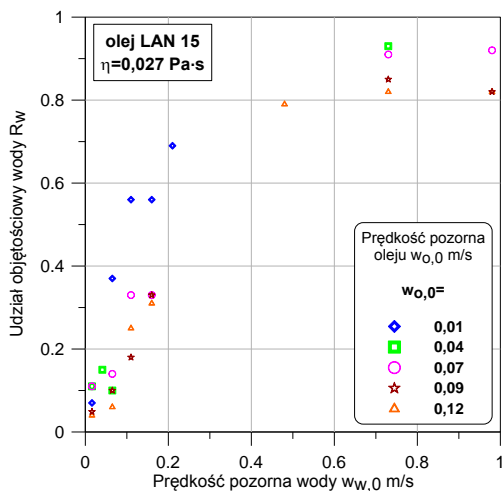
Rys. 6.7; 6.11; 6.15; 6.19; 6.23 i 6.27 przedstawiają natomiast wpływ prędkości pozornych obu faz ciekłych na wartość względnego wskaźnika poślizgu oleju $S_{wzgl,o}$ i wody $S_{wzgl,w}$ opisanych odpowiednio równaniami (6.1) i (6.2) w funkcji prędkości pozornej oleju i wody dla cieczy o różnych wartościach ich lepkości, przy stałych prędkościach pozornych drugiej fazy ciekłej uczestniczącej w przepływie:

$$S_{wzgl,o} = \frac{\varepsilon_o}{R_o}, \quad (6.1)$$

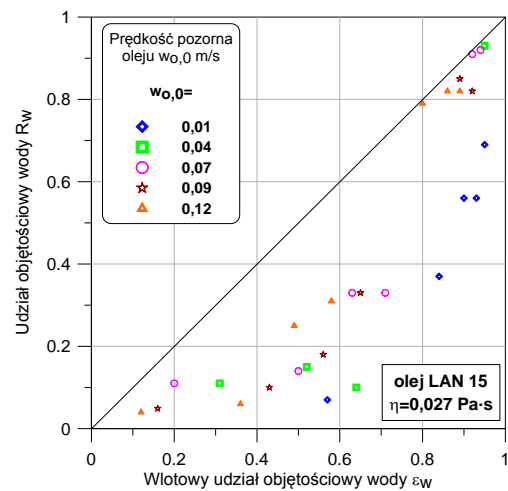
$$S_{wzgl,w} = \frac{\varepsilon_w}{R_w}. \quad (6.2)$$

Z przedstawionych rysunków wywnioskować można, że wartość względnego wskaźnika poślizgu oleju i wody ulegała zmianie wraz ze wzrostem prędkości pozornych drugiej fazy ciekłej. W przypadku oleju wartości poślizgu międzyfazowego wzrastały wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody, a w sytuacji odwrotnej z kolei, malały. Tendencja taka powtarzała się dla wszystkich cieczy wykorzystanych w badaniach, które różniły się pomiędzy sobą głównie lepkością i gęstością. Zatem, wartość poślizgu międzyfazowego była wyższa, im większe występowały różnice we właściwościach fizycznych faz uczestniczących w przepływie dwufazowym typu ciecz-ciecz. Z kolei, rys. 6.8; 6.12; 6.16; 6.20; 6.24 i 6.28 obrazują zmiany względnego wskaźnika poślizgu oleju i wody w cieczy dwufazowej dla różnych struktur przepływu

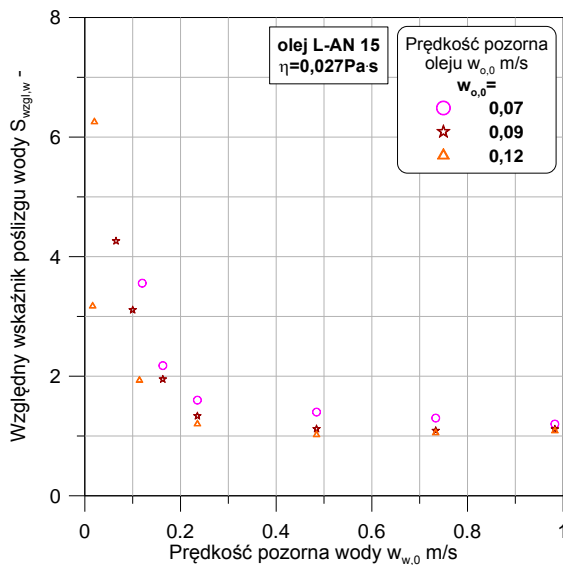
i dla różnych wartości lepkości wszystkich faz ciekłych. Z załączonych rysunków wynika, że wzrost wartości prędkości strugi dwufazowej zmierza do wartości względnego wskaźnika poślizgu oleju i wody równej jedności, czyli osiągnięcia równowagi pomiędzy wartościami rzeczywistych udziałów objętościowych oleju i wody, a wartościami ich wlotowych udziałów objętościowych. Widoczne jest to zwłaszcza dla przypadku zmiany względnego wskaźnika poślizgu wody w cieczy dwufazowej. W większości przypadków po przekroczeniu wartości $S_{wzgl,i}=1$, następowała zmiana struktury w przepływie.



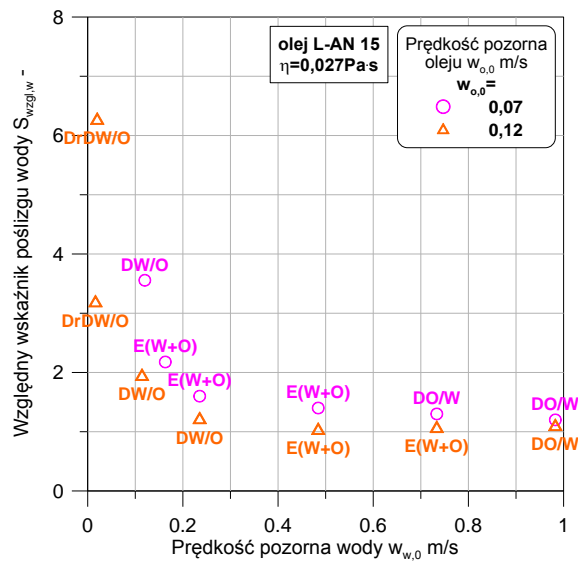
Rys. 6.5. Zależność zmierzonego udziału objętościowego wody od prędkości pozornych wody i oleju o lepkości $\eta=0,027\text{Pa}\cdot\text{s}$



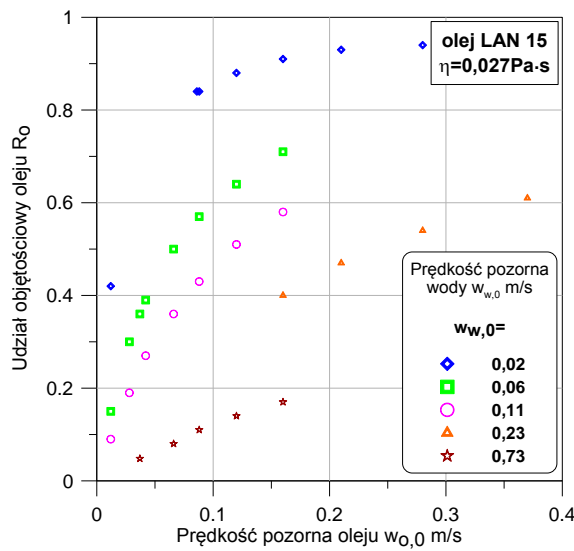
Rys. 6.6. Porównanie wartości zmierzonego udziału objętościowego wody z wartościami wlotowymi wody i oleju o lepkości $\eta=0,027\text{Pa}\cdot\text{s}$



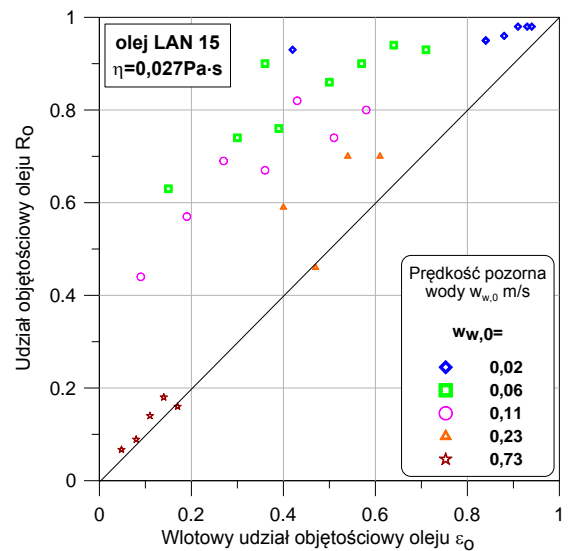
Rys. 6.7. Wpływ prędkości pozornych obu faz ciekłych na wartość względnego wskaźnika poślizgu wody



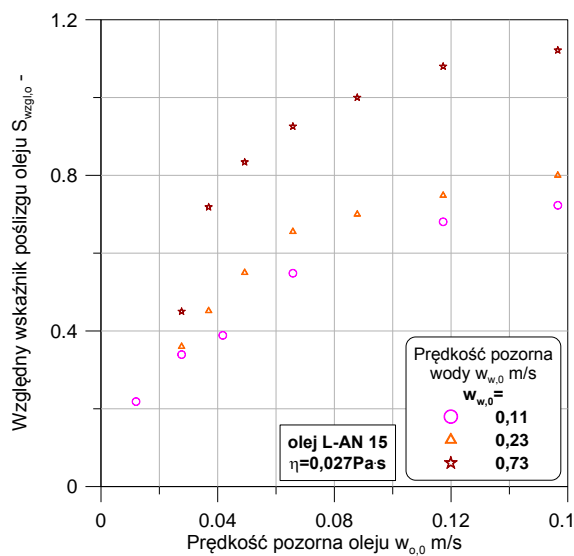
Rys. 6.8. Zmiany względnego wskaźnika poślizgu wody w cieczy dwufazowej



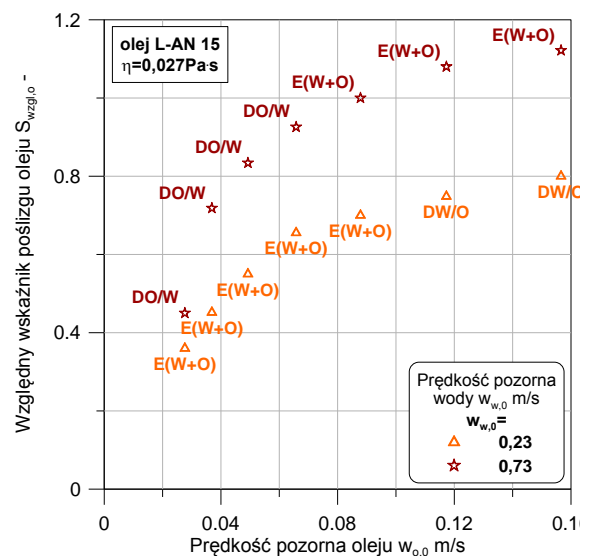
Rys. 6.9. Zależność zmierzonego udziału objętościowego oleju od prędkości pozornych wody i oleju o lepkości $\eta=0,027\text{Pa}\cdot\text{s}$



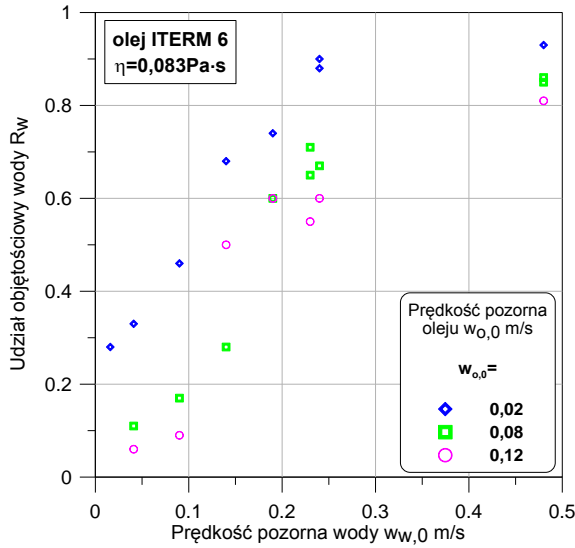
Rys. 6.10. Porównanie wartości zmierzonego udziału objętościowego oleju z wartościami wlotowymi wody i oleju o lepkości $\eta=0,027\text{Pa}\cdot\text{s}$



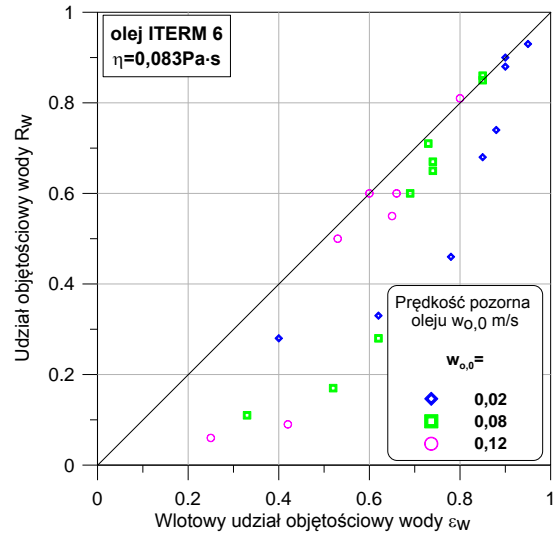
Rys. 6.11. Wpływ prędkości pozornych obu faz ciekłych na wartość względnego współczynnika poślizgu oleju



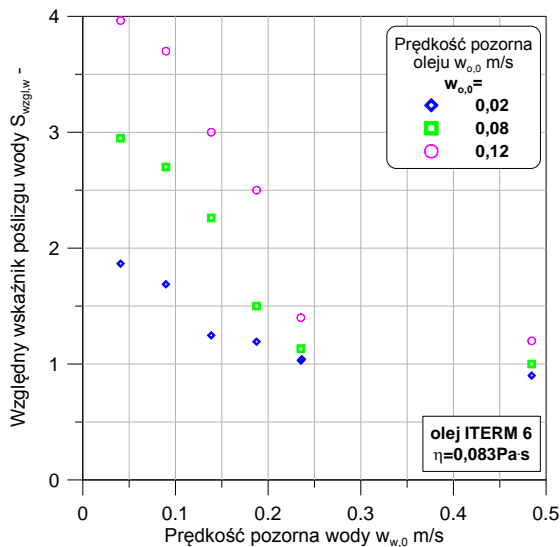
Rys. 6.12. Zmiany względnego współczynnika poślizgu oleju w cieczy dwufazowej



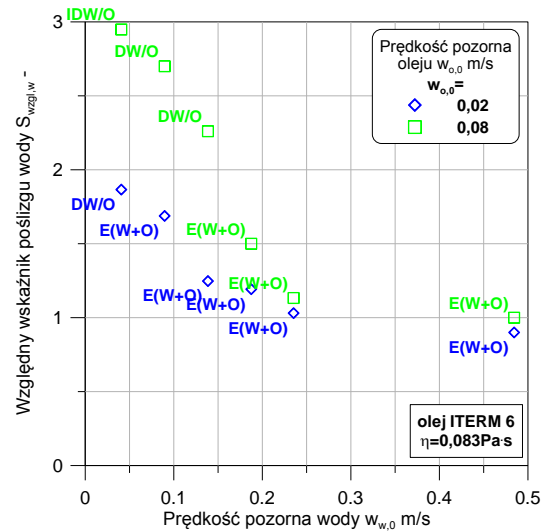
Rys. 6.13. Zależność zmierzonego udziału objętościowego wody od prędkości pozornych wody i oleju o lepkości $\eta=0,083\text{Pa}\cdot\text{s}$



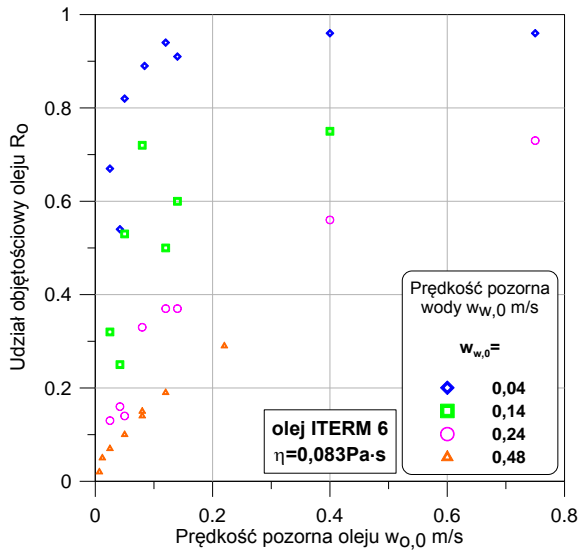
Rys. 6.14. Porównanie wartości zmierzonego udziału objętościowego wody z wartościami wlotowymi wody i oleju o lepkości $\eta=0,083\text{Pa}\cdot\text{s}$



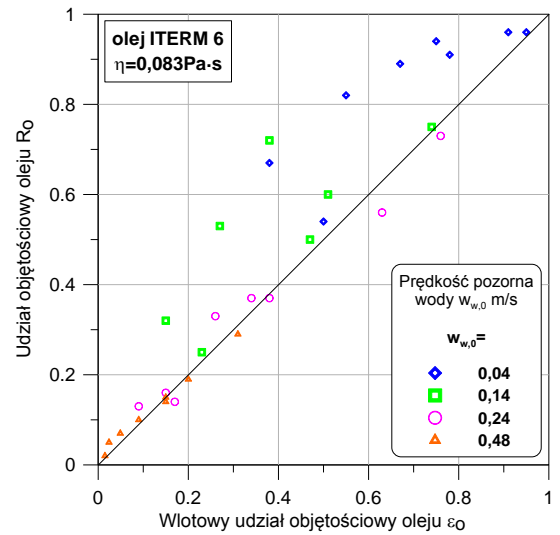
Rys. 6.15. Wpływ prędkości pozornych obu faz ciekłych na wartość względnego wskaźnika poślizgu wody



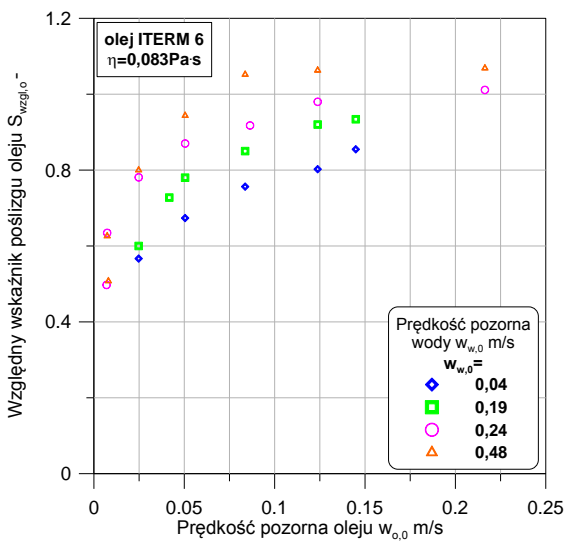
Rys. 6.16. Zmiany względnego wskaźnika poślizgu wody w cieczy dwufazowej



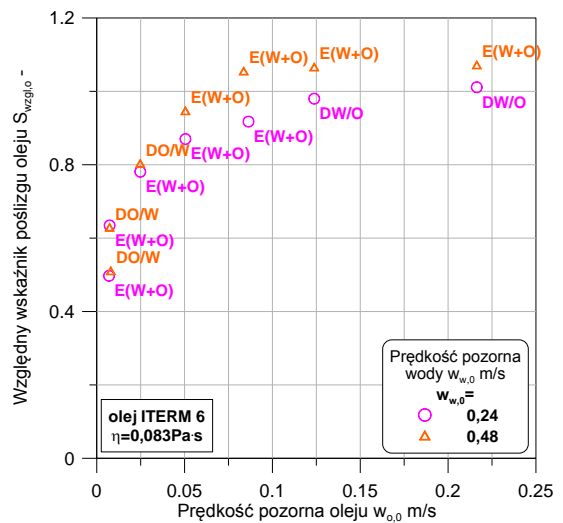
Rys. 6.17. Zależność zmierzonego udziału objętościowego oleju od prędkości pozornych wody i oleju o lepkości $\eta=0,083\text{Pa}\cdot\text{s}$



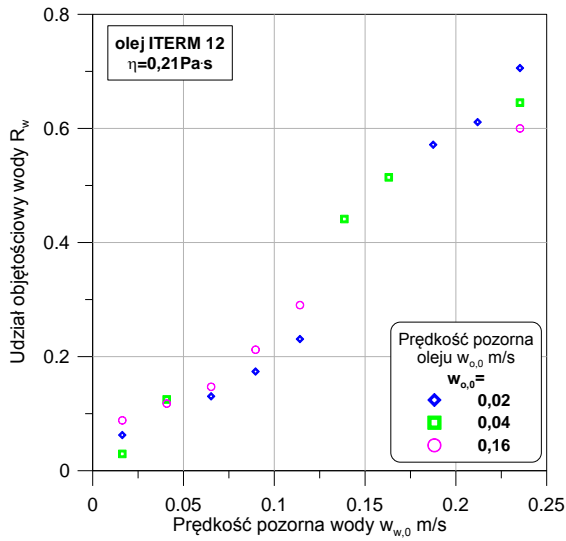
Rys. 6.18. Porównanie wartości zmierzonego udziału objętościowego oleju z wartościami wlotowymi wody i oleju o lepkości $\eta=0,083\text{Pa}\cdot\text{s}$



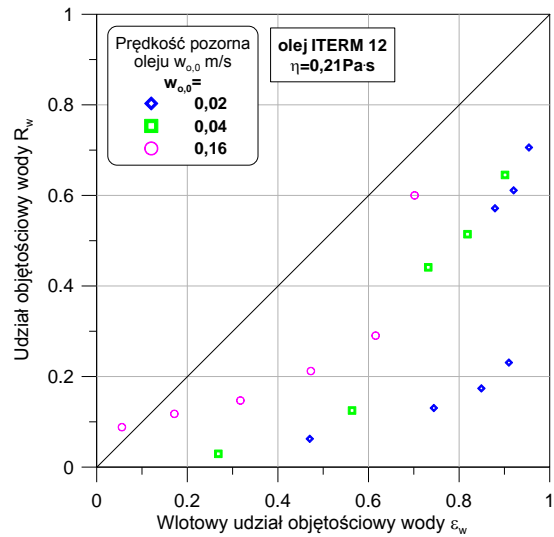
Rys. 6.19. Wpływ prędkości pozornych obu faz ciekłych na wartość względnego wskaźnika poślizgu oleju



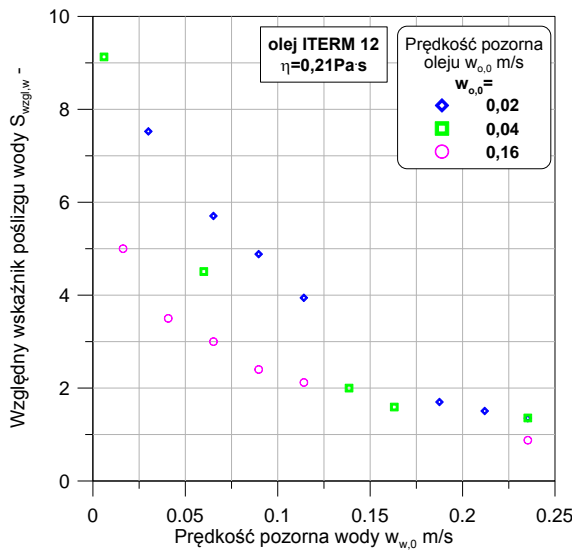
Rys. 6.20. Zmiany względnego wskaźnika poślizgu oleju w cieczy dwufazowej



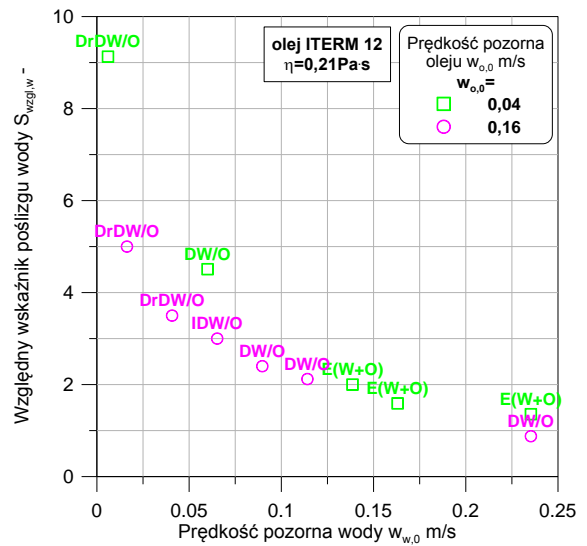
Rys. 6.21. Zależność zmierzonego udziału objętościowego wody od prędkości pozornych wody i oleju o lepkości $\eta=0,21\text{Pa}\cdot\text{s}$



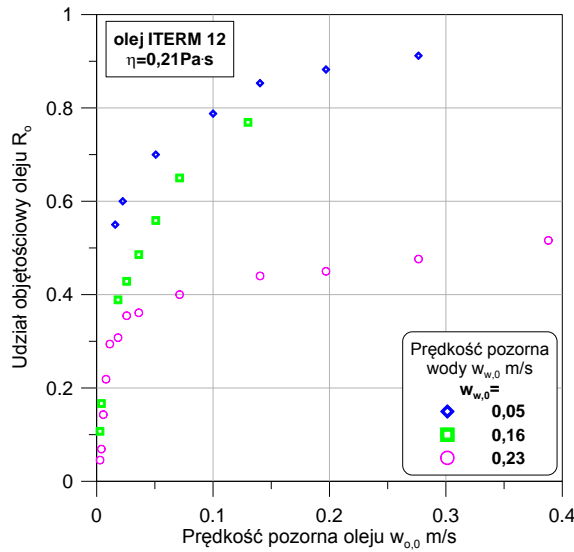
Rys. 6.22. Porównanie wartości zmierzonego udziału objętościowego wody z wartościami wlotowymi wody i oleju o lepkości $\eta=0,21\text{Pa}\cdot\text{s}$



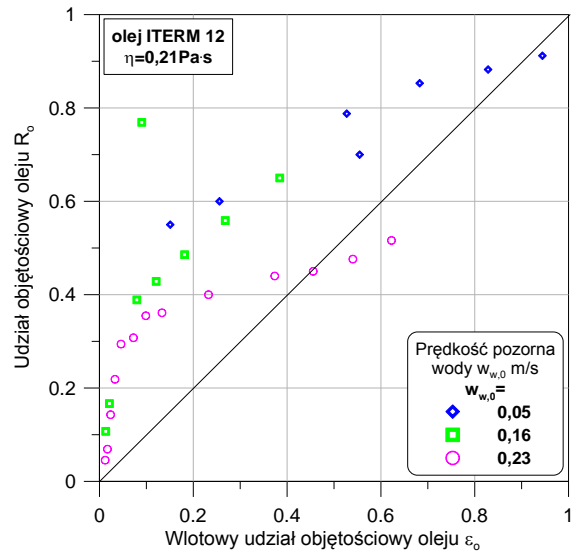
Rys. 6.23. Wpływ prędkości pozornych obu faz ciekłych na wartość względnego wskaźnika poślizgu wody



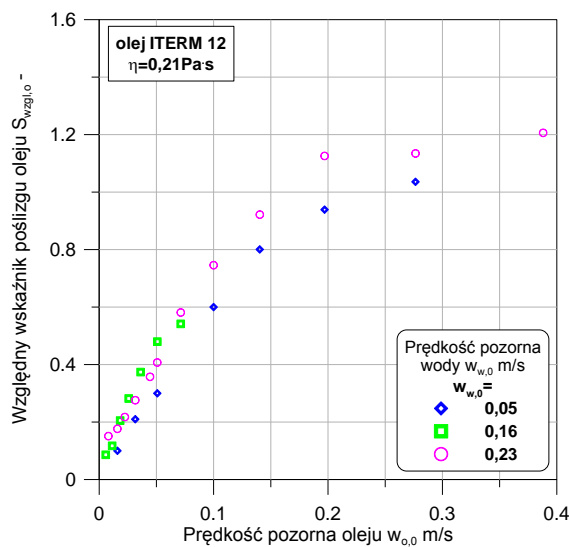
Rys. 6.24. Zmiany względnego wskaźnika poślizgu wody w cieczy dwufazowej



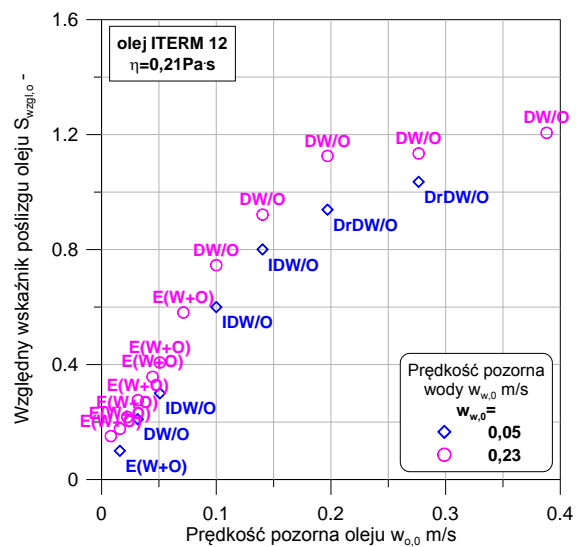
Rys. 6.25. Zależność zmierzonego udziału objętościowego oleju od prędkości pozornych wody i oleju o lepkości $\eta=0,21\text{Pa}\cdot\text{s}$



Rys. 6.26. Porównanie wartości zmierzonego udziału objętościowego oleju z wartościami wlotowymi wody i oleju o lepkości $\eta=0,21\text{Pa}\cdot\text{s}$



Rys. 6.27. Wpływ prędkości pozornych obu faz ciekłych na wartość względnego wskaźnika poślizgu oleju



Rys. 6.28. Zmiany względnego wskaźnika poślizgu oleju w cieczy dwufazowej

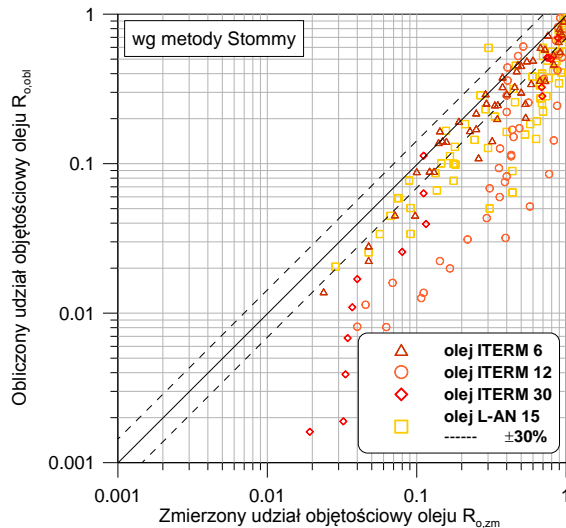
Podsumowując, z układu punktów pomiarowych na przedstawionych wykresach wywnioskować można, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej oleju wzrastają także wartości jego udziałów objętościowych i maleją wraz ze wzrostem prędkości pozornej

wody. Tendencja taka utrzymywała się dla wszystkich przebadanych cieczy olejowych. Występujący w tego typu przepływach poślizg międzyfazowy jest zależny od dominacji poszczególnych faz ciekłych w rozpatrywanym układzie dwufazowym woda-olej. Z przedstawionych wykresów wynika także, że różnice w wartościach zmierzonych udziałów objętościowych oleju w stosunku do ich wartości wlotowych udziałów objętościowych są mniejsze, przy wyższych prędkościach pozornych wody. Natomiast, jeśli w przepływie dominuje olej, wtedy różnice w wartościach rzeczywistych udziałów objętościowych, w porównaniu z ich wartościami wlotowymi udziałów objętościowych olejów są wyższe, niż dla przypadku dominacji wody w przepływie.

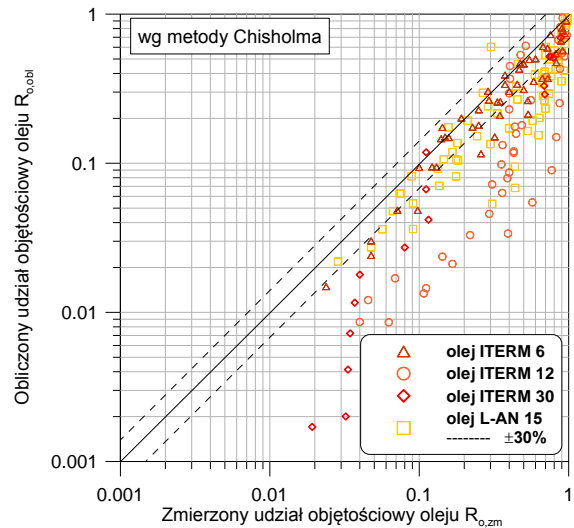
6.2.2. Ocena metod obliczania udziałów objętościowych faz w opadającym przepływie dwufazowym ciecz-ciecz

W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów wartości rzeczywistych udziałów objętościowych poszczególnych faz mieszaniny dwufazowej typu woda-olej dokonano ich opisu matematycznego w odniesieniu do wybranych metod obliczeniowych. Ponieważ w literaturze dostępnych jest niewiele prac dotyczących sposobów wyznaczania wartości udziałów objętościowych poszczególnych składników ciekłych w strudze dwufazowej typu ciecz-ciecz [133], zatem wykonano próbę adaptacji metod proponowanych w literaturze dla przepływu dwufazowego typu gaz-ciecz do określania wartości udziałów objętościowych faz dla przepływu typu ciecz-ciecz. W tym celu przyjęto założenie, że w analizowanych równaniach, w miejsce fazy gazowej będzie przyjmowana faza olejowa, która również posiada mniejszą gęstość w stosunku do drugiej fazy ciekłej, czyli wody.

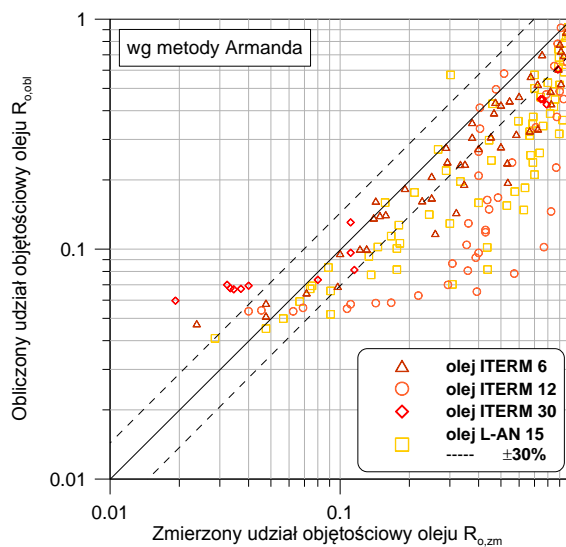
Ocenę dokładności metod obliczeniowych wartości zmierzonych udziałów objętościowych przeprowadzono dla 6 metod opartych o parametr Lockharta-Martinelliego lub jego modyfikację oraz dla 4 metod opartych na modelu drift-flux czyli tych, które uwzględniały poślizg międzyfazowy w rozpatrywanym typie przepływu. Porównania metod obliczeniowych z wartościami zmierzonymi rzeczywistych udziałów objętościowych poszczególnych faz wykonano dla 4 różnych, głównie pod względem lepkości olejów, co pokazano w ujęciu graficznym na rys. 6.29-6.38.



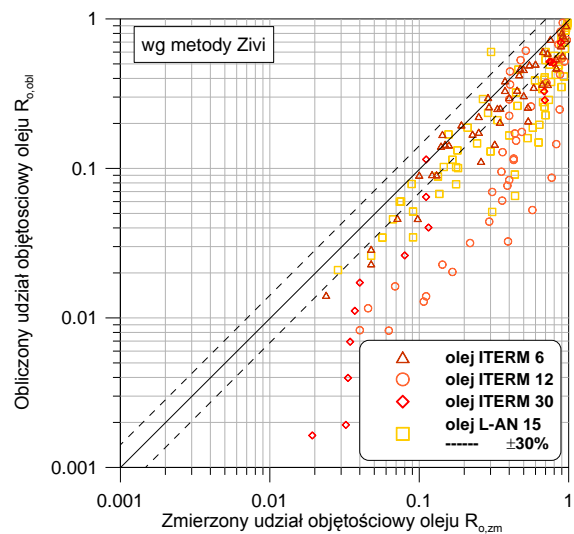
Rys. 6.29. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Stommy



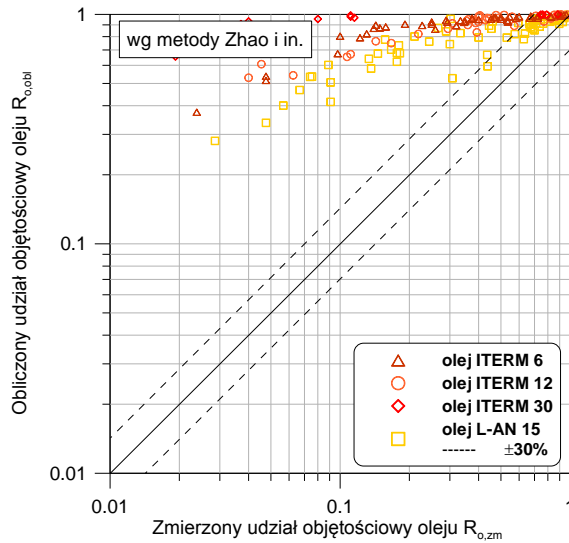
Rys. 6.30. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Chisholma



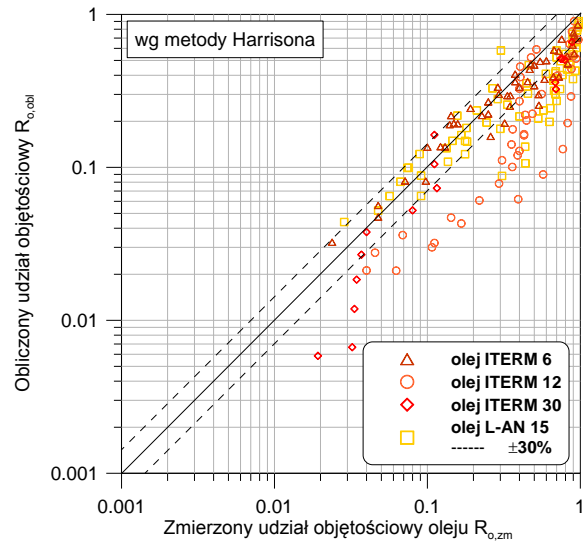
Rys. 6.31. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Armanda



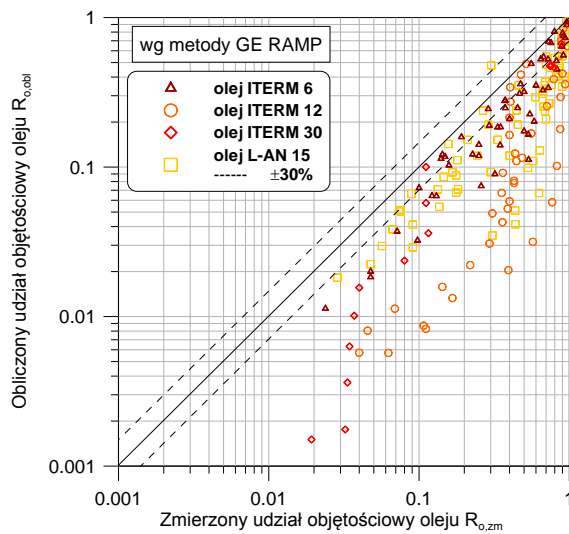
Rys. 6.32. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Zivi



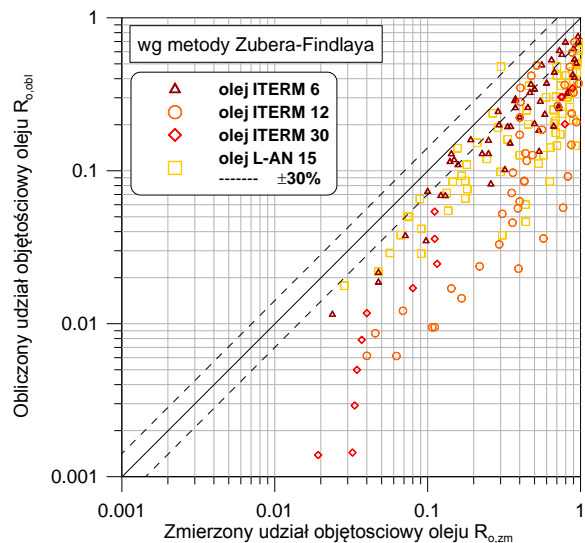
Rys. 6.33. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Zhao i in.



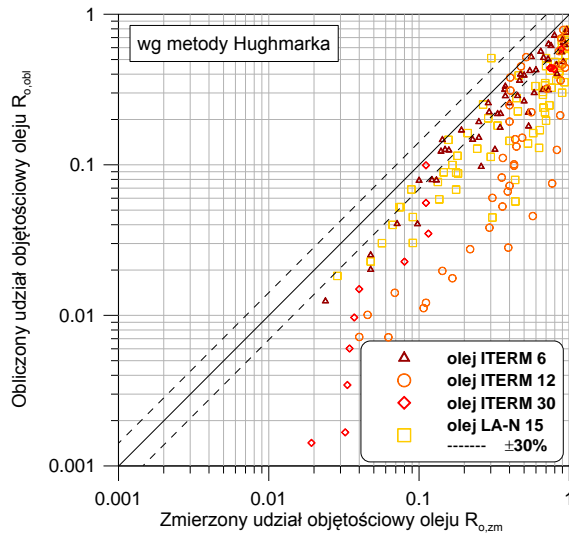
Rys. 6.34. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Harrisona



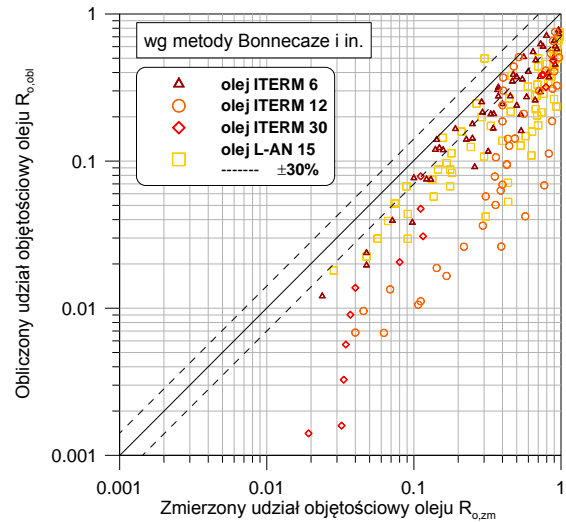
Rys. 6.35. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody GE RAMP



Rys. 6.36. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Zubera-Findlaya



Rys. 6.37. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Hughmarka



Rys. 6.38. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych dla olejów o różnych lepkościach z wartościami obliczonymi wg metody Bonnacaze i in.

Porównanie metod obliczeniowych umożliwiających wyznaczenie wartości obliczonych udziałów objętościowych oleju z wynikami badań własnych opisujących zmierzone wartości udziałów objętościowych fazy olejowej w strudze dwufazowej, polegało na określeniu:

- średniej wartości błędu względnego

$$\overline{\delta R_o} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta R_{o,i}, \quad (6.3)$$

gdzie:

$$\delta R_{o,i} = \frac{R_{o,i,obl} - R_{o,i,zm}}{R_{o,i,zm}}, \quad (6.4)$$

- średniej bezwzględnej wartości błędu względnego

$$|\overline{\delta R_o}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\delta R_{o,i}|, \quad (6.5)$$

- oraz średniej wartości odchylenia standardowego

$$\delta(\overline{\delta R_o}) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta R_{o,i} - \overline{\delta R_o})^2 \right]^{0,5}. \quad (6.6)$$

Otrzymane wyniki obliczeń statystycznych dla wybranych metod obliczeniowych umożliwiły wybór tych metod wyznaczania udziału objętościowego oleju, które zapewniały możliwie wysoką dokładność obliczeń. Wartości wyznaczonych wielkości statystycznych zawarto w tabeli 6.13. Tabela ta, zawiera wyniki obliczeń dla wszystkich przeprowadzonych pomiarów, w celu wyznaczenia wartości udziałów objętościowych fazy olejowej w strudze dwufazowej, z wykorzystaniem czterech różniących się głównie pod względem lepkości olejów. W tabeli 6.13 zobrazowano także w postaci wykresu kolumnowego porównanie wyników badań własnych z wybranymi metodami obliczeń wartości udziałów objętościowych zaczerpniętych z literatury.

Na obrazach graficznych (rys. 6.29-6.38) przedstawione zostały wybrane metody, z którymi porównano wyniki badań własnych, a w tabeli 6.14 zamieszczono postaci równań przytaczanych w pracy metod. Cytowane równania, pod względem występujących w nich parametrów podzielono na trzy grupy, z których każda cechowała się zróżnicowanymi wielkościami wpływającymi na wartości obliczanych udziałów objętościowych faz. W grupie pierwszej umieszczono metodę Stomma [136], wykorzystującą związek $R=f(x)$. W drugiej grupie znalazły się metody oparte o parametr Lockharta-Matinelliego lub jego modyfikację $R=f(X_{L-M})$, czyli metody Chisholma [135], Armanda [134], Zivi [140], Zhao i in. [141] oraz Harrisona [8]. Natomiast, do grupy trzeciej przypisano metody uwzględniające poślizg międzyfazowy, czyli oparte na modelu drift-flux, a zatem są to metody GE RAMP [138], Zuber-Findlay [146], Hughmarka [137] i Bonnacaze i in. [142].

Tabela 6.13

Ocena statystyczna metod obliczania udziału objętościowego oleju
dla układu ciec-ciecz

Lp.	Autor metody	Wartość wielkości statystycznych, %		
		$\overline{\delta R_o}$	$ \overline{\delta R_o} $	$\delta(\overline{\delta R_o})$
1.	Stomma [136]	-0,4004	0,4202	0,2933
2.	Chisholm [135]	-0,3808	0,4056	0,2979
3.	Armand [134]	-0,2856	0,4066	0,4059
4.	Zivi [140]	-0,3922	0,4141	0,2962
5.	Zhao i in. [141]	2,9492	2,9493	4,9965
6.	Harrison i in. [8]	-0,2558	0,3458	0,3226
7.	Zuber-Findlay [146]	-0,5486	0,5551	0,2417

c.d. tabeli 6.13

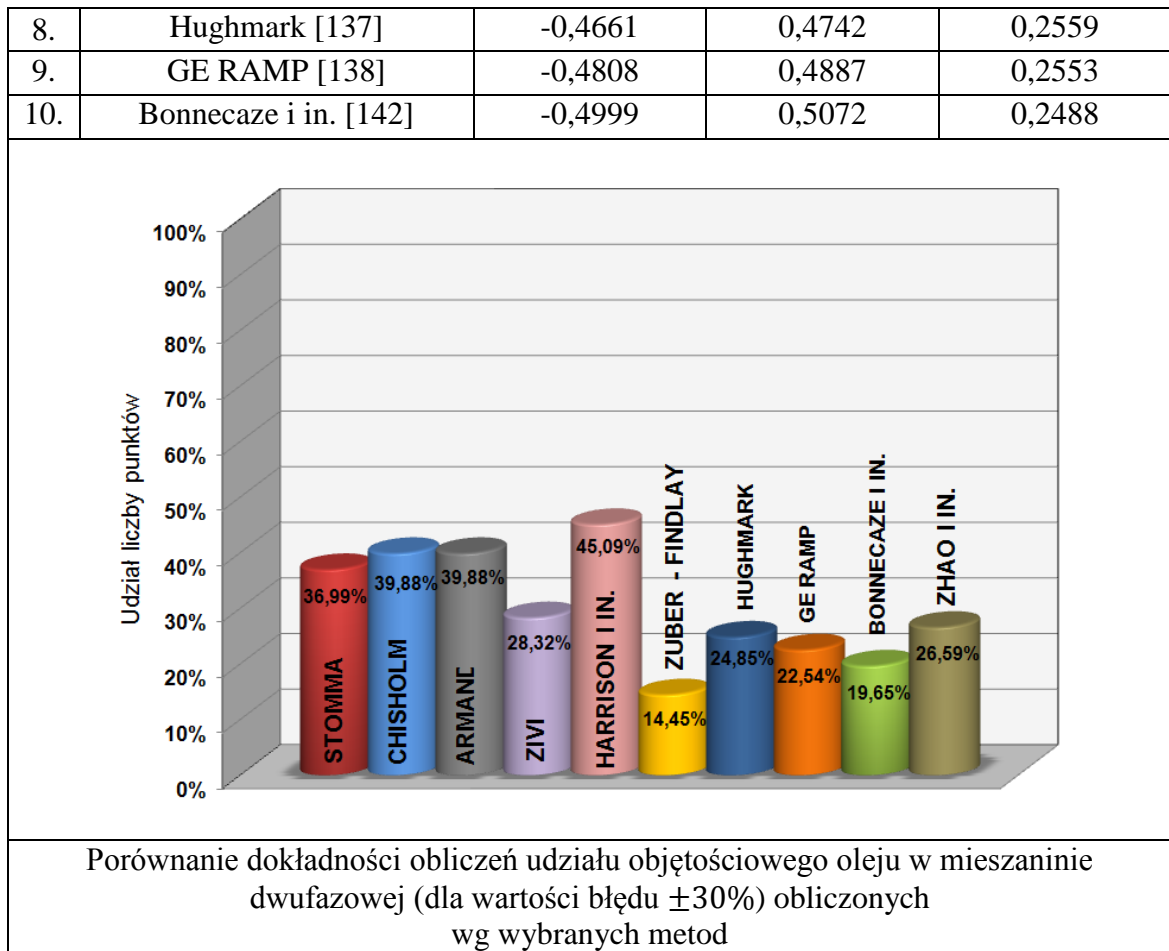


Tabela 6.14

Charakterystyka wybranych metod obliczania wartości udziału objętościowego oleju w przepływie dwufazowym gaz-ciecz

Autor metody	Równanie
GRUPA I	
Stomma [136]	$R_o = 1 - \frac{\varepsilon_o^2 - x_o^2}{2 \left[\ln \left(\frac{1 - x_o}{1 - \varepsilon_o} \right) - (\varepsilon_o - x_o) \right]}$ $\varepsilon_o = \frac{w_{o,0}}{w_{o,0} + w_{w,0}}$
GRUPA II	
Chisholm [135]	$R_o = \frac{1}{1 + S \left(\frac{1 - x_o}{x_o} \right) \left(\frac{\rho_o}{\rho_w} \right)}$

Chisholm [135]	$S = \left(x_o \frac{\rho_w}{\rho_o} + (1 - x_o) \right)^{0,5}$
GRUPA II	
Armand [134]	$R_o = 1 - \frac{4 + \frac{8}{7}m}{5 + m \left(\frac{\varepsilon_o}{1 - \varepsilon_o} + \frac{8}{7} \right)}$ $m = 4Re_o^{1/8} \left(\frac{\rho_o}{\rho_w} \right)^{0,5} [0,69 + (1 - \varepsilon_o)(4 + 21,9\sqrt{Fr_o})]$
Zivi [140]	$R_o = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{1 - x_o}{x_o} \right) \left(\frac{\rho_o}{\rho_w} \right)^{0,67} \right]}$
Zhao i in. [141]	$R_o = \frac{1}{1 + \left[(R_o^{-0,125}) \left(\frac{1 - x_o}{x_o} \right)^{0,875} \left(\frac{\rho_o}{\rho_w} \right)^{0,875} \left(\frac{\eta_w}{\eta_o} \right)^{0,875} \right]}$
Harrison i in. [8]	$R_o = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{1 - x_o}{x_o} \right)^{0,8} \left(\frac{\rho_o}{\rho_w} \right)^{0,515} \right]}$
gdzie:	
	$x_o = \frac{\rho_o w_{o,0}}{[(\rho_o w_{o,0}) + (\rho_w w_{w,0})]}$
GRUPA III	
Model drift-flux	$R_o = \frac{w_{o,0}}{Cw_{2F} + w_{o-2F}}$

Zuber-Findlay [146]	$C = 1,2$ $w_{o-2F} = 1,53 \left(\frac{\check{g}\sigma_c(\rho_w - \rho_o)}{\rho_w^2} \right)^{0,25}$
Hughmark [137]	$R_o = \frac{w_{o,0}}{1,2w_{2F}}$
GRUPA III	
GE RAMP [138]	$R_o \leq 0,65$ $C = 1,13$ $w_{o-2F} = 2,9 \left[\frac{\check{g}\sigma_w(\rho_w - \rho_o)}{\rho_w^2} \right]^{0,25}$ $R_o > 0,65$ $C = 1 + 0,13 \left(\frac{1 - R_{o,zm}}{1 - 0,65} \right)$ $w_{o-2F} = 2,9 \left[\frac{\check{g}\sigma_w(\rho_w - \rho_o)}{\rho_w^2} \right]^{0,25} \left(\frac{1 - R_o}{1 - 0,65} \right)$
Bonnecaze i in. [142]	$R_o = \frac{w_{o,0}}{\left(1,2w_{2F} + 0,35\sqrt{\check{g}d} \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_w} \right) \right)}$
gdzie:	$w_{2F} = w_{o,0} + w_{w,0}$

Podczas wykonywania porównywania danych eksperymentalnych z cytowanymi w tabeli 6.14 równaniami dedykowanymi do obliczania udziałów objętościowych faz w strudze dwufazowej, fazę gazową występującą w równaniach zastąpiono fazą olejową, która podobnie jak gaz posiadała mniejszą gęstość w stosunku do fazy drugiej – wody.

Z porównania układów punktów pomiarowych pochodzących z eksperymentu z obliczonymi wg wybranych metod (rys. 6.29-6.38) wynika, że wybrane metody wykazują zróżnicowaną dokładność obliczeń. Jednocześnie zauważyć można, że im wyższe występowały wartości udziałów objętościowych oleju, tym wyższą uzyskiwano dokładność obliczeń tego parametru. Jednocześnie, zaobserwować można także, że największe różnice pomiędzy zmierzonymi, a obliczonymi wartościami udziałów objętościowych oleju występowały dla oleju ITERM 12 i ITERM 30, a najmniejsze obserwowano dla oleju ITERM 6. Tendencja ta, powtarzała się w każdym z rozpatrywanych przypadków. Na taki przebieg układu punktów mogły mieć wpływ właściwości fizyczne badanych cieczy, a zwłaszcza ich wysoka lepkość, w porównaniu z fazą drugą, czyli wodą oraz efektem występowania w tego typu przepływach zjawiska poślizgu międzyfazowego, które w znaczący sposób wpływało na wartości udziałów objętościowych faz uczestniczących w przepływie, a wynikały również z wartości strumieni przepływu każdej z nich.

Podsumowując, z przeprowadzonych porównań wynika, że wytypowane metody adekwatne do przepływów typu gaz-ciecz mogą być stosowane w przepływie typu ciecz-ciecz, jednak nie wszystkie metody oddają wysoką dokładność w stosunku do wartości zmierzonych. Z analizy zarówno graficznej jak i statystycznej wynika, że najwyższą dokładnością obliczeń cechowała się metoda Harrisona i in. (rys. 6.34), ale także Armanda (rys. 6.31) oraz Chisholma (rys. 6.30), oparte o parametr Lockharta-Martinelliego [83], według której wartości średniego błędu względnego oraz średniego odchylenia standardowego były najmniejsze. Natomiast, spośród metod opartych na modelu drift-flux odznaczających się najwyższą dokładnością wymienić można metodę Hughmarka (rys. 6.37) i metodę GE RAMP (rys. 6.35), jednak procent ich dokładności nie jest zadowalający.

Z zawartego w tabeli 6.13 graficznego ujęcia dokładności metod obliczeniowych wynika jednoznacznie, że w zakresie błędu kalkulacyjnego do $\pm 30\%$, procentowy udział punktów spełniających te kryterium wynosi dla wszystkich metod poniżej 50%. Dlatego też, w niniejszej pracy podjęto działania, mające na celu wskazanie dokładniejszej metody wyznaczania udziałów objętościowych faz w przepływie dwufazowym typu ciecz-ciecz, a następnie rozszerzenie opracowanej metody dla warunków przepływu trójfazowego typu gaz-ciecz-ciecz, zwłaszcza w zakresie przepływu pierścieniowego.

6.2.3. Własna metoda obliczania udziałów objętościowych faz w opadającym przepływie dwufazowym ciecz-ciecz

W ogólnym przypadku udział objętościowy oleju przy przepływie dwufazowym woda-olej, poprzez analogię do przepływu dwufazowego gaz-ciecz, może być określony za pomocą równania

$$R_o = \frac{1}{1 + \frac{1 - x_o}{x_o} \frac{\rho_o}{\rho_w} \frac{w_o}{w_w}} = \frac{1}{1 + s^* \frac{1 - x_o}{x_o} \frac{\rho_o}{\rho_w}}, \quad (6.7)$$

w którym wartość udziału objętościowego oleju zależy m.in. od wartości rzeczywistych prędkości oleju i wody w płynącej mieszaninie. Oznaczając stosunek tych prędkości jako poślizg międzyfazowy s^* można wykazać, że jest on stosunkiem, wcześniej analizowanych wartości względnego poślizgu $S_{wzgl,o}$ oraz $S_{wzgl,w}$, a mianowicie

$$s^* = \frac{w_o}{w_w} = \frac{\frac{w_{o,0}}{R_o}}{\frac{w_{w,0}}{R_w}} = \frac{\frac{w_{o,0}}{w_{2F}} \frac{1}{R_o}}{\frac{w_{w,0}}{w_{2F}} \frac{1}{R_w}} = \frac{\frac{\varepsilon_o}{R_o}}{\frac{\varepsilon_w}{R_w}} = \frac{S_{wzgl,o}}{S_{wzgl,w}}. \quad (6.8)$$

W oparciu o wyniki badań własnych prowadzonych z wykorzystaniem czterech różnych jakościowo olejów stwierdzono, że wartość poślizgu międzyfazowego zawiera się w stosunkowo dużym zakresie zmienności $s^*=(0,03-1,6)$. Dla wartości $s^*<1$ występowała relacja $R_o>\varepsilon_o$, natomiast dla $s^*>1$ odpowiednio relacja $R_o<\varepsilon_o$. W przypadku $s^*=1$ przepływ mieszaniny woda-olej miał charakter bezpoślizgowy a wartość rzeczywistego udziału objętościowego była równa wartości udziału wlotowego wynikającego z relacji prędkości strumieni obu faz, czyli $R_o=\varepsilon_o$, gdzie

$$\varepsilon_o = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_o + \dot{V}_w} = \frac{w_{o,0}}{w_{o,0} + w_{w,0}} = \frac{w_{o,0}}{w_{2F}}. \quad (6.9)$$

Uwzględniając, że mamy do czynienia ze sływem grawitacyjnym mieszaniny wodno-olejowej, wartość poślizgu międzyfazowego poszukiwano w formie zależności

$$s^* = C \cdot Fr_o^{n_1} \cdot Fr_w^{n_2}, \quad (6.10)$$

w której wartości liczb Froud'a dla fazy olejowej i wodnej obliczono jako:

$$Fr_o = \frac{w_{o,0}^2}{\check{g} \cdot d'} \quad (6.11)$$

$$Fr_w = \frac{w_{w,0}^2}{\check{g} \cdot d'} \quad (6.12)$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń korelacyjnych otrzymano wartości stałej $C=1,109$ oraz wartości wykładników $n_1=0,25$ oraz $n_2=0,17$, uzyskując dla równania

$$s^* = 1,109 \cdot Fr_o^{0,25} \cdot Fr_w^{0,17}, \quad (6.13)$$

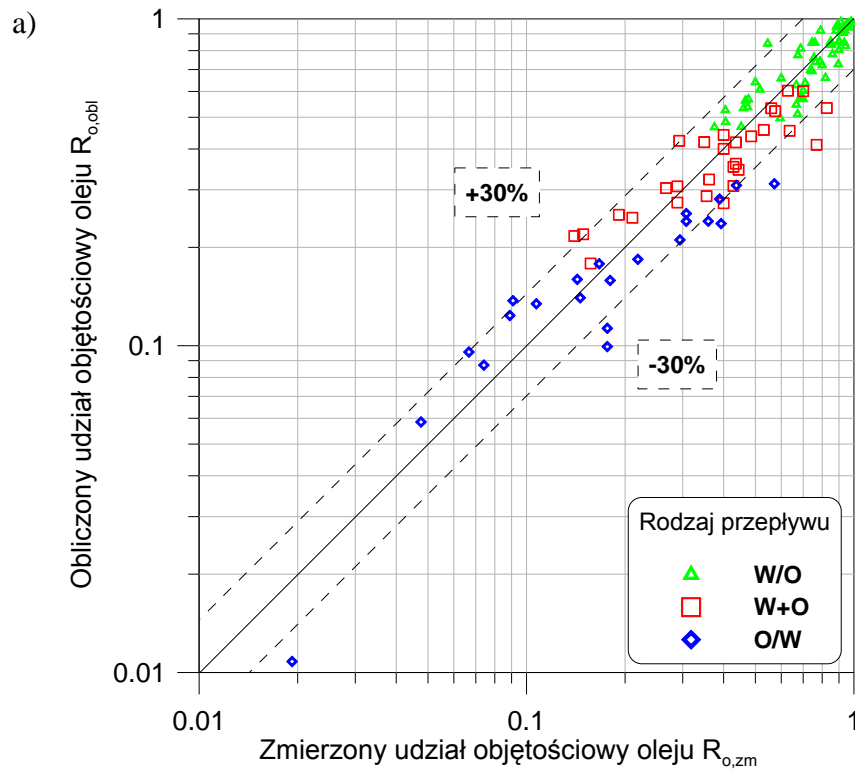
wartość współczynnika korelacji $r=0,925$ i średnią wartość odchylenia standardowego $0,246$. W równaniu tym wartości liczb Froud'a zmieniały się w zakresie $Fr_o = (5 \cdot 10^{-5} - 1,178)$ oraz $Fr_w = (0,002 - 17,87)$. Wstawiając (6.13) do (6.7) uzyskano ogólne równanie do obliczania udziału objętościowego oleju dla spływu cieczy dwufazowej woda-olej

$$R_o = \frac{1}{1 + 1,109 Fr_o^{0,25} Fr_w^{0,17} \frac{1 - x_o \rho_o}{x_o \rho_w}}, \quad (6.14)$$

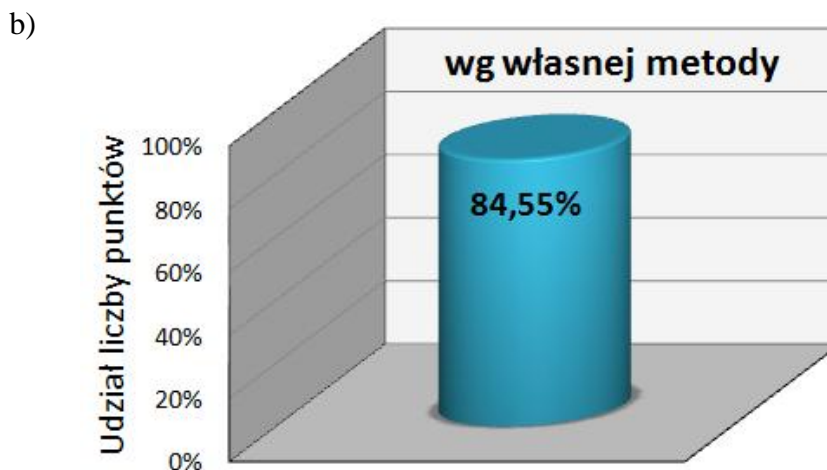
dla którego średnia wartość błędu względnego wynosi $21,6\%$.

Na rys. 6.39a przedstawiono wykres zależności pomiędzy zmierzonymi i obliczonymi wartościami udziału objętościowego oleju według nowo opracowanej zależności (6.14). Z rozmieszczenia danych na rysunku wynika, że w zakresie średniego błędu względnego $\pm 30\%$ zawiera się ponad 80% punktów pomiarowych, co świadczy o dużej dokładności opracowanej metody obliczeniowej i to niezależnie od charakteru przepływu obu faz. Wysoka dokładność opracowanego równania (6.14) została potwierdzona na rys. 6.39b, w postaci wykresu kolumnowego, na którym uzyskano wartość dokładności równą $84,55\%$ punktów, zawartych w zakresie średniego błędu względnego $\pm 30\%$. Uwzględniając dużą dokładność metody (6.14) można ją polecić do

obliczania udziału objętościowego oleju podczas spływu grawitacyjnego mieszaniny woda-olej.



Rys. 6.39a. Porównanie zmierzonych wartości udziału objętościowego oleju z wartościami obliczonymi zależnością (6.14)



Rys. 6.39. Porównanie dokładności obliczeń udziału objętościowego oleju wg własnej zależności (6.14) przy przepływie dwufazowym woda-olej, dla wartości błędu $\pm 30\%$

6.2.4. Udziały objętościowe faz w opadającym, pierścieniowym przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz

W przypadku jednoczesnego przepływu trzech niemieszających się składników mieszaniny jak powietrze, woda i olej, strumienie wszystkich ich składników mają wzajemny wpływ na wartość rzeczywistych udziałów objętościowych faz. Istotny, w tym przypadku wpływ (poza wartościami prędkości pozornych wszystkich faz) ma także informacja o tym, która z faz stanowi fazę dominującą w przepływie wielofazowym.

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych nad hydrodynamiką wielofazowego przepływu pierścieniowego typu powietrze-woda-olej dokonano analizy wpływu wybranych parametrów przepływowych na wartości udziałów objętościowych poszczególnych składników mieszaniny trójfazowej, biorącej udział w opadającym przepływie w kanale pionowym.

Na rys. 6.40 do 6.47 zamieszczono wykresy przedstawiające relację między pozornymi prędkościami przepływu poszczególnych składników mieszaniny trójfazowej, a wartościami udziałów objętościowych, a także pomiędzy wartościami rzeczywistych udziałów objętościowych konkretnego składnika mieszaniny a wartością jego wlotowego udziału objętościowego.

Ze względu na obecność w tego typu przepływach wielu zmiennych, jako stały parametr przyjęto prędkość pozorną jednego z trzech składników tworzących mieszaninę trójfazową, jako wielkość opisującą dany przepływ, a pozostałe wartości prędkości pozornych rozważono jako zmienne. Z powodu szerokiego zakresu zmian parametrów przepływowych zilustrowano wybrane przykłady zmian zachodzących w tego typu przepływach.

Rys. 6.40 przedstawia wykres udziału objętościowego gazu w funkcji prędkości pozornej gazu, przy zmiennych prędkościach pozornych wody i stałej prędkości oleju o danej lepkości.

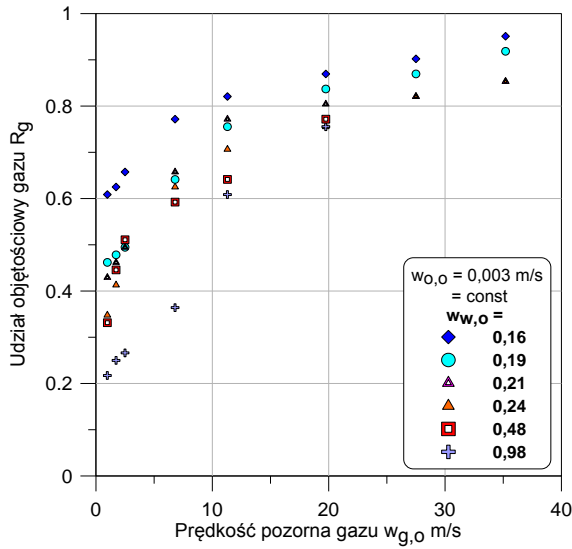
Rozkład punktów doświadczalnych na wykresie (rys. 6.40) wskazuje, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej powietrza wzrastają wartości udziałów objętościowych gazu oraz, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody maleje jednocześnie wartość udziału objętościowego gazu przy określonej wartości prędkości pozornej tego składnika. Z kolei z rys. 6.41 odczytać można, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej

wody maleje wartość udziału objętościowego gazu dla danej wartości jego wlotowego udziału objętościowego. Im większe występowały wartości wlotowego udziału objętościowego gazu, tym silniejszy następował jego spadek w stosunku do wartości udziału objętościowego powietrza. Ze względu na małą prędkość pozorną fazy olejowej, w przepływie dominowała faza wodna. Na kolejnych wykresach (rys. 6.42 i 6.43) przedstawiono analogiczne wielkości parametrów przepływowych, jednakże dla wyższych wartości stałych prędkości pozornych oleju.

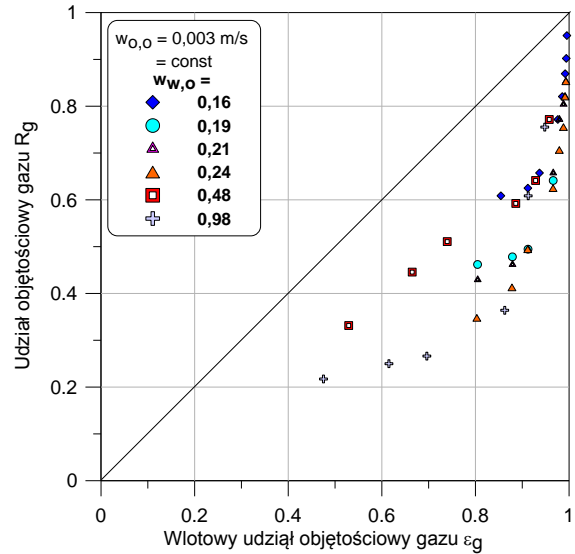
Z rozkładu punktów doświadczalnych na rys. 6.42 wynika, analogicznie jak z rys. 6.40, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej powietrza wzrastają wartości udziałów objętościowych gazu oraz, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody maleje jednocześnie wartość udziału objętościowego gazu przy określonej jego prędkości pozornej. Z kolei z rys. 6.43 odczytać można, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody maleje wartość udziału objętościowego gazu dla danej wartości wlotowego udziału objętościowego gazu. Im większe występowały wartości wlotowego udziału objętościowego gazu, tym silniejszy następował jego spadek w stosunku do wartości udziału objętościowego powietrza.

Natomiast, na rys. 6.44 zobrazowano wykres udziału objętościowego powietrza w funkcji prędkości pozornej powietrza, przy stałej prędkości pozornej wody dla wzrastających prędkości pozornych oleju. Z danych zawartych na wykresie wynika, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu wzrastają także udziały objętościowe powietrza, a wraz ze wzrostem prędkości pozornej oleju maleją.

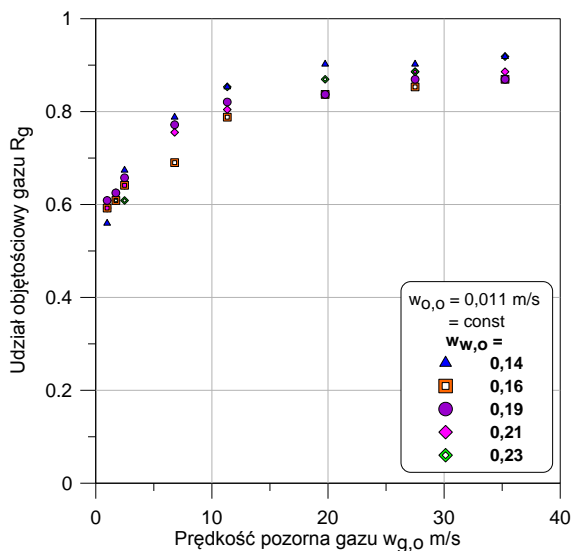
Z kolei, z wykresu przedstawionego na rys. 6.45 wynika, że wszystkie punkty pomiarowe leżą poniżej linii opisującej zależność $R_g = \varepsilon_g$, co oznacza, że wartości udziału objętościowego gazu były niższe od wartości jego wlotowego udziału objętościowego.



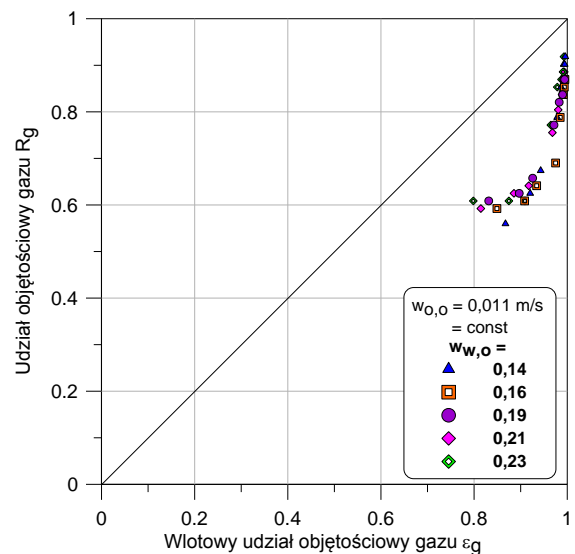
Rys. 6.40. Zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej gazu przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o=0,197 \text{ Pa}\cdot\text{s}$



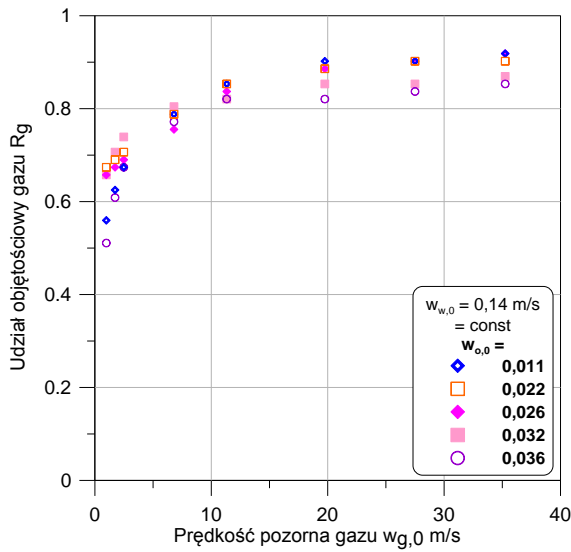
Rys. 6.41. Zależność udziału objętościowego gazu od wlotowego udziału objętościowego gazu przy stałej prędkości pozornej oleju $\eta_o=0,197 \text{ Pa}\cdot\text{s}$



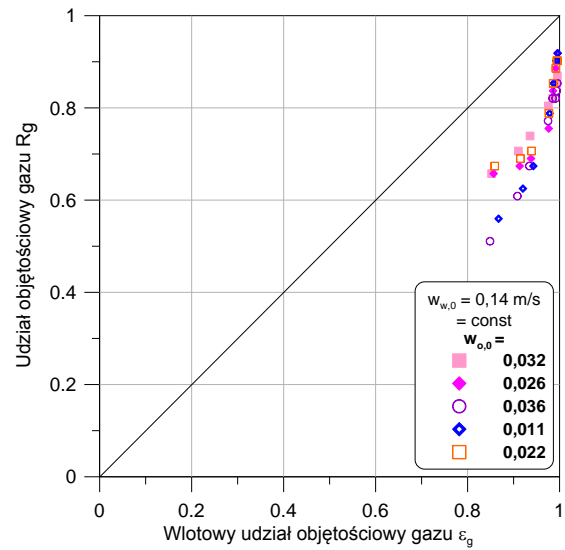
Rys. 6.42. Zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej gazu przy stałej prędkości pozornej oleju $\eta_o=0,197 \text{ Pa}\cdot\text{s}$



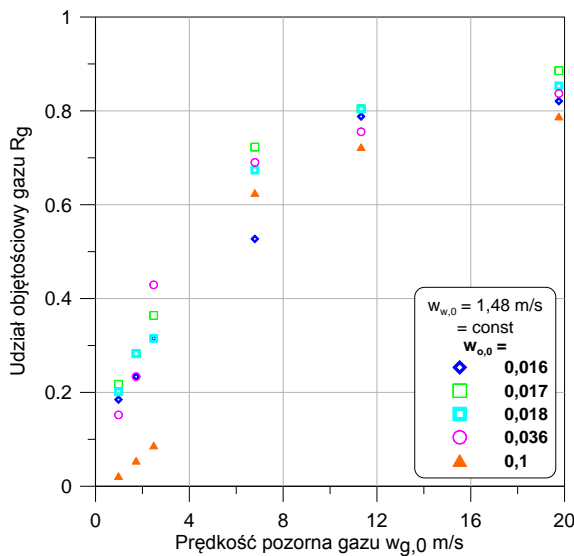
Rys. 6.43. Zależność udziału objętościowego gazu od wlotowego udziału objętościowego gazu przy stałej prędkości pozornej oleju $\eta_o=0,197 \text{ Pa}\cdot\text{s}$



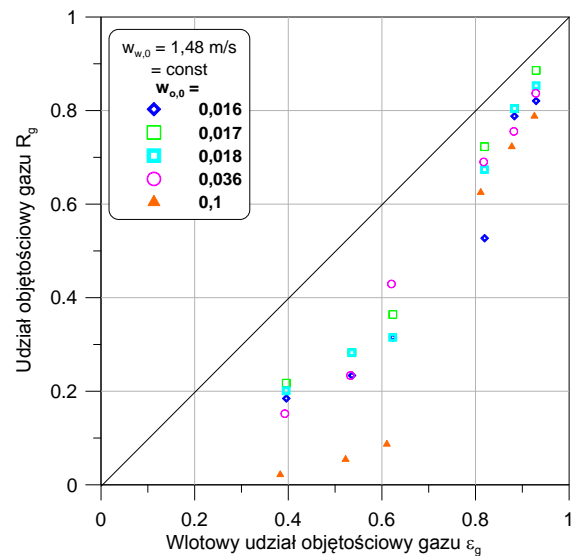
Rys. 6.44. Zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej gazu przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.45. Zależność udziału objętościowego gazu od wlotowego udziału objętościowego gazu przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.46. Zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej gazu przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.47. Zależność udziału objętościowego gazu od wlotowego udziału objętościowego gazu przy stałej prędkości pozornej wody

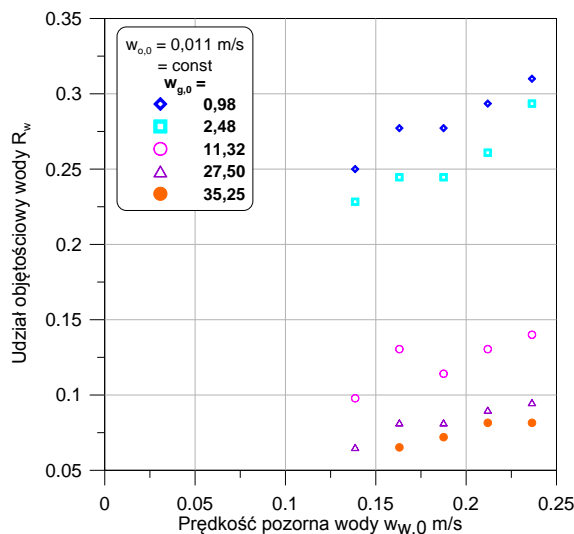
Charakterystyka rozkładu punktów na wykresie (rys. 6.46) jest podobna do rozmieszczenia danych na rys. 6.40; 6.42 i 6.44. Z danych zawartych na wykresie wynika, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu wzrastają także udziały

objętościowe powietrza, a wraz ze wzrostem prędkości pozornej oleju odpowiednio maleją. Z kolei z rys. 6.47 odczytać można, że wartości udziału objętościowego powietrza są mniejsze od odpowiadających im wartości wlotowego udziału objętościowego gazu.

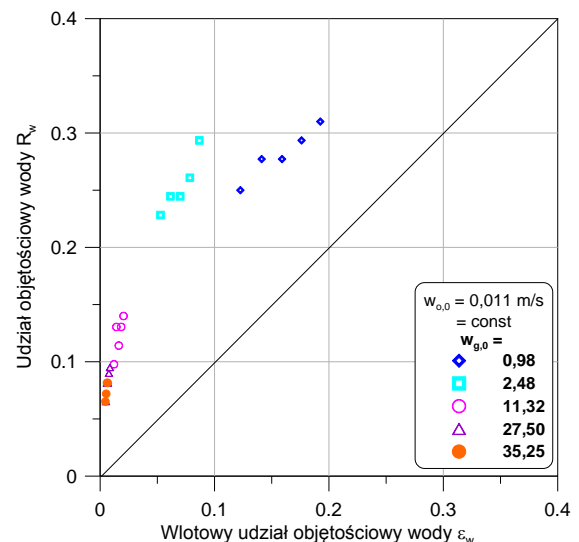
Na rys. 6.48 i 6.50 przedstawiono z kolei zależność udziału objętościowego wody od prędkości pozornej wody, przy stałej prędkości pozornej fazy olejowej. Z wykresu zauważyć można, że wzrost prędkości pozornej fazy gazowej, przy stałej prędkości pozornej oleju powoduje spadek wartości udziału objętościowego wody.

Z rys. 6.49 i 6.51 zauważa się, że wszystkie punkty lokowały się nad linią opisującą zależność $R_w = \varepsilon_w$, co oznaczało, że wartości udziału objętościowego wody były wyższe od wartości wlotowego udziału objętościowego fazy wodnej.

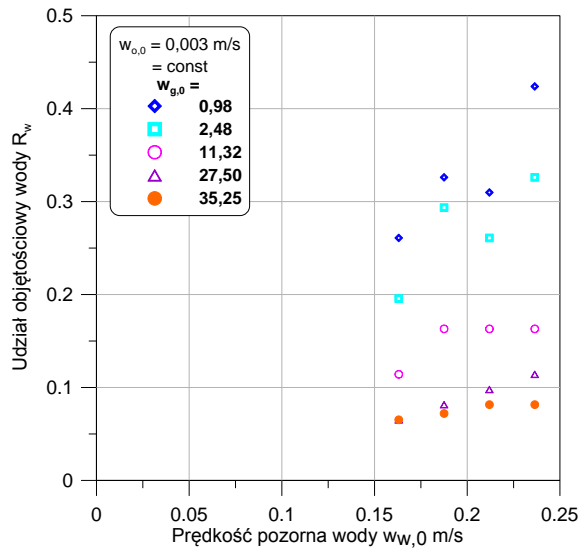
Na wykresach 6.52 i 6.54 oraz 6.53 i 6.55 zilustrowano odpowiednio zależności udziału objętościowego oleju w funkcji jego wartości prędkości pozornej i wlotowego udziału objętościowego.



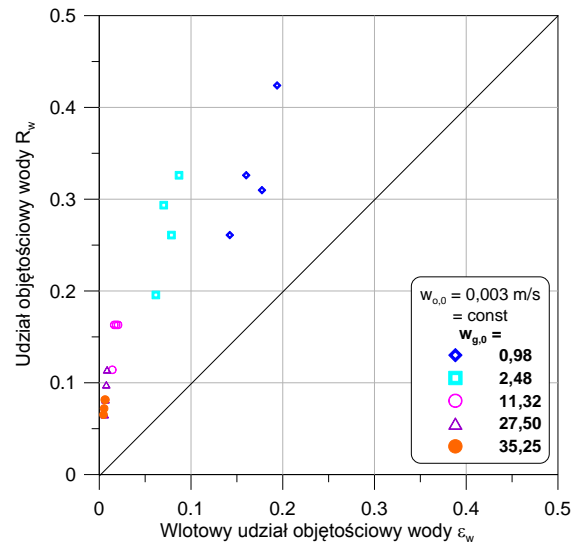
Rys. 6.48. Zależność udziału objętościowego wody od prędkości pozornej wody przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości oleju $\eta_o=0,197$ Pa·s



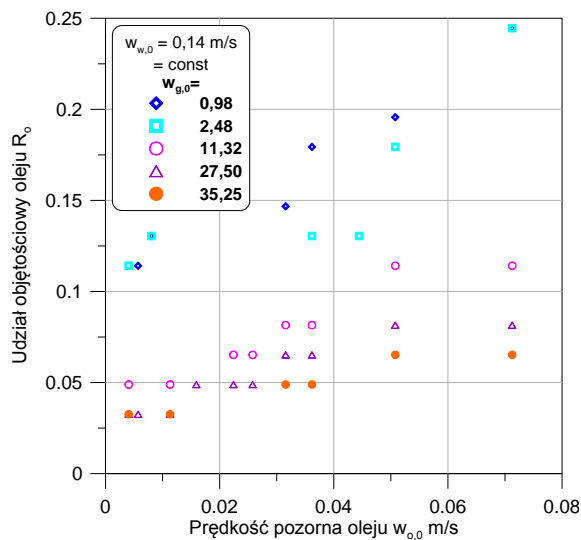
Rys. 6.49. Zależność udziału objętościowego wody od wlotowego udziału objętościowego wody przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości oleju $\eta_o=0,197$ Pa·s



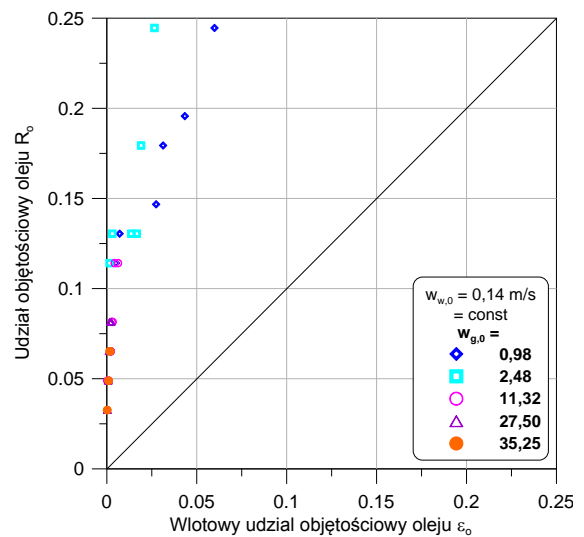
Rys. 6.50. Zależność udziału objętościowego wody od prędkości pozornej wody przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości oleju $\eta_o=0,197 \text{ Pa}\cdot\text{s}$



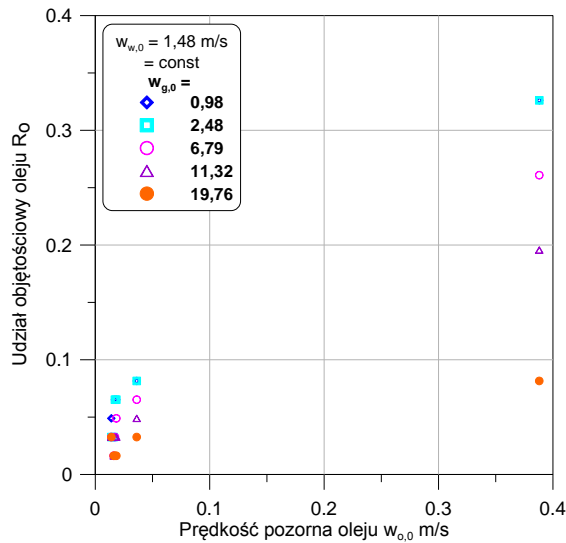
Rys. 6.51. Zależność udziału objętościowego wody od wlotowego udziału objętościowego wody przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości oleju $\eta_o=0,197 \text{ Pa}\cdot\text{s}$



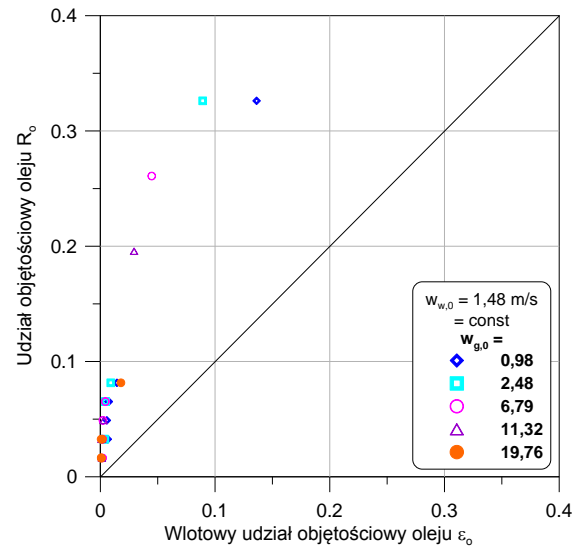
Rys. 6.52. Zależność udziału objętościowego oleju od prędkości pozornej oleju przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.53. Zależność udziału objętościowego oleju od wlotowego udziału objętościowego oleju przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.54. Zależność udziału objętościowego oleju od prędkości pozornej oleju przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.55. Zależność udziału objętościowego oleju od wlotowego udziału objętościowego oleju przy stałej prędkości pozornej wody

Z wykresów 6.52 i 6.54 odczytać można znaczny wpływ prędkości powietrza na wartości udziałów objętościowych oleju, które maleją wraz ze wzrostem wartości prędkości pozornych gazu. Ponadto, na rys. 6.52 widać dokładnie, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej oleju wzrasta znacznie wartość jego udziału objętościowego, zwłaszcza przy małych prędkościach pozornych gazu.

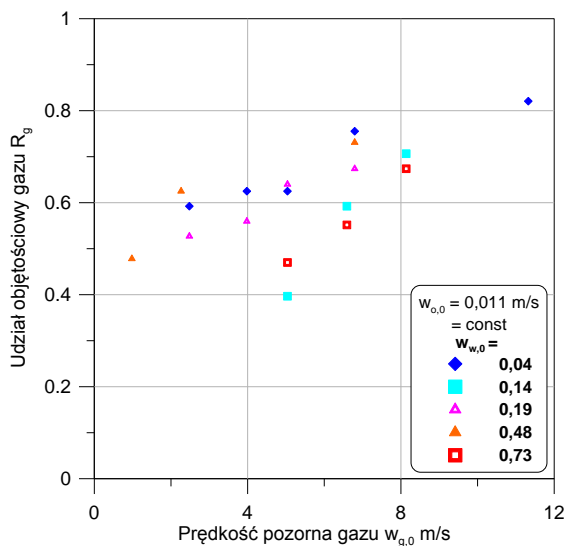
Z kolei, na rys. 6.53 i 6.55 obserwuje się również wpływ fazy gazowej na wartości udziałów objętościowych fazy olejowej. Największy jej wpływ zauważalny jest na rys. 6.55, na którym punkty doświadczalne przesuwają się coraz bliżej osi rzędnych wraz ze wzrostem prędkości pozornych gazu. Tendencja taka wpływała na powstawanie większych różnic między wartościami wlotowych udziałów objętościowych oleju, a udziałami objętościowymi tej fazy ciekłej.

Na kolejnych wykresach, tj. 6.56–6.59 przedstawiono zależność udziału objętościowego gazu od jego prędkości pozornej oraz od wlotowego udziału objętościowego gazu, przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o=0,3$ Pa·s, dla dwóch różnych jej wartości.

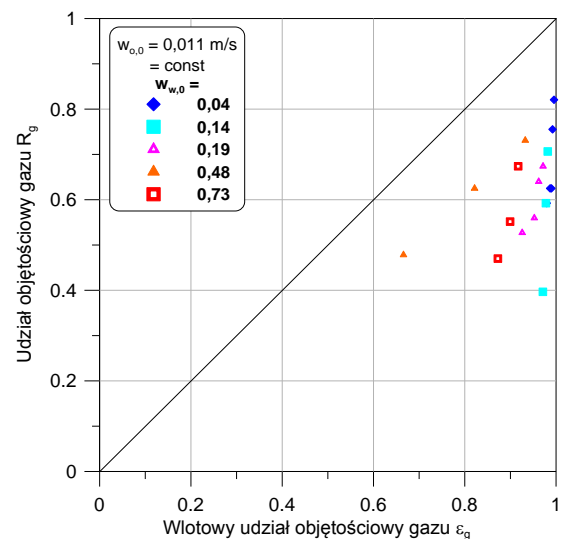
Z układu punktów doświadczalnych na rys. 6.56 i 6.58 wywnioskować można, że podobnie jak w przypadku oleju o mniejszej lepkości i porównywalnej prędkości pozornej, wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu wzrastały wartości udziału

objętościowego tego składnika. Natomiast, wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody jego wartości malały dla danej prędkości pozornej gazu.

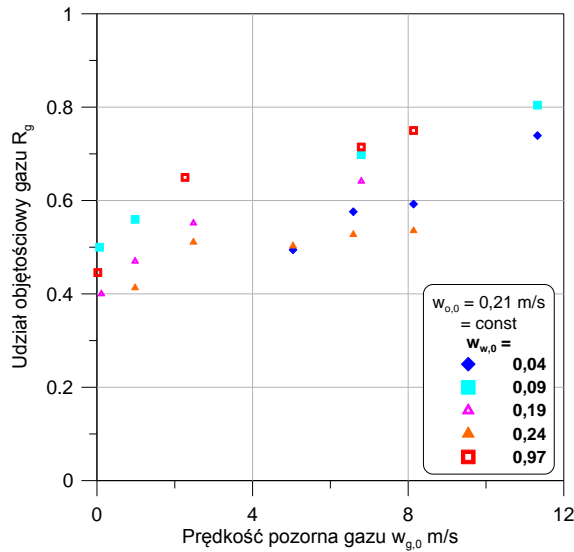
Z kolei na rys. 6.57 i 6.59 zauważyć można, że przeważająca liczba punktów pomiarowych leży pod linią opisującą zależność $R_g = \varepsilon_g$, co oznacza, że wartości udziału objętościowego gazu były niższe od wartości jego wlotowego udziału objętościowego. Wynioskować można także, że różnice pomiędzy udziałami objętościowymi gazu a jego wlotowymi udziałami zmniejszają się wraz ze wzrostem prędkości pozornej wody. Rys. 6.60 i 6.62 przedstawiają zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej tego składnika, przy stałych prędkościach pozornych wody, dla dwóch wybranych różnych ich wartości oraz, przy wzrastających prędkościach pozornych drugiej fazy ciekłej występujących w mieszaninie trójfazowej, tj. oleju o lepkości $\eta_o = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Z układu punktów doświadczalnych na tych wykresach wynika, że wraz ze wzrostem prędkości pozornej gazu wzrastają także udziały objętościowe powietrza, a maleją wraz ze wzrostem prędkości pozornej oleju. Jedynie na rys. 6.62 dla najmniejszej wartości prędkości pozornej oleju równej $w_{o,0} = 0,01 \text{ m/s}$, wartości udziału objętościowego gazu są większe niż w przypadku większych prędkości pozornych oleju, co związane było ze strumieniem objętościowym tej fazy zadanej na wlocie do kanału pomiarowego.



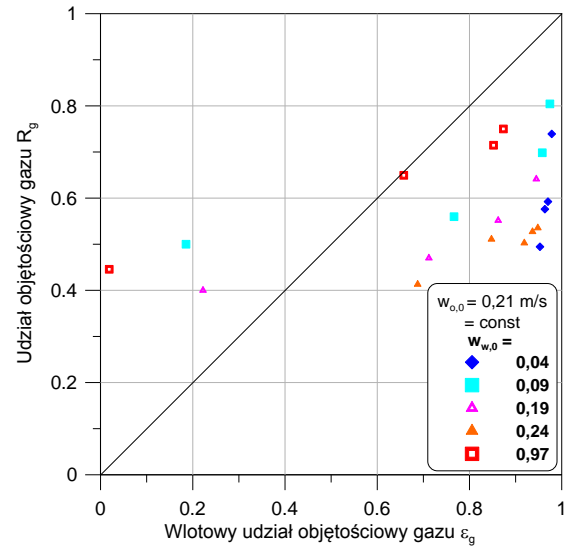
Rys. 6.56. Zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej gazu przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$



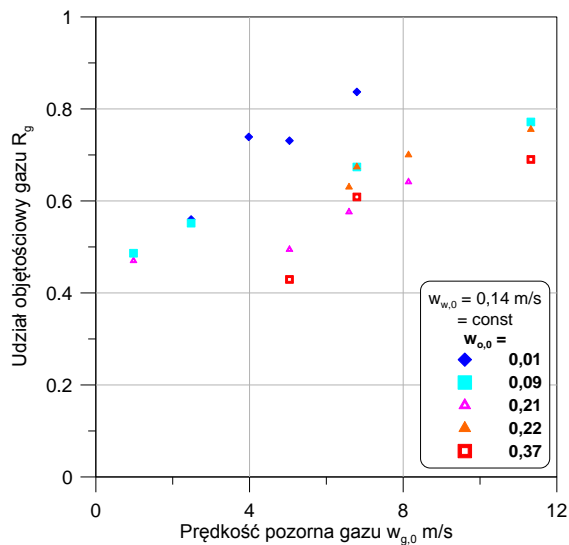
Rys. 6.57. Zależność udziału objętościowego gazu od wlotowego udziału objętościowego gazu przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$



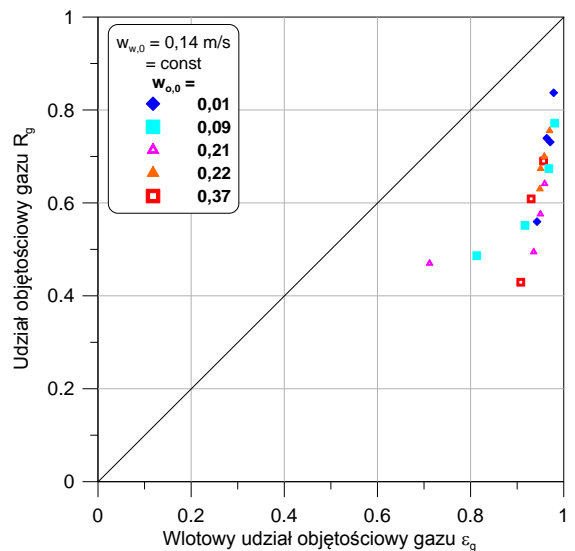
Rys. 6.58. Zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej gazu przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o=0,3$ Pa·s



Rys. 6.59. Zależność udziału objętościowego gazu od wlotowego udziału objętościowego gazu przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o=0,3$ Pa·s

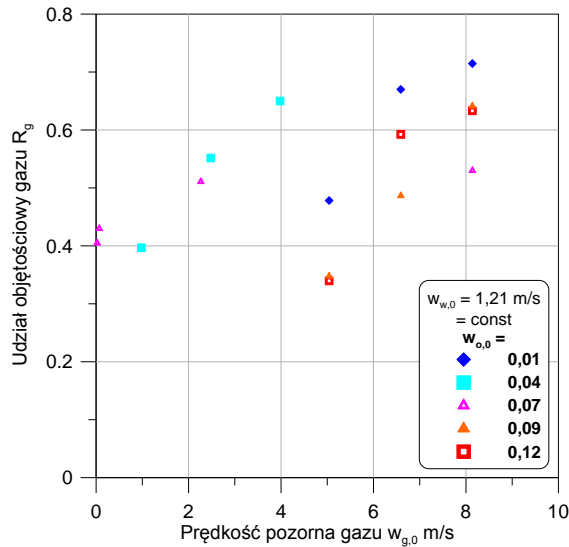


Rys. 6.60. Zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej gazu przy stałej prędkości pozornej wody

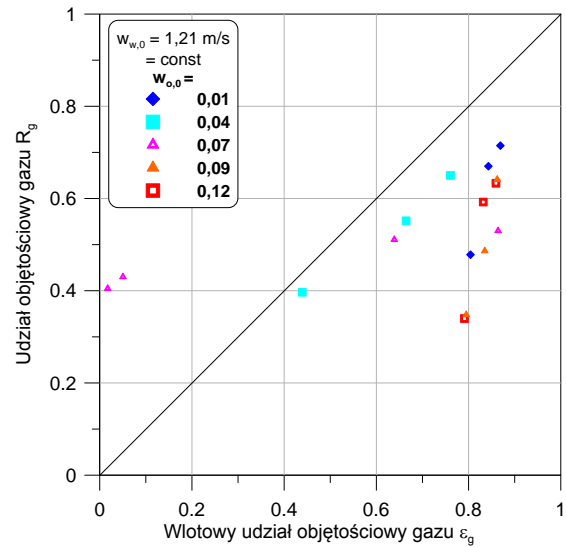


Rys. 6.61. Zależność udziału objętościowego gazu od wlotowego udziału objętościowego gazu przy stałej prędkości pozornej wody

Natomiast na rys. 6.61 i 6.63 obserwowano położenie głównej liczby punktów pod linią opisującą zależność $R_g = \varepsilon_g$, co wskazywało na niższe wartości udziału objętościowego gazu od wartości wlotowego udziału objętościowego gazu.



Rys. 6.62. Zależność udziału objętościowego gazu od prędkości pozornej gazu przy stałej prędkości pozornej wody

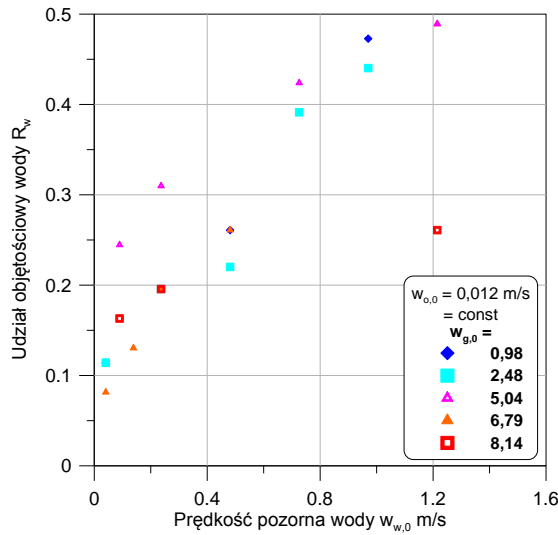


Rys. 6.63. Zależność udziału objętościowego gazu od wlotowego udziału objętościowego gazu przy stałej prędkości pozornej wody

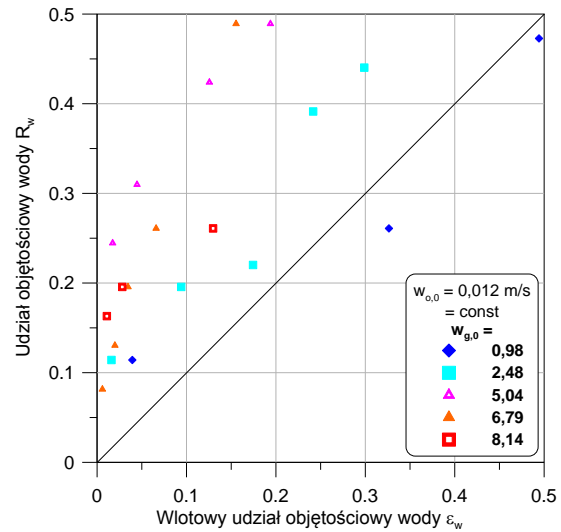
Na rys. 6.64 i 6.66 przedstawiono z kolei zależność udziału objętościowego wody od prędkości pozornej wody, przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o = 0,3$ Pa·s. Z wykresów tych można zauważyć, że wzrost prędkości pozornej fazy gazowej, przy stałej prędkości pozornej oleju wpływa w głównej mierze na spadek wartości udziału objętościowego wody dla danej jej prędkości pozornej. Natomiast na rys. 6.65 i 6.67 zilustrowano zależność udziału objętościowego wody od wlotowego udziału objętościowego wody, przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o = 0,3$ Pa·s. Z wykresów tych odczytać można, że punkty pomiarowe lokowały się nad linią charakteryzującą zależność $R_w = \varepsilon_w$, co wskazywało na wyższe wartości udziału objętościowego wody w stosunku do ich wartości wlotowego udziału objętościowego.

Na kolejnych wykresach, tj. 6.68 i 6.70 oraz 6.69 i 6.71 zobrazowano odpowiednio zależności udziału objętościowego oleju od wartości jego prędkości pozornych i wartości wlotowego udziału objętościowego tego składnika. Z wykresów 6.68 i 6.70 wywnioskować można, że prędkość pozorna gazu ma znaczący wpływ na wartość udziałów objętościowych oleju. Wraz ze wzrostem prędkości pozornej

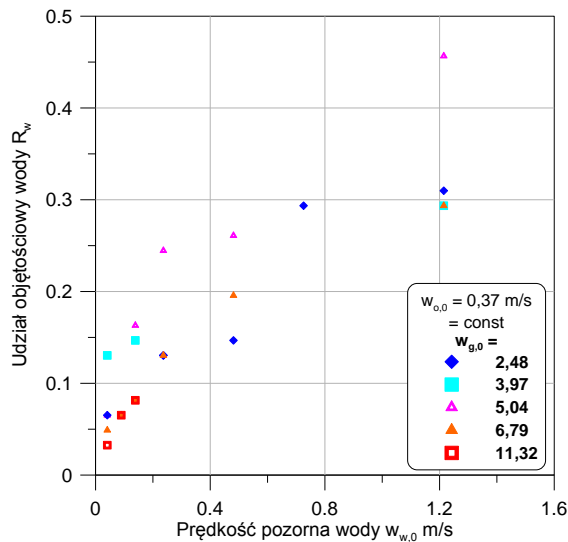
powietrza, maleje wartość udziałów objętościowych oleju. Z kolei, z rys. 6.69 i 6.71 odczytać można także wpływ fazy gazowej na wartości udziałów objętościowych oleju, których wartość wzrasta najintensywniej przy małych wartościach prędkości pozornej gazu.



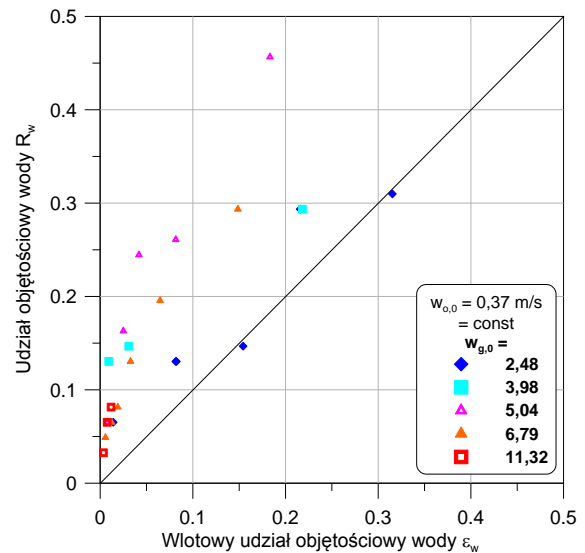
Rys. 6.64. Zależność udziału objętościowego wody od prędkości pozornej wody przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o=0,3$ Pa·s



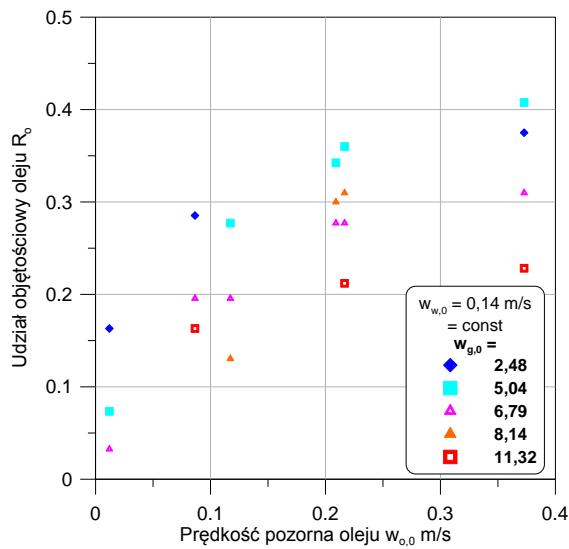
Rys. 6.65. Zależność udziału objętościowego wody od wlotowego udziału objętościowego wody przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o=0,3$ Pa·s



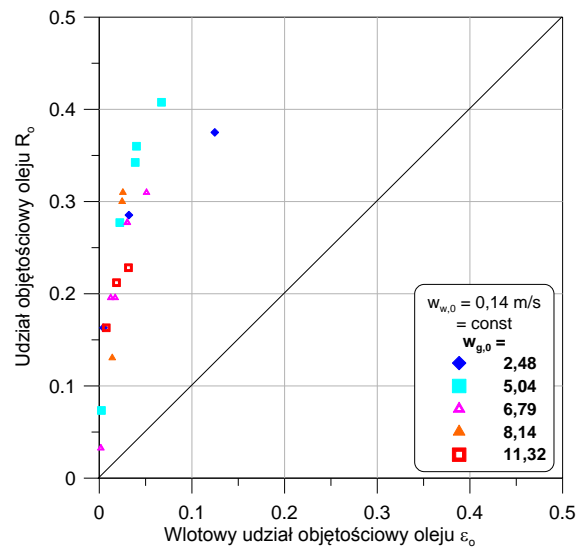
Rys. 6.66. Zależność udziału objętościowego wody od prędkości pozornej wody przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o=0,3$ Pa·s



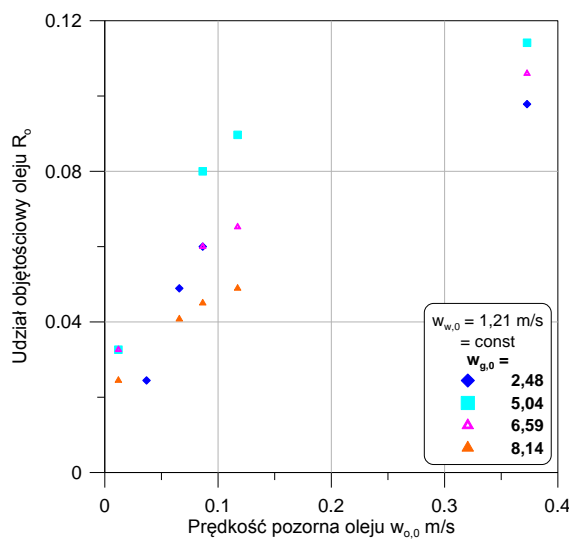
Rys. 6.67. Zależność udziału objętościowego wody od wlotowego udziału objętościowego wody przy stałej prędkości pozornej oleju o lepkości $\eta_o=0,3$ Pa·s



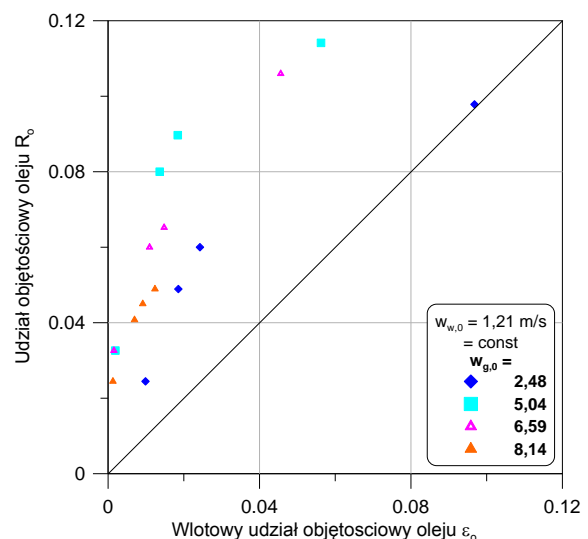
Rys. 6.68. Zależność udziału objętościowego oleju od prędkości pozornej oleju przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.69. Zależność udziału objętościowego oleju od wlotowego udziału objętościowego oleju przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.70. Zależność udziału objętościowego oleju od prędkości pozornej oleju przy stałej prędkości pozornej wody



Rys. 6.71. Zależność udziału objętościowego oleju od wlotowego udziału objętościowego oleju przy stałej prędkości pozornej wody

W wyniku porównania przedstawionych w pracy wykresów ilustrujących udziały objętościowe gazu w funkcji prędkości pozornych gazu można podsumować, że

niezależnie od faktu, która z faz ciekłych, woda czy olej stanowi fazę dominującą w przepływie oraz niezależnie od wartości lepkości fazy olejowej udział objętościowy gazu wzrasta, wraz ze wzrostem jego prędkości pozornych. Jednocześnie w większości przedstawionych wykresów udział objętościowy gazu zmniejsza się w stosunku do wzrastających prędkości pozornych każdej z rozpatrywanych faz ciekłych. Natomiast, w przypadku zależności udziałów objętościowych gazu od jego wartości wlotowych udziałów objętościowych obserwowano w głównej mierze tendencję, w której wartości udziałów objętościowych były mniejsze od wartości ich wlotowych udziałów objętościowych. Z kolei, z analizy wykresów przedstawiających udziały objętościowe faz ciekłych w stosunku do wartości ich prędkości pozornych obserwowano również wzrost wartości udziałów objętościowych wody i oleju, wraz ze wzrostem wartości prędkości pozornych tych faz w przepływie oraz ich spadek, wraz ze wzrostem prędkości pozornej dla gazu. Charakter taki, był powtarzalny dla każdego przedstawionego przypadku, niezależnie od lepkości cieczy olejowej oraz od wartości prędkości poszczególnych faz ciekłych. Natomiast, z porównania wykresów ilustrujących udziały objętościowe faz ciekłych w funkcji ich wlotowych udziałów objętościowych można stwierdzić, że niemal w każdym przypadku rozpatrywanych przepływów, wartości udziałów objętościowych wody czy oleju są większe od odpowiadających im wartościom wlotowych udziałów objętościowych. Zachowanie takie może świadczyć o „zaleganiu” danej fazy ciekłej na ścianie kanału, zwłaszcza w przypadku występowania fazy o większej lepkości.

6.2.5. Ocena metod obliczania udziałów objętościowych faz w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz

W oparciu o otrzymane wyniki badań własnych nad wartościami rzeczywistych udziałów objętościowych faz podczas przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej, przeprowadzono ich opis matematyczny w stosunku do wybranych metod obliczeniowych. Z uwagi na fakt, że w literaturze nie odnaleziono dotychczas prac opisujących opadający przepływ trójfazowy w kanale pionowym, stąd też wykonano próbę oceny możliwości zaadaptowania wyselekcjonowanych metod obliczania udziałów objętościowych faz w przepływie dwufazowym typu ciecz-ciecz, co opisano

w rozdziale 6.2.2, do określania tej wielkości w przepływie trójfazowym typu gaz-ciecz-ciecz.

Ocenę dokładności metod obliczeniowych wartości zmierzonych udziałów objętościowych faz wykonano dla tych samych metod obliczeniowych, w oparciu o które dokonano porównania wartości zmierzonych z wartościami obliczeniowymi dla przepływu dwufazowego woda-olej. Ze względu na silny stopień emulgowania się oleju ITERM 6, porównania dokonano dla trzech pozostałych rodzajów olejów o różnej wartości lepkości, co przedstawiono na rys. 6.72-6.81.

Celem określenia możliwości zastosowania wybranych metod do obliczania udziału objętościowego gazu w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz, przepływ ten rozważono jako pseudodwufazowy gaz-mieszanina cieczy, czyli taki, w którym ciekłe składniki mieszaniny jak woda i olej traktowano jako fazę ciekłą o zastępczych właściwościach [139], które wyznaczano w oparciu o następujące równania (6.15-6.17):

- gęstość mieszaniny cieczy

$$\rho_c = R_w^* \cdot \rho_w + R_o^* \cdot \rho_o, \quad (6.15)$$

- lepkość mieszaniny cieczy

$$\eta_c = R_w^* \cdot \eta_w + R_o^* \cdot \eta_o, \quad (6.16)$$

- napięcie powierzchniowe mieszaniny cieczy

$$\sigma_c = R_w^* \cdot \sigma_w + R_o^* \cdot \sigma_o, \quad (6.17)$$

w których koncentracja oleju i wody w fazie ciekłej przyjęto wyznaczać z nowo opracowanego równania na udział oleju w przepływie dwóch cieczy niemieszających się (6.14), tj.:

$$R_o^* = \frac{1}{1 + 1,109 Fr_o^{0,25} Fr_w^{0,17} \frac{1 - x_o^* \rho_o}{x_o^* \rho_w}}, \quad (6.18)$$

oraz

$$R_w^* = 1 - R_o^*. \quad (6.19)$$

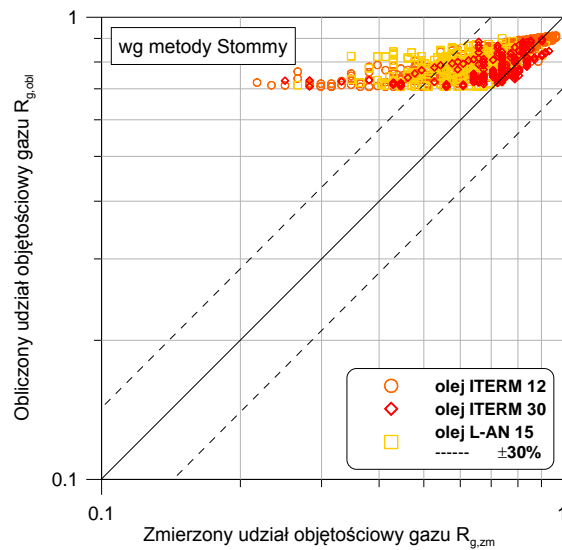
Udział masowy oleju w ciekłej mieszaninie wodno-olejowej obliczano jako:

$$x_o^* = \frac{w_{o,0} \cdot \rho_o}{w_{o,0} \cdot \rho_o + w_{w,0} \cdot \rho_w} = \frac{g_o}{g_c}. \quad (6.20)$$

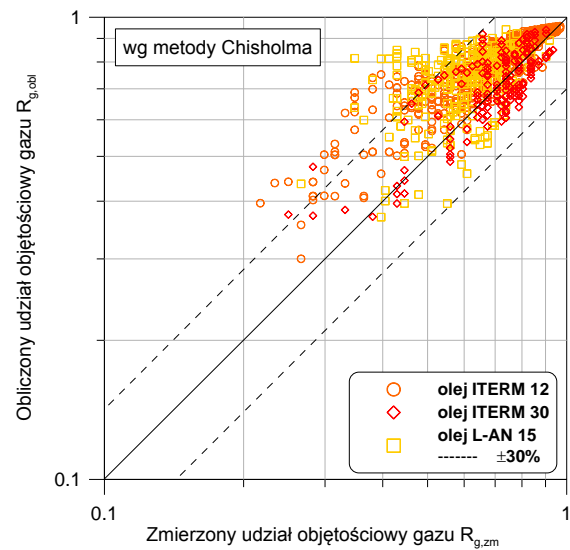
Z kolei, wartości liczb bezwymiarowych Fr_o Fr_w , obliczono uwzględniając wartości ich prędkości pozornych w strudze trójfazowej:

$$Fr_o = \frac{w_{o,0}^2}{\tilde{g} \cdot d} \quad \text{oraz} \quad Fr_w = \frac{w_{w,0}^2}{\tilde{g} \cdot d} \quad (6.21)$$

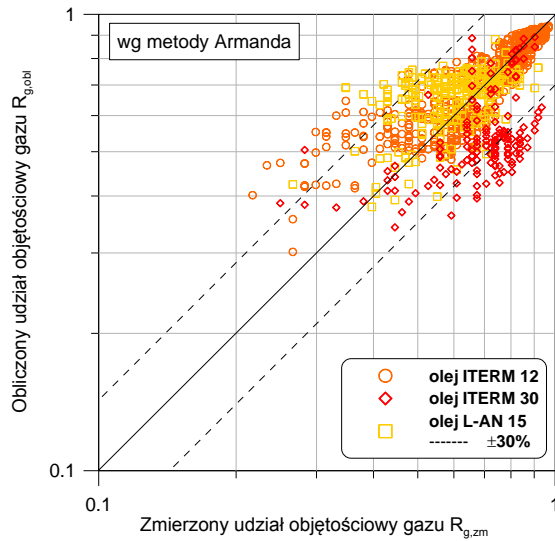
Szczegółowe postaci funkcyjne wybranych metod do obliczania wartości udziałów objętościowych gazu zawarto w tabeli 6.16.



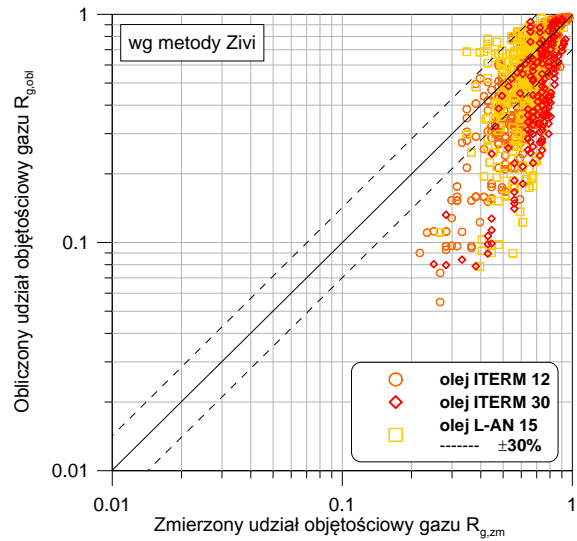
Rys. 6.72. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Stommy



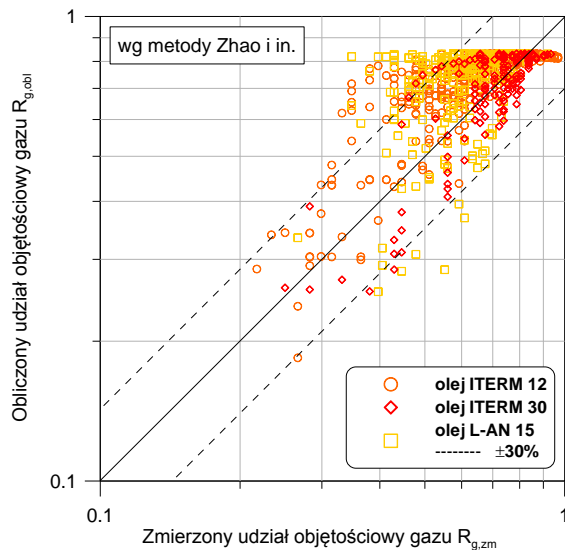
Rys. 6.73. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Chisholma



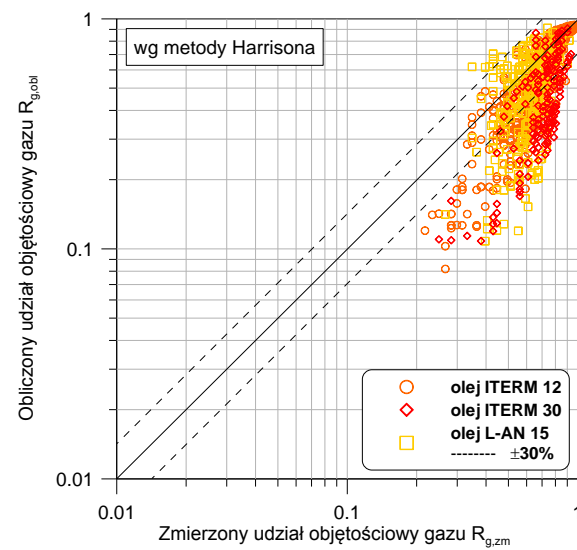
Rys. 6.74. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Armanda



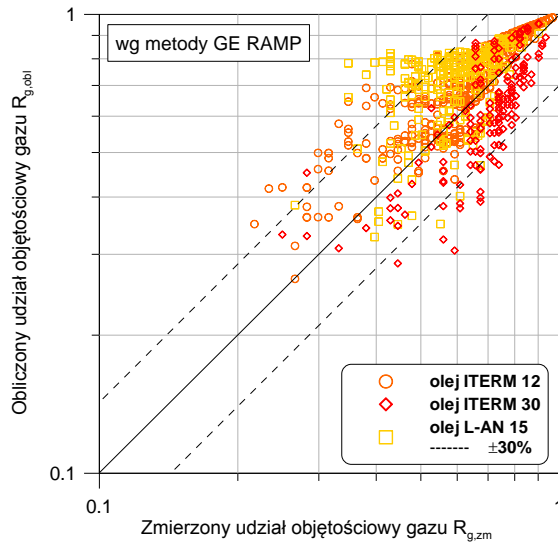
Rys. 6.75. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Zivi



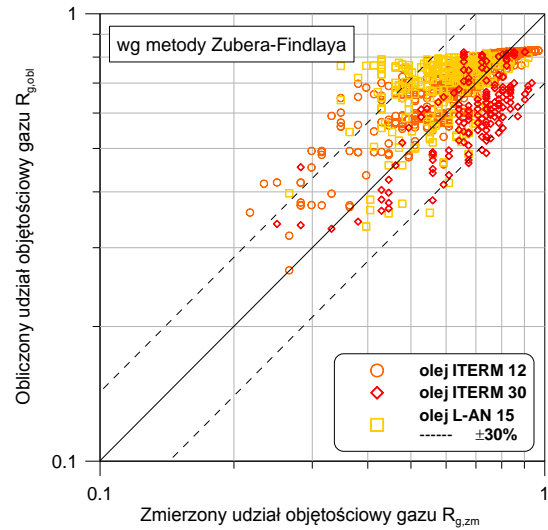
Rys. 6.76. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Zhao i in.



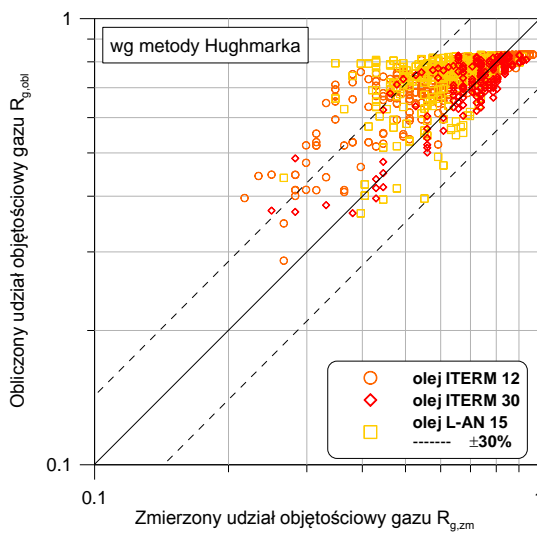
Rys. 6.77. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Harrisona i in.



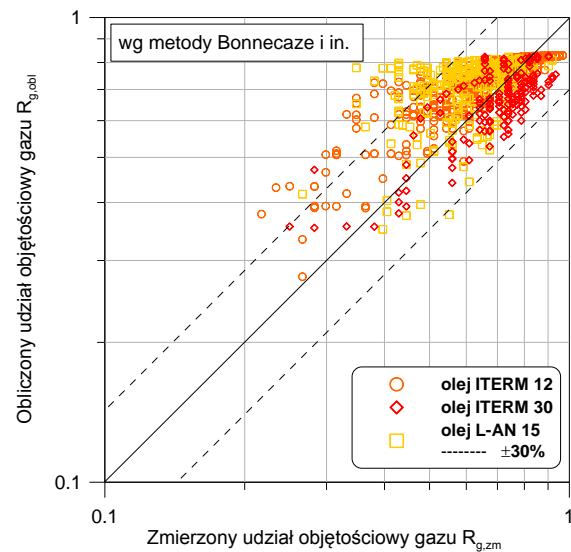
Rys. 6.78. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody GE RAMP



Rys. 6.79. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Zubera-Findlaya



Rys. 6.80. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Hughmarka



Rys. 6.81. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu w przepływie trójfazowym z wartościami obliczonymi wg metody Bonnacaze i in.

Ocenę dokładności zacytowanych w pracy wybranych metod obliczeniowych wykonano na zasadzie porównania zmierzonych wartości udziałów objętościowych

gazu otrzymanych w wyniku przeprowadzenia badań własnych, z wartościami obliczonymi według podanych metod. Porównanie to, polegało na określeniu średnich wartości błędu względnego, średnich bezwzględnych wartości błędu względnego i średnich wartości odchylenia standardowego. Obliczenia te, wykonano analogicznie jak dla rozważanego przypadku przepływu dwufazowego typu woda-olej, natomiast wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej przedstawiono w tabeli 6.15, w której zawarto także graficzne ujęcie przeprowadzonego porównania, poprzez określenie udziału procentowej liczby punktów doświadczalnych, których wartości pozwala obliczyć dana metoda z błędem mniejszym niż $\pm 30\%$.

Tabela 6.15

Ocena statystyczna metod obliczania udziału objętościowego gazu dla układu gaz-ciecz-ciecz

Lp.	Autor metody	Wartość wielkości statystycznych, %		
		$\overline{\delta R_g}$	$ \overline{\delta R_g} $	$\delta(\overline{\delta R_g})$
1.	Stomma [136]	0,2191	0,2326	0,3068
2.	Chisholm [135]	0,1458	0,1673	0,1996
3.	Armand [134]	0,0312	0,1199	0,1837
4.	Zivi [140]	-0,1295	0,2180	0,2739
5.	Zhao i in. [141]	0,1059	0,1774	0,2299
6.	Harrison i in. [8]	-0,1746	0,2118	0,2322
7.	Zuber-Findlay [146]	0,0489	0,1460	0,2045
8.	Hughmark [137]	0,1126	0,1699	0,2234
9.	GE RAMP [138]	0,1053	0,1559	0,1916
10.	Bonnecaze i in. [142]	0,0794	0,1542	0,2107

Metoda	Udział (%)
ARMAND	86,7%
CHISHOLM	82,2%
STOMMA	74,5%
ZIVI	71,0%
HARRISON I IN.	69,9%
ZUBER-FINDLAY	87,7%
HUGHMARK	82,9%
GE RAMP	87,2%
BONNECAZE I IN.	86,8%
ZHAO I IN.	82,3%

Porównanie dokładności obliczeń udziału objętościowego gazu w mieszaninie trójfazowej (dla wartości błędu do $\pm 30\%$) obliczonych wg wybranych metod

Tabela 6.16

Charakterystyka wybranych metod obliczania wartości udziału objętościowego gazu w przepływie dwufazowym gaz-ciecz

Autor metody	Równanie
GRUPA I	
Stomma [136]	$R_g = 1 - \frac{\varepsilon_g^2 - x^2}{2 \left[\ln \left(\frac{1-x}{1-\varepsilon_g} \right) - (\varepsilon_g - x) \right]}$ $\varepsilon_g = \frac{w_{g,0}}{w_{g,0} + w_{c,0}}$
GRUPA II	
Chisholm [135]	$R_g = \frac{1}{1 + S \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)}$ $S = \left(x \frac{\rho_c}{\rho_g} + (1-x) \right)^{0,5}$
GRUPA II	
Armand [134]	$R_g = 1 - \frac{4 + \frac{8}{7}m}{5 + m \left(\frac{\varepsilon_g}{1-\varepsilon_g} + \frac{8}{7} \right)}$ $m = 4Re_c^{1/8} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,5} [0,69 + (1-\varepsilon_g)(4 + 21,9\sqrt{Fr_c})]$
Zivi [140]	$R_g = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,67} \right]}$
Zhao i in. [141]	$R_g = \frac{1}{1 + \left[(R_g^{-0,125}) \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,875} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,875} \left(\frac{\eta_c}{\eta_g} \right)^{0,875} \right]}$

Harrison i in. [8]	$R_g = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,8} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,515} \right]}$
gdzie:	$x = \frac{\rho_g w_{g,0}}{[(\rho_g w_{g,0}) + (\rho_c w_{c,0})]}$
GRUPA III	
Model drift-flux	$R_g = \frac{w_{g,0}}{C w_{3F} + w_{g-3F}}$
Zuber-Findlay [146]	$C = 1,2$ $w_{g-3F} = 1,53 \left(\frac{\check{g} \sigma_c (\rho_c - \rho_g)}{\rho_c^2} \right)^{0,25}$
Hughmark [137]	$R_g = \frac{w_{g,0}}{1,2 w_{3F}}$
GRUPA III	
GE RAMP [138]	$R_g \leq 0,65$ $C = 1,13$ $w_{g-3F} = 2,9 \left[\frac{\check{g} \sigma_c (\rho_c - \rho_g)}{\rho_c^2} \right]^{0,25}$ $R_g > 0,65$ $C = 1 + 0,13 \left(\frac{1 - R_g}{1 - 0,65} \right)$ $w_{g-3F} = 2,9 \left[\frac{\check{g} \sigma_c (\rho_c - \rho_g)}{\rho_c^2} \right]^{0,25} \left(\frac{1 - R_g}{1 - 0,65} \right)$

c.d. tabeli 6.16

Bonnecaze i in. [142]	$R_g = \frac{w_{g,0}}{\left(1,2w_{3F} + 0,35\sqrt{\check{g}d} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_c}\right)\right)}$
gdzie:	$w_{3F} = w_{g,0} + w_{c,0}$

Na rys. 6.72-6.81 przedstawiono układ punktów wynikający z porównania wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu z wynikami ich obliczeń w oparciu o równania pochodzące z zebranych w tabeli 6.16 metod. Z wszystkich przedstawionych wykresów (rys. 6.72-6.81) odczytać można, że im wyższe występowały wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu, tym wyższą zgodność obliczeń tego składnika uzyskiwano. Tendencja taka, powtarzała się dla każdego z rozpatrywanych w badaniach własnych rodzajów olejów. Ponadto, zauważyć można, że w przypadku oleju o najwyższej wartości lepkości, czyli ITERM 30 wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu były zawsze wyższe od tych obliczonych za pomocą wybranej metody. Natomiast w kwestii olejów o niższych wartościach lepkości, jak ITERM 12 i L-AN 15 obserwowano odwrotną charakterystykę. Jednocześnie, w granicach błędu względnego $\pm 30\%$ znajduje się najmniejsza liczba punktów, zwłaszcza w zakresie wartości zmierzonego udziału objętościowego gazu mniejszego od 0,5. Na takie rozmieszczenie punktów mógł mieć wpływ fakt, że dla niskich wartości udziałów objętościowych powietrza fazy ciekłe występowały w postaci struktur przerwanych, co wpływało na mniejszą dokładność wartości właściwości zastępczych ciekłej mieszaniny. Natomiast w obszarze wyższych wartości zmierzonych udziałów objętościowych gazu, ciekłe składniki mieszaniny tworzyły dyspersje lub silnie zdyspergowane emulsje, w którym układ traktowano jako pseudodwufazowy o zastępczych właściwościach mieszaniny cieczy.

Jak wynika z rozmieszczenia punktów na wykresach oraz z przeprowadzonej oceny statystycznej, najlepszą zgodność obliczeń uzyskano dla metody zaproponowanej przez Armanda (rys. 6.74), Zubera-Findlaya (rys. 6.79) oraz Bonnecaze i in. (rys. 6.81). Podobnie dobre wyniki otrzymano w wyniku porównania wartości zmierzonych z metodami obliczeniowymi według GE RAMP (rys. 6.78) i Zhao i in. (rys. 6.76).

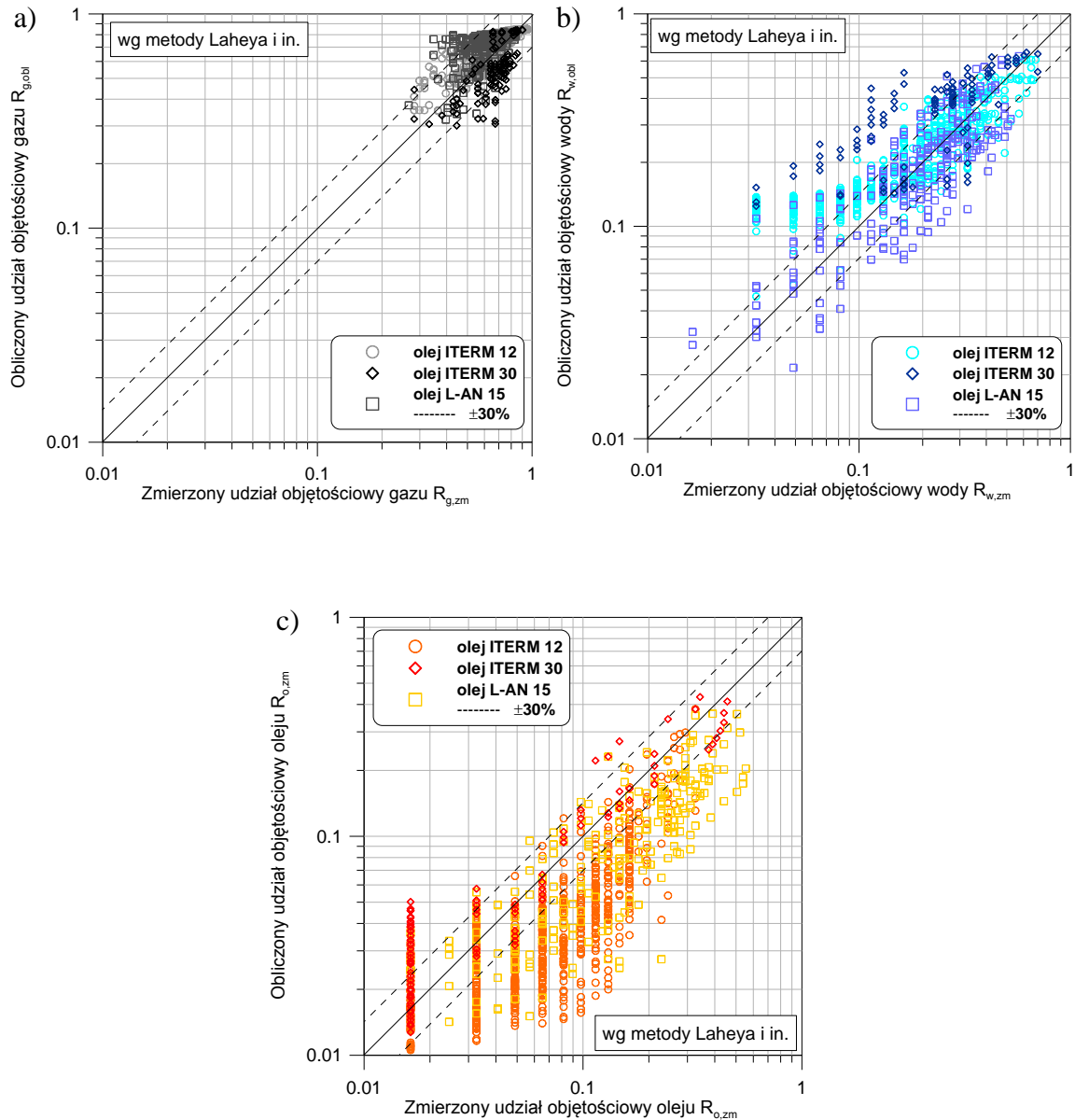
Nieco gorsze natomiast w wyniku ich porównania okazały się metody Hughmarka (rys. 6.80), Zivi (rys. 6.75), Chisholma (rys. 6.73) i Harrisona i in. (rys. 6.77). Z kolei, najmniejszą dokładność obliczeń z wartościami zmierzonymi udziałów objętościowych gazu otrzymano na podstawie metody Stommy (rys. 6.72).

Ponieważ do tej pory rozważano w pracy głównie metody obliczania wartości udziałów objętościowych odpowiednie dla przepływów typu gaz-ciecz, zatem w dalszej części pracy przeanalizowano metody wyznaczania udziałów objętościowych faz w strudze trójfazowej gaz-ciecz-ciecz. W grupie tej, weryfikacji poddano metodę Laheya i in. [144] i Pendyk [143], adekwatne dla przepływów trójfazowych w kanele poziomym, oraz metodę Nowak [9], opracowaną dla wznoszącego przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej w kanale pionowym.

Metoda Laheya [144] została stworzona przez autora na podstawie metody Zubera-Findlaya [89] w oparciu o model drift-flux. Na rys. 6.82a, b i c przedstawiono porównanie zmierzonych wartości udziałów objętościowych wszystkich trzech składników mieszaniny trójfazowej, tj. powietrza, wody i oleju dla każdego z rozpatrywanych w badaniach własnych rodzajów olejów z wartościami obliczonymi według metody Laheya i in. [144].

Z analizy rozkładu punktów na wykresach (rys. 6.82a, b, c) wynika, że za pomocą metody Laheya i in. [144] najwyższą dokładność obliczeń uzyskano dla fazy gazowej, w której punkty doświadczalne w dużej przewadze znajdują się w obszarze błędu względnego $\pm 30\%$. Gorszą już zgodność otrzymano dla wartości udziałów objętościowych wody, w których znaczna liczba punktów leży poza zakresem średniego błędu względnego $\pm 30\%$. Zauważyć także można, że wartości zmierzonych udziałów objętościowych wody przy przepływie trójfazowym z udziałem oleju ITERM 30, czyli oleju o najwyższej lepkości odbiegają najbardziej od wyznaczonej granicy średniego błędu względnego. W przypadku tym wartości zmierzonych udziałów objętościowych wody były dużo mniejsze od wartości obliczonych tą metodą. Zdecydowanie najgorszą natomiast zgodność obliczeń uzyskano dla fazy olejowej, której rozmieszczenie punktów jest odwrotne do rozmieszczenia punktów odpowiadających fazie wodnej. Również znaczna ilość punktów „wybiega” poza zakres średniego błędu względnego, co jest szczególnie widoczne dla przypadku przepływu mieszaniny trójfazowej z udziałem oleju ITERM 12, w przypadku którego obserwowano wyższe wartości

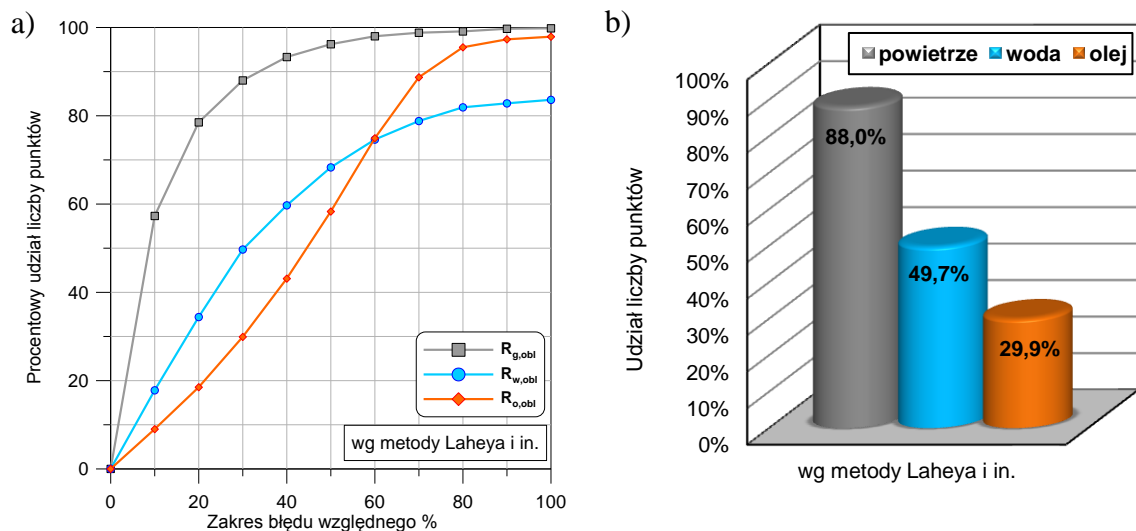
zmiierzonych udziałów objętościowych oleju niż w przypadku wartości obliczonych tego składnika.



Rys. 6.82. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych a) gazu, b) wody, c) oleju z wartościami obliczonymi wg metody Laheya i in. [144]

Z kolei na rys. 6.83a i b, zawarto graficzne ujęcie porównania dokładności obliczeń udziałów objętościowych wszystkich składników mieszaniny trójfazowej, a zatem powietrza, wody i trzech wykorzystanych w badaniach olejów. Wyniki obliczeń statystycznych przeprowadzono przy użyciu równań wykorzystywanych w obliczeniach analizowanych już metod kalkulacji R_g , R_o , i R_w . Rys. 6.83b zawiera dane dla wartości błędu względnego $\pm 30\%$. Z przedstawionego porównania wynika, że najwyższą

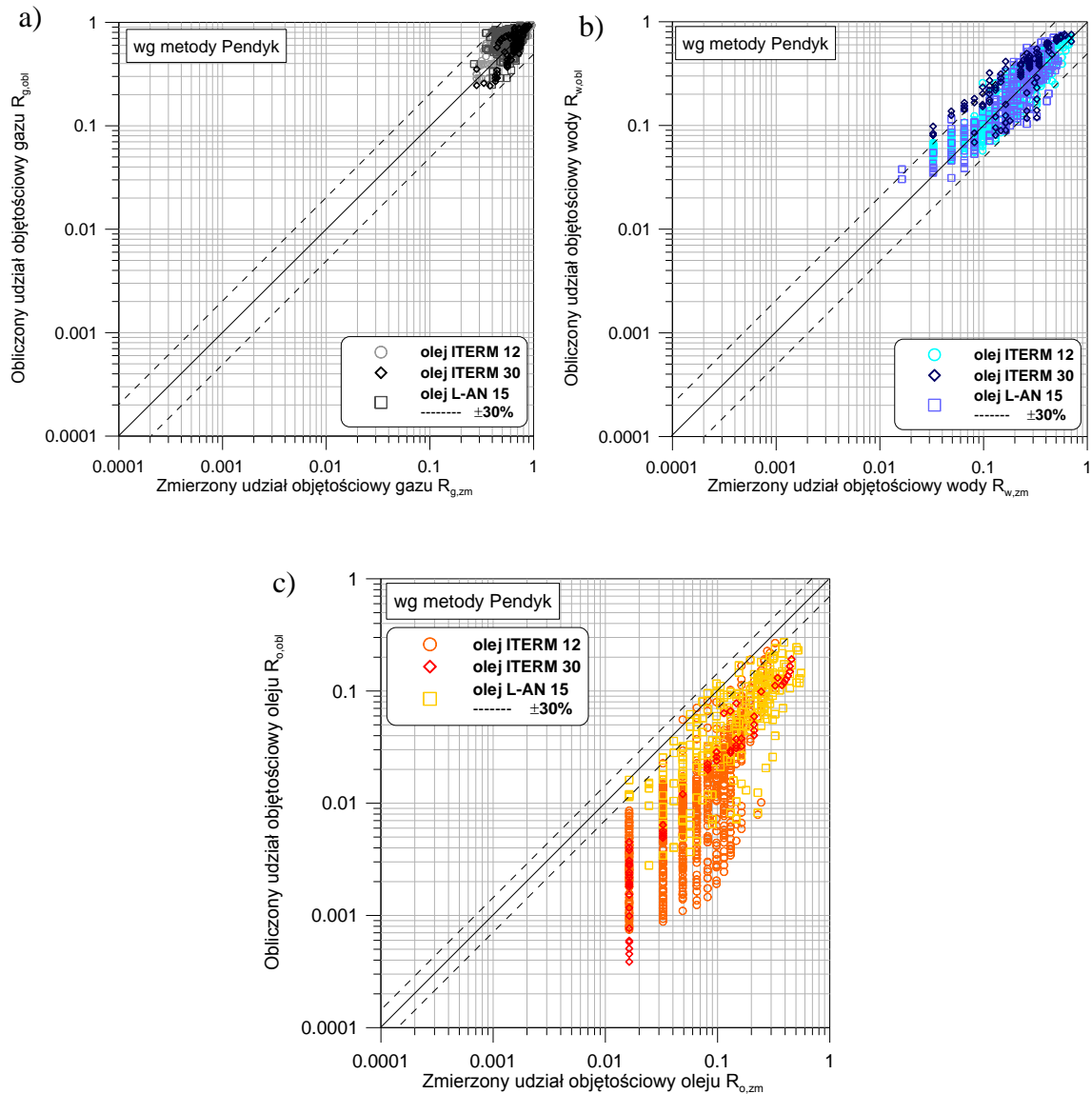
dokładnością cechowała się wartość udziału objętościowego gazu. Dla składnika tego 88,0% punktów obliczonych za pomocą omawianej metody znajdowało się w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$. Z kolei dla wody i oleju, w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$ znajdowało się odpowiednio 49,7% i 29,9% punktów obliczonych na podstawie metody Laheya i in. [144]. Wartości poszczególnych błędów widać dokładnie zwłaszcza na wykresie kolumnowym (rys. 6.83b).



Rys. 6.83. Porównanie dokładności obliczeń udziału objętościowego poszczególnych faz w mieszaninie trójfazowej (a) i (b – dla wartości błędu $\pm 30\%$) obliczonych wg metody Laheya i in. [144]

Metoda Pendyk [143] jest metodą służącą do obliczania wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz uczestniczących w przepływie trójfazowym typu gaz-ciecz-ciecz opartą na modelu Dix'a, który również zalicza się do metody uwzględniającej poślizg międzyfazowy, czyli drift-flux.

Na rys. 6.84a, b i c przedstawiono porównanie zmierzonych wartości udziałów objętościowych wszystkich trzech składników mieszaniny trójfazowej, tj. powietrza, wody i oleju dla każdego z rozpatrywanych w badaniach własnych rodzajów olejów z wartościami obliczonymi według metody Pendyk [143].

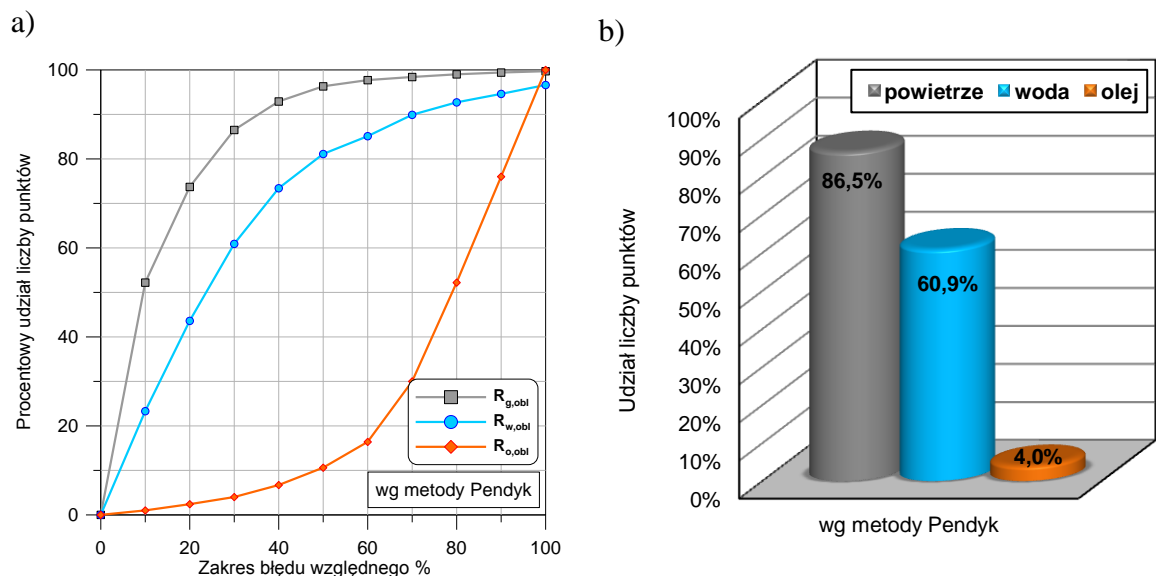


Rys. 6.84. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych a) gazu, b) wody, c) oleju z wartościami obliczonymi wg metody Pendyk [143]

Analizując rozkład punktów na wykresach (rys. 6.84a, b, c) wywnioskować można, że w oparciu o metodę Pendyk [143] najwyższą dokładność obliczeń uzyskano, podobnie jak dla metody Laheya i in. [144] dla fazy gazowej, w której właściwie wszystkie punkty doświadczalne znajdowały się w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$. Nieznacznie gorszą dokładność otrzymano dla wartości udziałów objętościowych wody, w których niewielka tylko liczba punktów znajdowała się poza zakresem średniego błędu względnego $\pm 30\%$. Zdecydowanie najgorszą natomiast zgodność obliczeń uzyskano dla fazy olejowej, w przypadku którego znaczna ilość punktów lokowała się poza zakresem średniego błędu względnego, co jest szczególnie widoczne dla

przypadku przepływu mieszaniny trójfazowej z udziałem oleju ITERM 12 i ITERM 30, w przypadku których obserwowano znacznie niższe wartości zmierzonych udziałów objętościowych oleju w stosunku do wartości obliczonych tego składnika. Nieco lepszą dokładność uzyskano dla oleju L-AN 15. Uzyskane wartości udziałów tego rodzaju oleju, przynajmniej częściowo występowały w obszarze błędu względnego $\pm 30\%$. Na taki układ punktów mógł mieć wpływ fakt, że w badaniach Pendyk [143] wykorzystywano olej o takich samych właściwościach jak w niniejszej pracy, co może sugerować stosowalność zaproponowanych przez Pendyk [143] równań jedynie dla olejów o zbliżonych do L-AN 15 właściwościach.

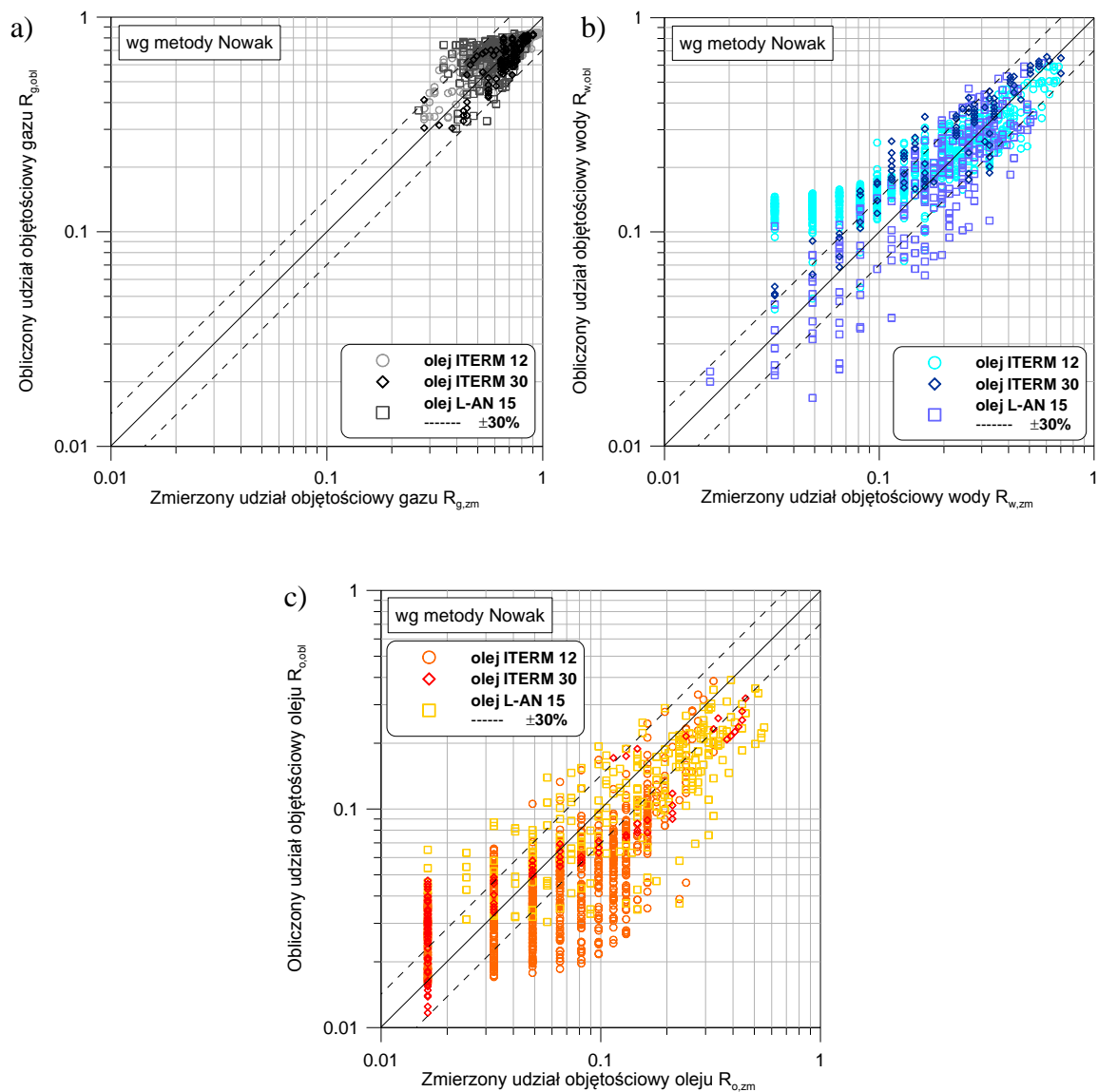
Na rys. 6.85a i b, zawarto graficzne ujęcie porównania dokładności obliczeń udziałów objętościowych wszystkich składników mieszaniny trójfazowej, czyli powietrza, wody i trzech wykorzystanych w badaniach olejów. Rys. 6.85b zawiera dane dla wartości błędu względnego $\pm 30\%$. Z przedstawionego porównania wynika, że najwyższą dokładnością cechowała się wartość udziału objętościowego gazu. Dla składnika tego 86,5% punktów obliczonych za pomocą omawianej metody znajdowało się w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$. Z kolei dla wody i oleju, w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$ znajdowało się odpowiednio 60,9% i zaledwie 4,0% punktów obliczonych na podstawie metody Pendyk [143]. Wartości poszczególnych błędów widać dokładnie na wykresie kolumnowym (rys. 6.85b).



Rys. 6.85. Porównanie dokładności obliczeń udziału objętościowego poszczególnych faz w mieszaninie trójfazowej (a) i (b – dla wartości błędu $\pm 30\%$) obliczonych wg metody Pendyk [143]

Również metoda Nowak [9] jest metodą służącą do obliczania wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz uczestniczących w przepływie trójfazowym typu gaz-ciecz-ciecz opartą na modelu typu drift-flux.

Na rys. 6.86a, b i c przedstawiono porównanie zmierzonych wartości udziałów objętościowych wszystkich trzech składników mieszaniny trójfazowej, tj. powietrza, wody i oleju dla każdego z rozpatrywanych w badaniach własnych rodzajów olejów z wartościami obliczonymi według metody Nowak [9].

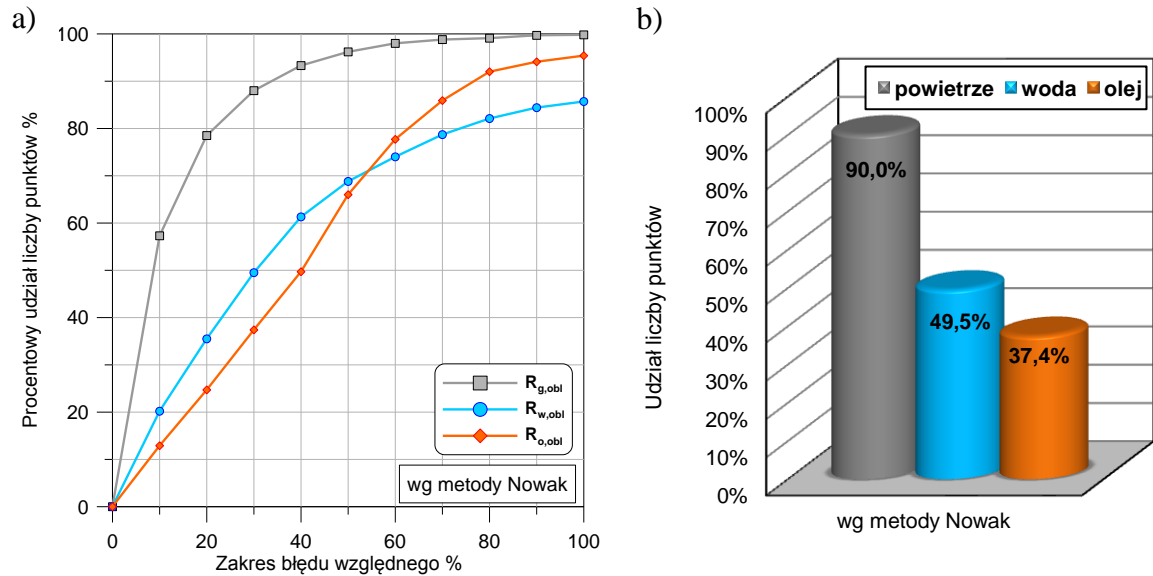


Rys. 6.86. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych a) gazu, b) wody, c) oleju z wartościami obliczonymi wg metody Nowak [9]

Analizując rozkład punktów na wykresach (rys. 6.86a, b, c) zauważyć można, że w wyniku zastosowania metody Nowak [9] najwyższą dokładność obliczeń uzyskano,

podobnie jak dla metody Laheya i in. [144] i Pendyk [143] dla fazy gazowej, w której znaczna liczba punktów pomiarowych znajdowała się w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$. Prawie o połowę niższą dokładność uzyskano dla wartości udziałów objętościowych wody, w których duża liczba punktów znajdowała się poza zakresem średniego błędu względnego $\pm 30\%$. Najgorszą natomiast zgodność obliczeń uzyskano dla fazy olejowej, w przypadku którego znaczna ilość punktów znalazła się poza zakresem średniego błędu względnego, co jest szczególnie widoczne dla przypadku przepływu mieszaniny trójfazowej z udziałem oleju ITERM 12 i ITERM 30, w przypadku których obserwowano znacznie niższe wartości zmierzonych udziałów objętościowych oleju w stosunku do wartości obliczonych tego składnika (podobnie jak przy metodzie Pendyk [143]). Nieznacznie lepszą dokładność uzyskano dla oleju L-AN 15. Uzyskane wartości udziałów tego rodzaju oleju, przynajmniej częściowo występowały w obszarze błędu względnego $\pm 30\%$. Na taki układ punktów mógł mieć wpływ fakt, że zarówno w badaniach Pendyk [143] jak i Nowak [9] wykorzystywano olej o takich samych właściwościach jak w niniejszej pracy, co może sugerować stosowalność zaproponowanych przez Pendyk [143] i Nowak [9] równań właściwych jedynie dla olejów o zbliżonych do L-AN 15 właściwościach.

Na rys. 6.87a i b, zawarto graficzne ujęcie porównania dokładności obliczeń udziałów objętościowych wszystkich składników mieszaniny trójfazowej, czyli powietrza, wody i trzech wykorzystanych w badaniach olejów. Rys. 6.87b zawiera dane dla wartości błędu względnego $\pm 30\%$. Z przedstawionego porównania wynika, że najwyższą dokładnością cechowała się wartość udziału objętościowego gazu. Dla składnika tego 90,0% punktów obliczonych za pomocą omawianej metody znajdowało się w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$. Z kolei dla wody i oleju, w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$ znajdowało się odpowiednio 49,5% i 37,4% punktów obliczonych na podstawie metody Nowak [9]. Wartości poszczególnych błędów widać dokładnie na wykresie kolumnowym (rys. 6.87b).



Rys. 6.87. Porównanie dokładności obliczeń udziału objętościowego poszczególnych faz w mieszaninie trójfazowej (a) i (b – dla wartości błędu $\pm 30\%$) obliczonych wg metody Nowak [9]

W tabeli 6.17 zamieszczono ocenę statystyczną omówionych wyżej metod służących do obliczania udziału objętościowego gazu w przepływie trójfazowym powietrze-woda-olej. Przedstawiono także ocenę statystyczną metody własnej, którą otrzymano w oparciu o przeprowadzone wyniki badań i analizę dostępnych równań, właściwych dla tego rodzaju przepływów. Z wartości zawartych w tabeli 6.17 widać, że najwyższą dokładnością, w każdym rozpatrywanym przypadku odznaczał się składnik gazowy mieszaniny. Natomiast w przypadku wody, wyższą dokładność otrzymano dla metody Pendyk [143] niż dla metod Laheya [144] i Nowak [9]. Z kolei, dla fazy olejowej wyższą dokładnością cechowała się metoda Nowak [9].

Tabela 6.17

Ocena statystyczna metod obliczania udziału objętościowego gazu dla układu gaz-ciecz-ciecz

Lp.	Wartość wielkości statystycznych, %	Autor metody			
		Lahey i in. [144]	Pendyk [143]	Nowak [9]	Brandt
GAZ					
1.	$\overline{\delta R_g}$	0,0453	0,0961	0,0432	0,0312
2.	$ \overline{\delta R_g} $	0,1354	0,1480	0,1296	0,1199

c.d. tabeli 6.17

3.	$\delta(\overline{\delta R_g})$	0,1975	0,1948	0,1839	0,1837
WODA					
4.	$\overline{\delta R_w}$	0,4424	0,1554	0,4129	0,0809
5.	$ \overline{\delta R_w} $	0,5671	0,3151	0,5485	0,2604
6.	$\delta(\overline{\delta R_w})$	0,7986	0,4004	0,7924	0,3263
OLEJ					
7.	$\overline{\delta R_o}$	0,2793	-0,7478	-0,0971	0,0275
8.	$ \overline{\delta R_o} $	0,4436	0,7495	0,4272	0,4253
9.	$\delta(\overline{\delta R_o})$	0,4306	0,1995	0,5216	0,5964

W tabeli 6.18 zawarto postaci funkcyjne wybranych metod do obliczania wartości udziałów objętościowych poszczególnych składników mieszaniny trójfazowej powietrze-woda-olej.

Tabela 6.18

Charakterystyka wybranych metod obliczania wartości udziału objętościowego wszystkich składników mieszaniny trójfazowej typu gaz-ciecz-ciecz

Autor metody	Równanie
Lahey i in. [144]	FAZA GAZOWA
	$R_g = \frac{w_{g,0}}{1,164w_{3F} + 0,457'}$
	FAZA WODNA
	$R_w = \frac{w_{w,0}(1 - R_g)}{1,034w_{c,0} + 0,0104'}$
	FAZA OLEJOWA
	$R_o = 1 - (R_g + R_w).$

Pendyk [143]	FAZA GAZOWA
	$R_g = \frac{\varepsilon_g^{0,37}}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_g} - 1\right)^{0,5}} \left(\frac{1 - \varepsilon_w}{1 + \varepsilon_o}\right)^{0,43},$
	FAZA WODNA
	$R_w = (\varepsilon_w^*)^{0,8}(1 - R_g),$
	FAZA OLEJOWA
	$R_o = 1 - (R_g + R_w).$
Nowak [9]	FAZA GAZOWA
	$R_g = \frac{w_{g,0}}{\left[1 + 0,481(1 - \varepsilon_g)^{0,172}\right]w_{3F} + w_{g-3F}},$
	FAZA WODNA
	$R_w = \frac{w_{w,0}(1 - R_g)}{\left[1 + 0,175(1 - \varepsilon_w^*)^{0,151}\right]w_{c,0} - w_{w-c}},$
	FAZA OLEJOWA
	$R_o = 1 - R_g - R_w,$
gdzie:	prędkość dryftu:
➤ dla dominującej fazy wodnej	
$w_{g-3F} = 1,41 \left(\frac{\check{g}\sigma_w(\rho_w - \rho_g)}{\rho_w^2}\right)^{0,25} (1 - \varepsilon_g)^3,$	
➤ dla dominującej fazy olejowej	
$w_{g-3F} = 1,41 \left(\frac{\check{g}\sigma_o(\rho_o - \rho_g)}{\rho_o^2}\right)^{0,25} (1 - \varepsilon_g)^3,$	

c.d. tabeli 6.18

	prędkość dryftu wody w ciekłej mieszaninie wodno-olejowej:
	$w_{w-c} = 1,41 \left(\frac{\check{g} \sigma_{w-o} \Delta \rho_{w-o}}{\rho_w^2} \right)^{0,25} (1 - \varepsilon_w^*)^3,$
gdzie:	$\sigma_{w-o} = \sigma_w - \sigma_o,$ $\Delta \rho_{w-o} = \rho_w - \rho_o,$ $w_{c,0} = w_{w,0} + w_{o,0}.$

Reasumując, z wykonanych obliczeń i porównań wynika, że przy przepływie trójfazowym można zastosować metody obliczania wartości rzeczywistych udziałów objętościowych gazu, właściwych dla przepływów dwufazowych typu gaz-ciecz. W rozpatrywanym przypadku mogą to być metody Armanda, Zubera-Findlaya czy Bonnacaze i in. Ze względu na najwyższą uzyskaną dokładność obliczeń z metodą Armanda, to właśnie postać jej równania rozpatrywano przy tworzeniu własnej metody wyznaczania wartości udziału objętościowego gazu.

6.2.6. Własna metoda obliczania udziałów objętościowych faz w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz

Uwzględniając złożoność zjawisk zachodzących podczas współprądowego, opadającego w rurach pionowych, przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej, zdecydowano się przyjąć do obliczania udziału objętościowego gazu tę metodę obliczeniową, która uzyskała najwyższą dokładność obliczeń tej wielkości.

W oparciu o przeprowadzoną w poprzednim punkcie ocenę statystyczną szeregu metod obliczeniowych stwierdzono, że najwyższą dokładnością obliczeń wartości R_g cechowała się metoda Armanda. Dla metody tej, średnia wartość błędu względnego wynosiła $\pm 11,99\%$, a średnia wartość odchylenia standardowego odpowiednio $18,37\%$. O wyborze tej metody do obliczania wartości udziału objętościowego gazu zdecydował także fakt, że jej wysoka dokładność została również potwierdzona przez Czernka [132], w odniesieniu do opadającego w rurach pionowych przepływu gaz-ciecz, z udziałem olejów o lepkości $\eta_o = (90-3500)\text{mPa}\cdot\text{s}$.

Metodę Armanda, można zatem rozszerzyć o zakres dla przepływu trójfazowego gazu i dwóch niemieszających się cieczy.

Według proponowanej metody, udział objętościowy gazu R_g należy obliczać z zależności

$$R_g = 1 - \frac{4 + \frac{8}{7}m}{5 + m \left(\frac{\varepsilon_g}{1 - \varepsilon_g} + \frac{8}{7} \right)}, \quad (6.22)$$

w której:

$$m = 4Re_c^{1/8} \left(\frac{\rho_g}{\rho_c} \right)^{0,5} [0,69 + (1 - \varepsilon_g)(4 + 21,9\sqrt{Fr_c})], \quad (6.23)$$

$$Re_c = \frac{w_{c,0} \cdot d \cdot \rho_c}{\eta_c}, \quad (6.24)$$

$$Fr_c = \frac{w_{c,0}^2}{\check{g} \cdot d}, \quad (6.25)$$

$$w_{c,0} = w_{o,0} + w_{w,0}. \quad (6.26)$$

Właściwości cieczy ρ_c, η_c - należy obliczać jako wielkości zastępcze, według relacji podanych w równaniach (6.15) i (6.16), tj.:

$$\rho_c = R_o^* \cdot \rho_o + R_w^* \cdot \rho_w \quad \text{oraz} \quad \eta_c = R_o^* \cdot \eta_o + R_w^* \cdot \eta_w \quad (6.27)$$

Z kolei, udział objętościowy wody (jako cieczy o mniejszej lepkości), proponuje się obliczać z relacji:

$$R_w = (1 - R_o^*)(1 - R_g), \quad (6.28)$$

natomiast oleju, jako uzupełnienie do jedności, sumy udziałów objętościowych faz w strudze trójfazowej:

$$R_o = 1 - (R_g + R_w). \quad (6.29)$$

Przy zaniku przepływu fazy gazowej równania (6.28) i (6.29) stają się metodą obliczania udziałów objętościowych wody i oleju w spływającej warstewce cieczy dwufazowej:

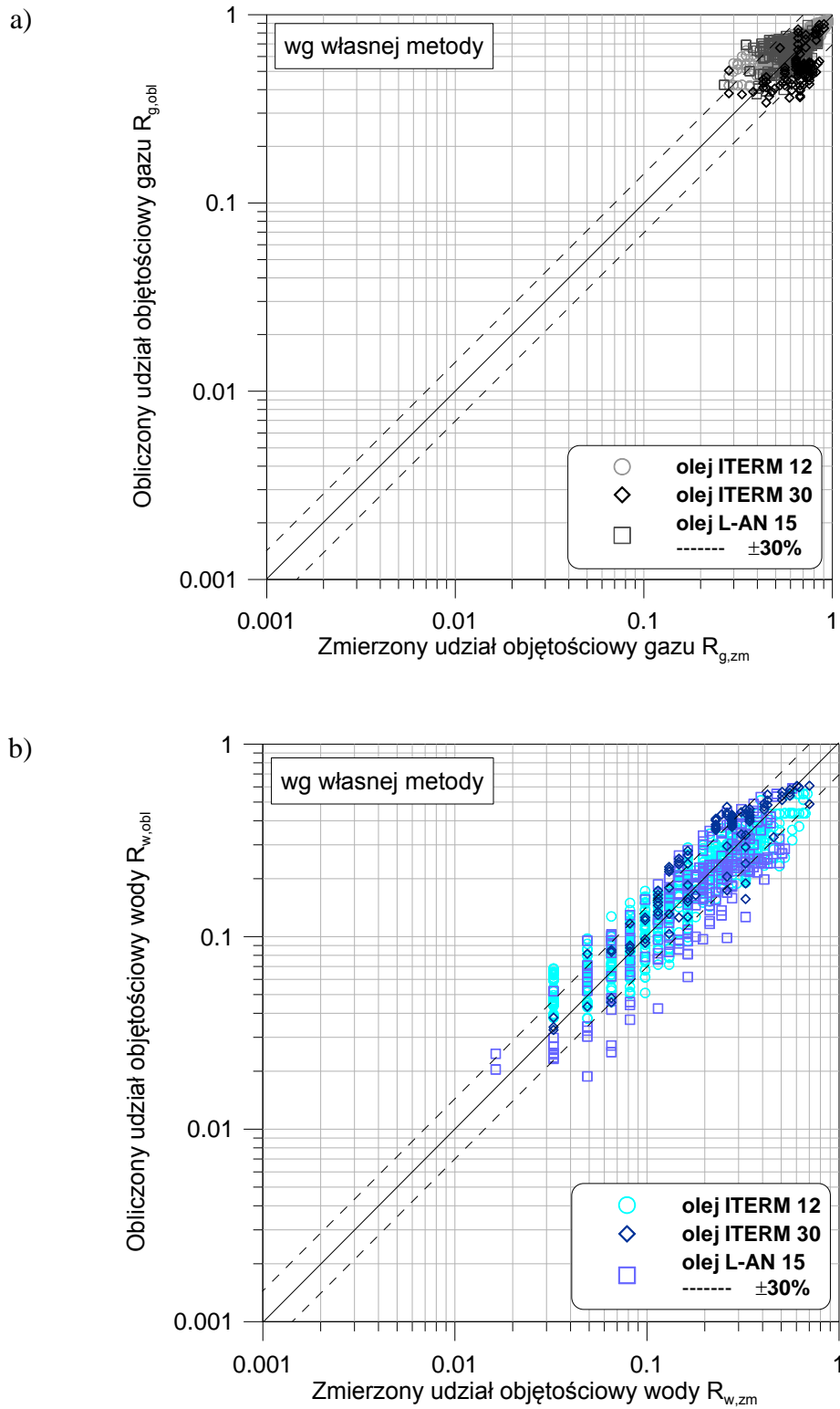
$$R_w^* = 1 - R_o^*, \quad (6.30)$$

gdzie:

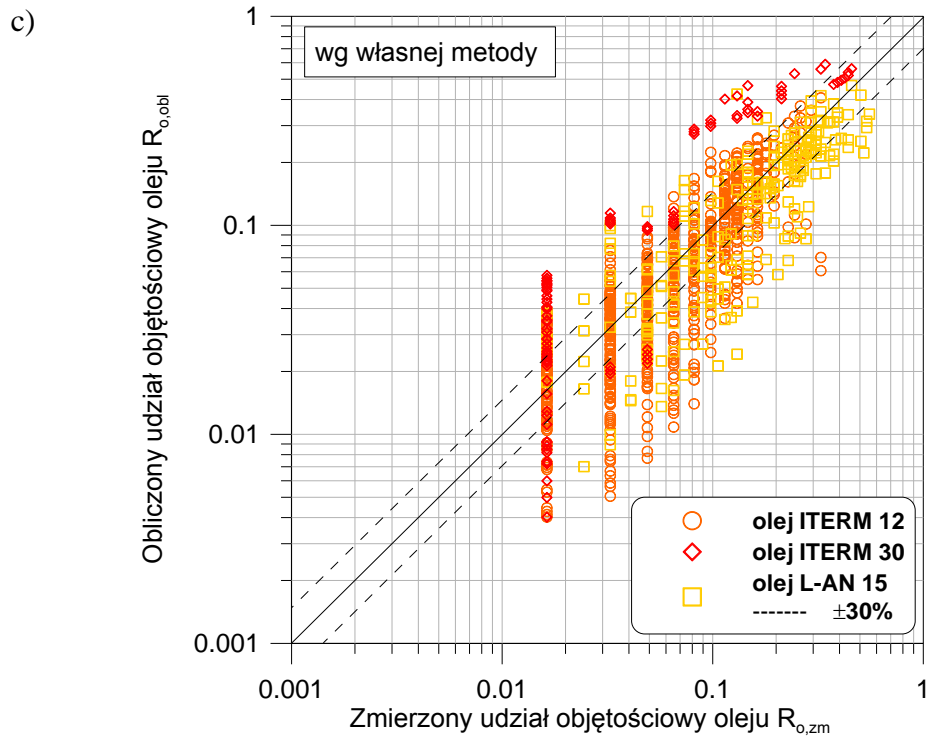
$$R_o^* = \frac{1}{1 + 1,109 Fr_o^{0,25} Fr_w^{0,17} \frac{1 - x_o^* \rho_o}{x_o^* \rho_w}}, \quad (6.31)$$

co jest zgodne z zależnościami (6.18) i (6.19).

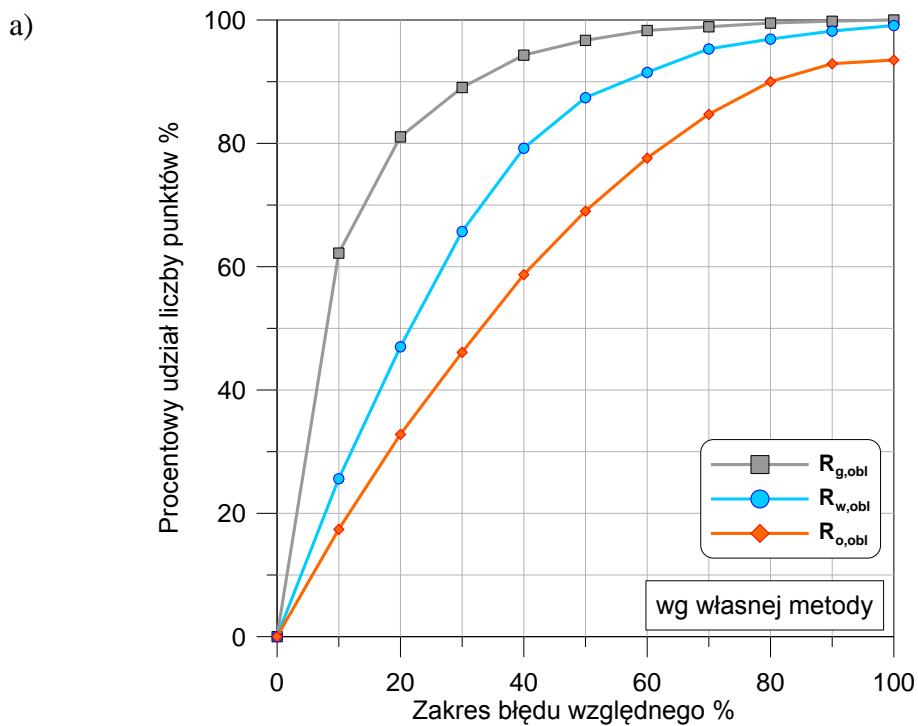
Porównanie zmierzonych wartości udziałów objętościowych powietrza, wody i oleju z ich wartościami obliczonymi proponowaną metodą przedstawiono na rys. 6.88 a, b, c oraz na rys. 6.89.



Rys. 6.88. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych a) gazu, b) wody z wartościami obliczonymi wg własnej metody

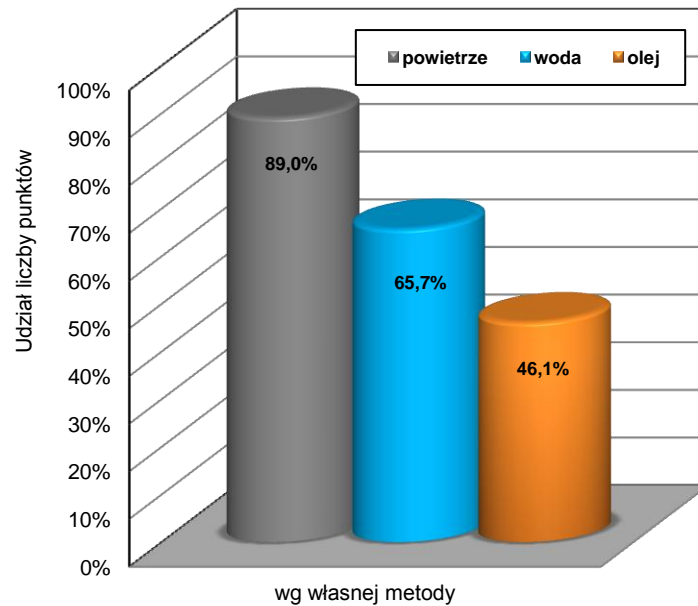


Rys. 6.88c. Porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych oleju z wartościami obliczonymi wg własnej metody



Rys. 6.89a. Porównanie dokładności obliczeń udziału objętościowego poszczególnych faz w mieszaninie trójfazowej obliczonych wg własnej metody

b)



Rys. 6.89b. Porównanie dokładności obliczeń udziału objętościowego poszczególnych faz w mieszaninie trójfazowej (dla wartości błędu $\pm 30\%$) obliczonych wg własnej metody

Z rozmieszczenia punktów na wykresie 6.88a widać, że niemal 90% punktów pomiarowych znajduje się w granicy średniego błędu względnego $\pm 30\%$. Prawdliwość ta, została również potwierdzona na rys. 6.89a i b. Tendencja taka utrzymywała się niezależnie od rodzaju i właściwości fizycznych rozpatrywanego w badaniach oleju.

Z kolei, z wykresu przedstawionego na rys. 6.88b, przedstawiającego porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych wody wynika, że w granicy średniego błędu względnego $\pm 30\%$ znajduje się około 66% punktów pomiarowych, co pozwoliło uzyskać najwyższą wartość procentową w porównaniu do rozpatrywanych wcześniej metod obliczeniowych tej wielkości.

Natomiast na rys. 6.88c przedstawiającego porównanie wartości zmierzonych udziałów objętościowych oleju otrzymano wynik nieco ponad 46% punktów pomiarowych zawartych w granicy średniego błędu względnego $\pm 30\%$. Zauważyć można także, że im wyższa wartość udziału objętościowego oleju, tym lepszą dokładność obliczeń otrzymywano, co odpowiadało obszarowi dominacji fazy olejowej w przepływie, a widoczne jest zwłaszcza dla oleju L-AN 15.

W wyniku przeprowadzonych porównań dokładności obliczeń udziału objętościowego poszczególnych faz w mieszaninie trójfazowej można wysnuć konkluzję, że nowo opracowana, własna metoda obliczania wartości udziałów objętościowych faz we współprądowo opadającym przepływie trójfazowym typu gaz-ciecz-ciecz pozwala uzyskać wysoką dokładność obliczeń, niezależnie od sytuacji, czy w rozpatrywanym przepływie dominuje faz wodna czy olejowa. Metoda ta, może być polecana do przeprowadzania tego typu obliczeń.

6.3. Grubość filmu cieczy

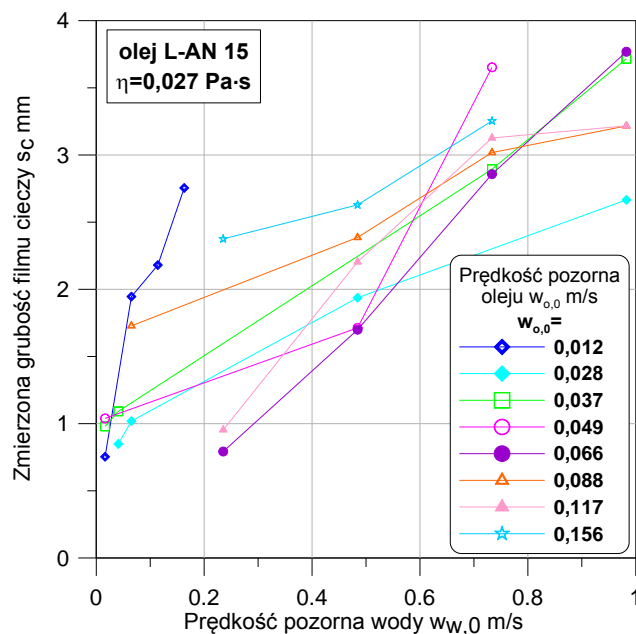
6.3.1. Grubość filmu cieczy w warunkach jej spływu grawitacyjnego

Zgodnie z celem pracy i przyjętym jej zakresem, podczas prowadzonych prac doświadczalnych zajmowano się zarówno hydrodynamiką spływu filmowego cieczy, głównie w zakresie przepływu pierścieniowego cieczy, jak i jego przepływu z fazą gazową. Badania przeprowadzono dla różnych pod względem właściwości fizycznych olejów oraz wody, a także kombinacji różnych udziałów wody i poszczególnych rodzajów olejów. Dla opisanych w niniejszej pracy typów przepływów wielofazowych istotny parametr stanowiła grubość warstwy cieczy. Jak wykazano w przeglądzie literaturowym, parametr ten został scharakteryzowany w wielu pracach [19, 94-127, 132], jednakże opisane korelacje dotyczyły w głównej mierze przepływów dwufazowych typu gaz-ciecz. W wyniku stwierdzenia braków w danych literaturowych w opisie równań na grubość płynącej warstwy cieczy dwufazowej, podjęto próbę opracowania zależności do wyznaczania średniej, zredukowanej grubości filmu cieczy podczas spływu grawitacyjnego wodno-olejowych mieszanin cieczy oraz przepływu mieszaniny trójfazowej typu gaz-ciecz w kanale pionowym, w warunkach współprądowego opadającego przepływu pierścieniowego powietrza, wody i różnych jakościowo olejów.

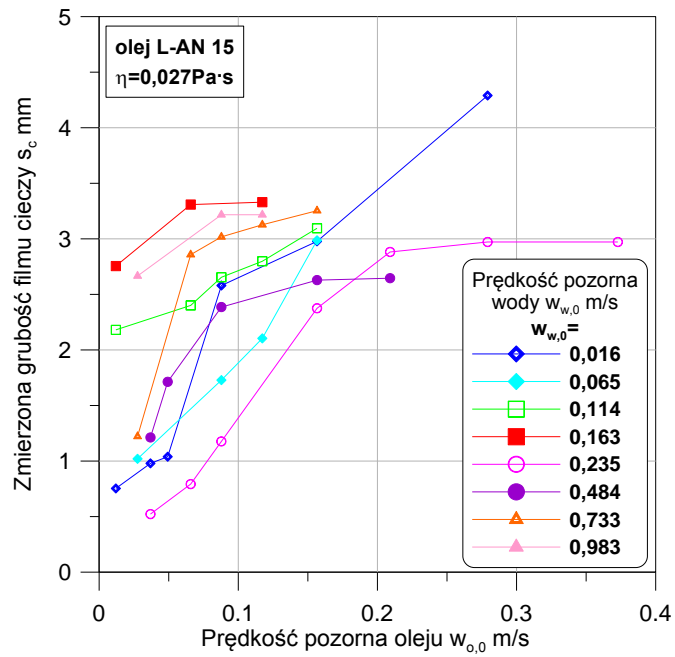
Na rys. 6.90-6.95 zilustrowano otrzymane w wyniku badań doświadczalnych zmierzone wartości grubości filmów różnych cieczy, głównie pod względem ich lepkości dla zróżnicowanych parametrów przepływowych.

Z przedstawionych wykresów wywnioskować można, że na grubości filmów cieczy mają wpływ różne czynniki. Zmierzone wartości grubości poszczególnych filmów cieczy dwufazowej występowały w zakresie od około 0,5mm do 4,3mm.

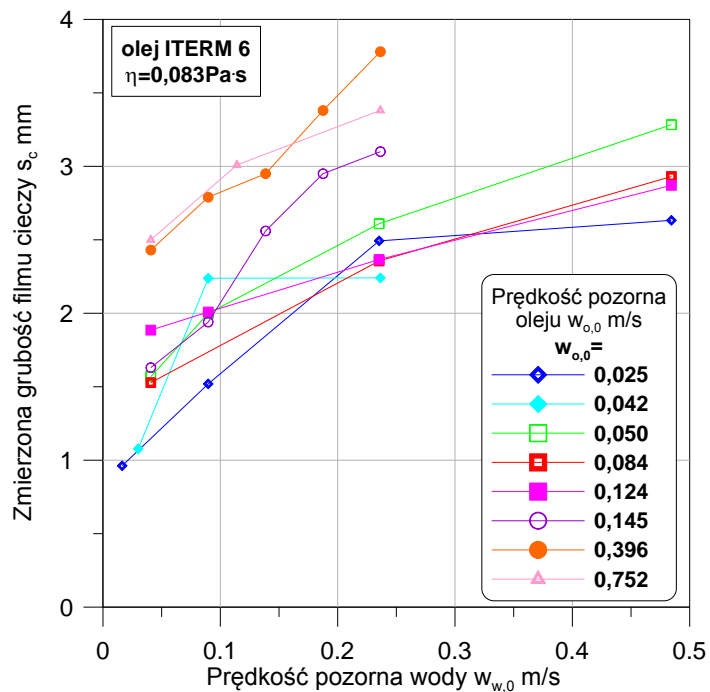
We wszystkich rozważanych przypadkach wraz ze wzrostem prędkości pozornej jednej z faz ciekłych następował wzrost grubości filmu cieczy dwufazowej, przy stałej prędkości pozornej drugiej cieczy biorącej udział w przepływie. Tendencja ta, widoczna jest zwłaszcza w ujęciu graficznym dotyczącym grubości filmów cieczy w funkcji prędkości pozornej oleju. Natomiast w przypadku filmu cieczy w zależności od prędkości pozornej wody przebieg krzywych był bardziej rozbieżny, co związane było z mniejszymi wartościami lepkości po stronie wody i jej bardziej burzliwym (niż w przypadku przepływu filmów olejowych) przepływem.



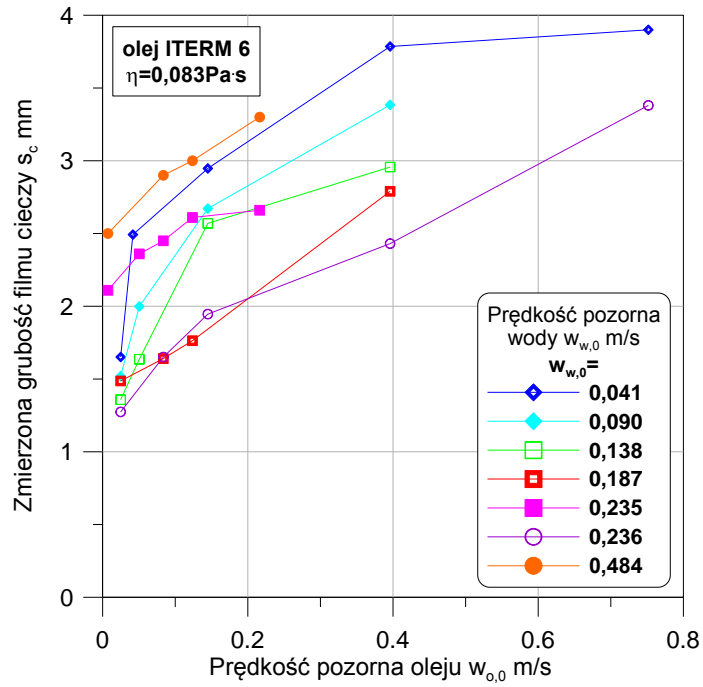
Rys. 6.90. Grubość filmu cieczy przy opadającym przepływie dwufazowym typu woda-olej



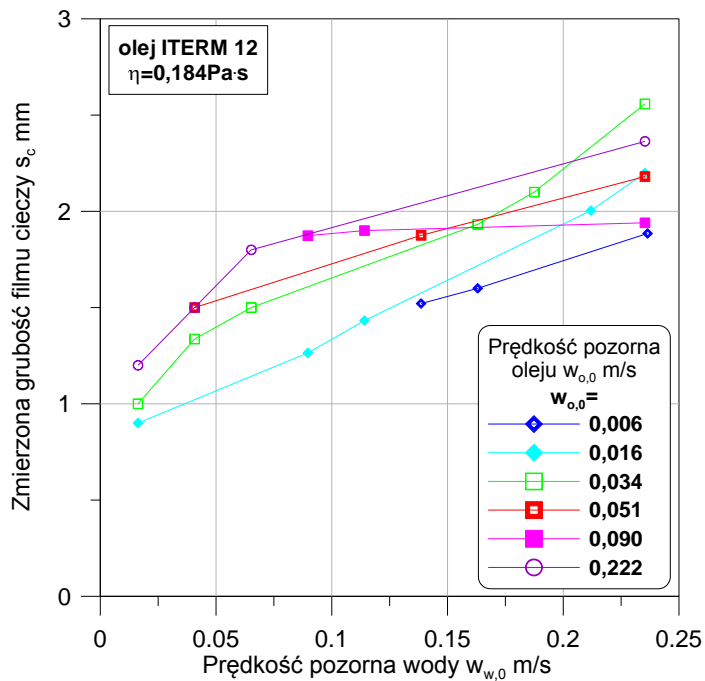
Rys. 6.91. Grubość filmu oleju przy opadającym przepływie dwufazowym typu woda-olej



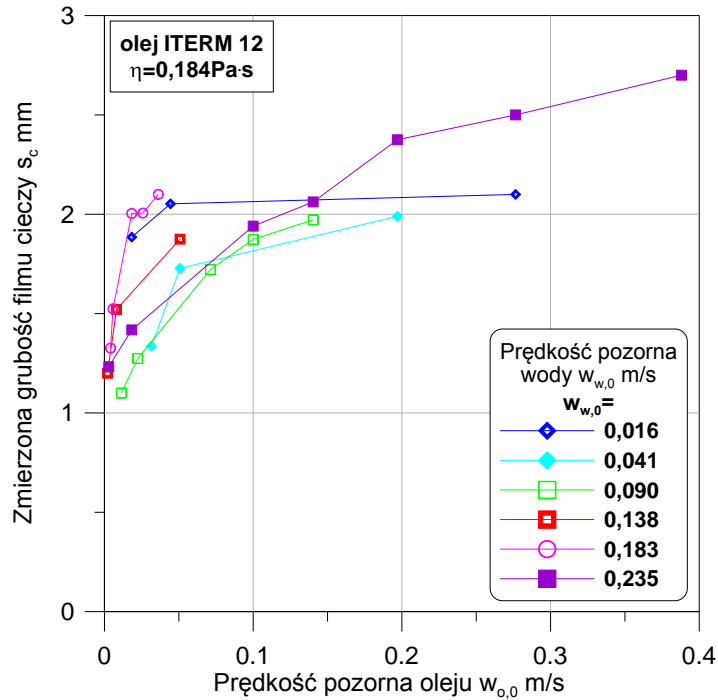
Rys. 6.92. Grubość filmu wody przy opadającym przepływie dwufazowym typu woda-olej



Rys. 6.93. Grubość filmu oleju przy opadającym przepływie dwufazowym typu woda-olej



Rys. 6.94. Grubość filmu wody przy opadającym przepływie dwufazowym typu woda-olej



Rys. 6.95. Grubość filmu oleju przy opadającym przepływie dwufazowym typu woda-olej

W celu opracowania ogólnej zależności do wyznaczania grubości warstwy cieczy podstawą stały się równania dla jednoczesnego spływu grawitacyjnego wody i oleju. W wykonanych obliczeniach, przepływ dwufazowy typu ciecz-ciecz rozpatrzono jako ciecz pseudojednorodną o zastępczych właściwościach obliczanych według równań (6.15 – 6.21).

Wprowadzając definicję liczby Reynoldsa dla warunków spływu grawitacyjnego cieczy:

$$Re_z = \frac{4 \cdot \Gamma_c}{\eta_c} \quad (6.32)$$

oraz zastępczy wymiar liniowy:

$$\vartheta_z = \left(\frac{\eta_c^2}{\rho_c^2 \cdot g} \right)^{1/3}, \quad (6.33)$$

średnią grubość filmu cieczy można opisać równaniem:

$$s_0 = C \cdot \vartheta_z \cdot Re_z^n, \quad (6.34)$$

a zredukowaną grubość warstwy cieczy jako:

$$s_r = \frac{s_0}{\vartheta_z} = C \cdot Re_z^n. \quad (6.35)$$

Powyższa zależność jest funkcją bezwymiarową.

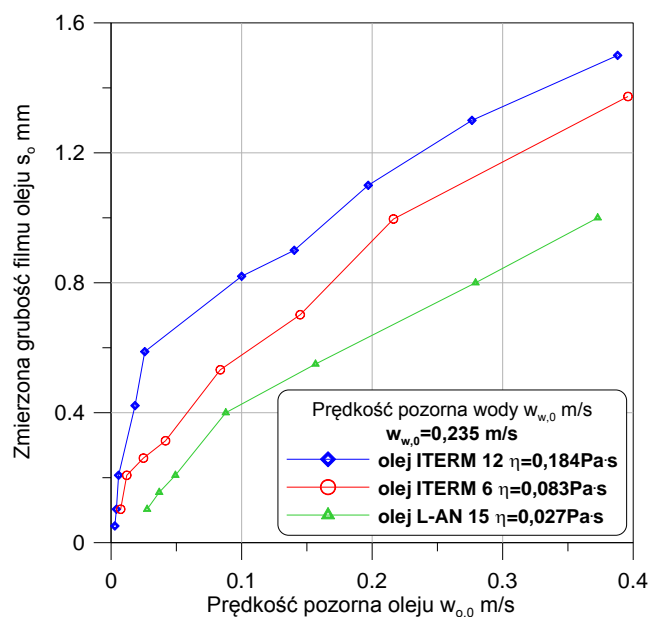
W oparciu o wykonane obliczenia, otrzymano równania do wyznaczania zredukowanych grubości poszczególnych warstewek mieszaniny cieczy z uwzględnieniem dominacji fazy wodnej (przepływ typu O/W) i fazy olejowej (przepływ typu W/O) w układzie ciecz-ciecz. W obszarze tym, powstawał także przepływ typu W+O, czyli przepływ emulsji. W wyniku obliczeń otrzymano równania:

$$s_r = 0,6689 \cdot Re_z^{0,312} \text{ dla } Re_z < 20, \quad (6.36)$$

$$s_r = 0,3465 \cdot Re_z^{0,549} \text{ dla } Re_z \geq 20, \quad (6.37)$$

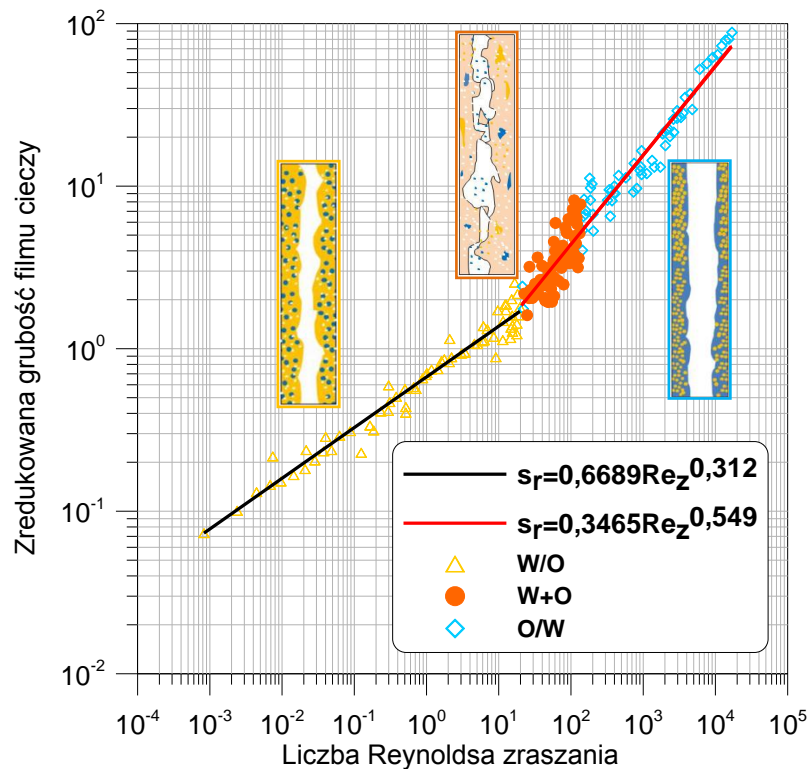
uzyskując dla (6.36) wartość współczynnika korelacji $r=0,956$ i średnią wartość odchylenia standardowego 0,131 oraz dla (6.37) wartość współczynnika korelacji $r=0,935$ i średnią wartość odchylenia standardowego 0,162.

Na rys. 6.96 przedstawiono porównanie wartości grubości filmów olejów przy opadającym przepływie dwufazowym woda-olej dla wybranej, stałej wartości prędkości pozornej wody. Na przedstawionym wykresie widać, że przy stałej prędkości wody, grubość filmu oleju wzrastała wraz ze wzrostem jego wartości prędkości pozornej. Jednocześnie, wraz ze wzrostem wartości lepkości danego oleju (w tej samej temperaturze), wzrastała grubość warstewki cieczy tego rodzaju oleju.



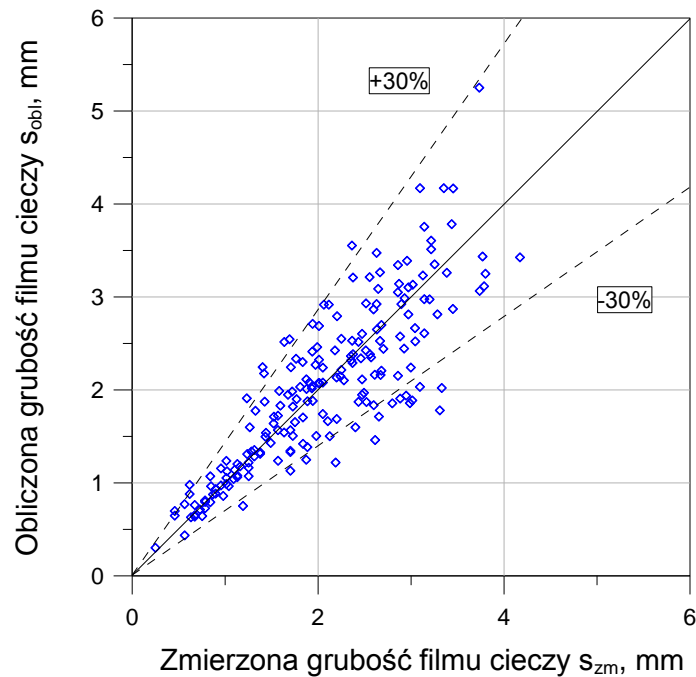
Rys. 6.96. Grubość filmów olejów przy opadającym przepływie dwufazowym woda-olej dla stałej prędkości pozornej wody

Na rys. 6.97 przedstawiono z kolei zależność zredukowanych grubości filmów cieczy w funkcji liczby Reynoldsa dla warunków zraszania. Na wykres naniesiono także równania służące do wyznaczania poszczególnych zredukowanych grubości filmów cieczy. Układ punktów doświadczalnych wskazuje, że wartość zredukowanej grubości filmu cieczy zależy od zakresu liczby Reynoldsa dla warunków zraszania. W przypadku, gdy $Re_z \geq 20$ następuje intensywniejszy przyrost jej wartości niż dla przypadku, w którym $Re_z < 20$, co może być związane ze wzrastającym stopniem burzliwości przepływu. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano uogólnione równania do obliczania zredukowanych grubości filmów cieczy. Pokazano także zakresy występowania dominacji poszczególnych faz w przepływie.



Rys. 6.97. Zredukowana grubość filmów cieczy przy spływie grawitacyjnym różnych olejów i wody

Z kolei rys. 6.98 ilustruje porównanie zmierzonych i obliczonych wg równań (6.36) i (6.37) wartości grubości filmu cieczy. Rozmieszczenie punktów świadczy o dobrej dokładności opracowanych korelacji. Ponad 90% punktów doświadczalnych mieści się w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$, a uzyskane wartości stałej C i wykładnika n są wartościami porównywalnymi z wartościami zalecanymi przez większość autorów prac przytaczanych w rozdziale 3.6.



Rys. 6.98. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości grubości filmów cieczy przy ich spływie grawitacyjnym

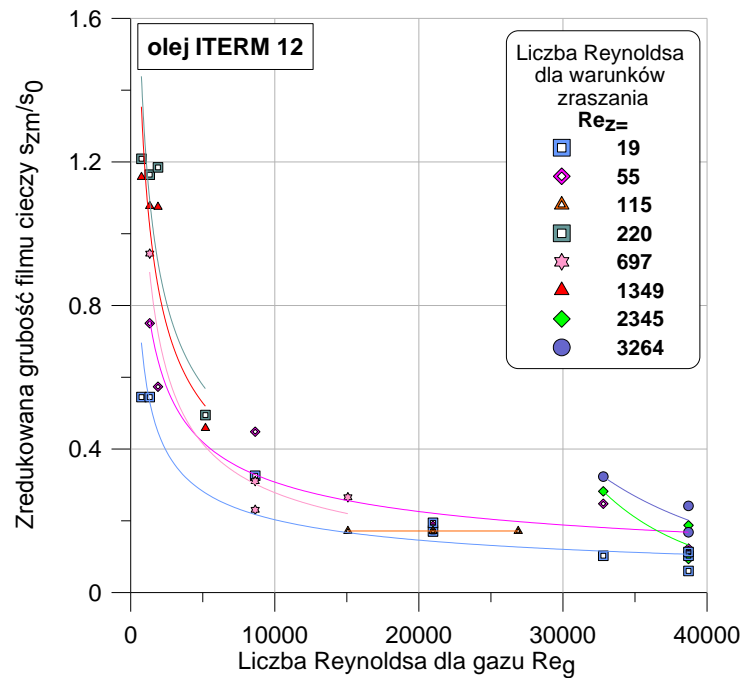
6.3.2. Grubość filmu cieczy w warunkach przepływu trójfazowego powietrze - woda - olej

Rys. 6.99 i 6.100 obrazują wpływ strumienia gazu na redukcję grubości filmu cieczy w przepływie wielofazowym typu gaz-ciecz-ciecz, w stosunku do warunków spływu grawitacyjnego s_0 , dla wybranych serii pomiarowych.

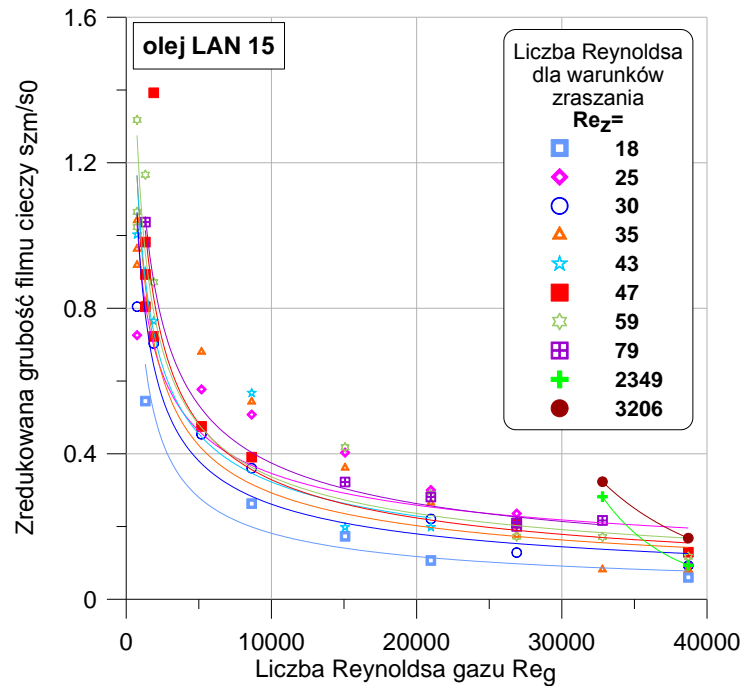
Z rozkładu punktów doświadczalnych stwierdzono, że grubość filmu cieczy przy pierścieniowym przepływie dwufazowym zależy głównie od strumieni i właściwości obu faz. Wzrost wartości liczby Reynoldsa dla gazu z kolei, powoduje zawsze zmniejszenie grubości filmu cieczy niezależnie od właściwości cieczy badanych. Redukcja grubości filmu cieczy w stosunku do grubości warstwy cieczy, przy spływie grawitacyjnym jest tym wyższa, im większa jest wartość liczby Reynoldsa dla warunków zraszania. Oznacza to, istotne zmniejszenie przy pierścieniowym przepływie wielofazowym grubości warstwy cieczy. Grubość ta, przy spływie grawitacyjnym cechowałaby się o wiele większą wartością.

Stwierdzona w badaniach tendencja zmian grubości filmów cieczy jest analogiczna do zmian grubości uzyskanych w badaniach Bousmana [125] oraz Czernka

[19]. Niemniej jednak, opracowane przez tych autorów zależności do obliczania grubości filmów cieczy wykazały duże różnice w obliczanych grubościach, w stosunku do ich wartości zmierzonych. Stąd też, podjęto próbę opracowania własnych zależności, uwzględniających specyfikę splotu w rurze pionowej cieczy dwufazowej przy jej równoczesnym przepływie z fazą gazową.



Rys. 6.99. Wpływ strumienia gazu na redukcję grubości filmu cieczy w przepływie wielofazowym



Rys. 6.100. Wpływ strumienia gazu na redukcję grubości filmu cieczy w przepływie wielofazowym

Opracowane dla spływu grawitacyjnego zależności (6.36) i (6.37) były podstawą do określenia wpływu strumienia gazu na zmiany grubości płynącej warstwy cieczy w strudze dwufazowej. Ze względu na występowanie w przepływie trójfazowym fazy gazowej, która określa stopień zafalowania powierzchni filmów cieczy oraz grubość ich warstewek, w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych uwzględniono charakter przepływu fazy gazowej i jej wpływ na wartość zredukowanej grubości filmów wodno-olejowej mieszaniny cieczy. Charakter przepływu gazu opisano liczbą Reynoldsa dla gazu Re_g oraz jego wartością wlotowego udziału objętościowego ε_g . Obie wielkości zostały uwzględnione w równaniu (6.38), które służy do obliczania zredukowanej wartości grubości spływającej warstwy mieszaniny cieczy w przepływie trójfazowym typu gaz-ciecz-ciecz.

$$s_r = 8,51 \cdot \left(\frac{\varepsilon_g}{1 - \varepsilon_g} \right)^{0,34} \cdot Re_z^{0,659} \cdot Re_g^{-0,689}, \quad (6.38)$$

W zależności (6.38), liczbę Reynoldsa dla gazu Re_g i wlotowy udział objętościowy gazu ε_g oblicza się z równania:

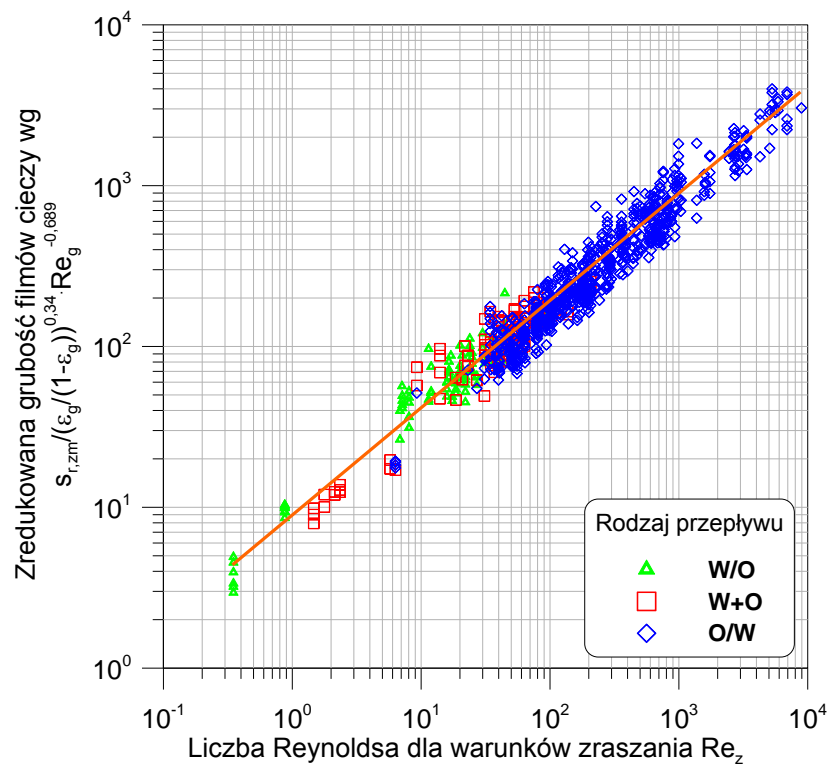
$$Re_g = \frac{w_{g,0} \cdot d \cdot \rho_g}{\eta_g}, \quad (6.39)$$

$$\varepsilon_g = \frac{w_{g,0}}{w_{g,0} + w_{w,0} + w_{o,0}}, \quad (6.40)$$

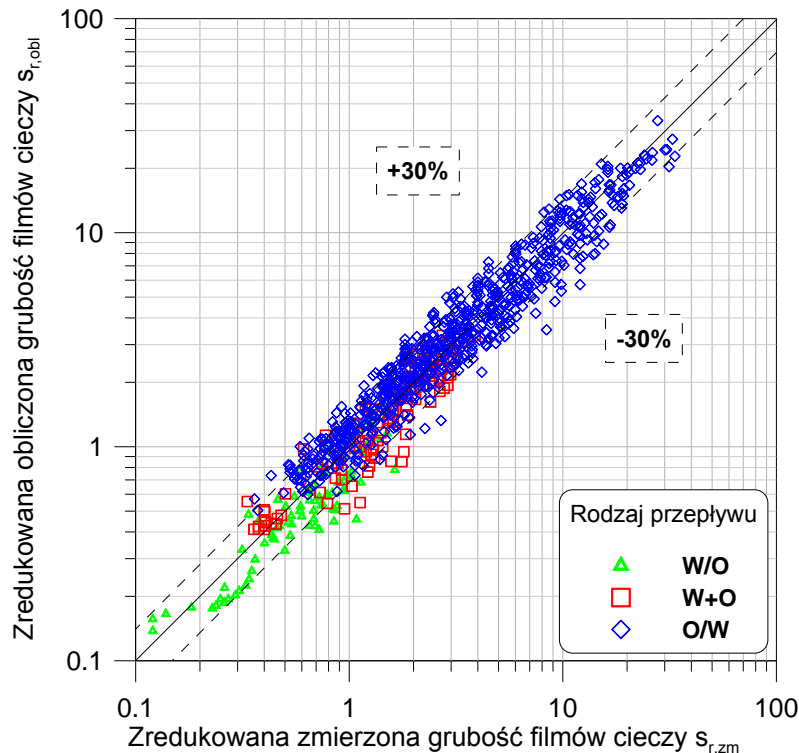
gdzie, $w_{g,0}$ oznacza prędkość pozorną gazu.

Na rys. 6.101 zobrazowano zredukowane grubości filmów cieczy w funkcji liczby Reynoldsa dla warunków zraszania przy przepływie trójfazowym powietrze-woda-olej. Zilustrowany rozkład punktów doświadczalnych wskazuje na wysoką dokładność opracowanego równania (6.38), dla którego wartość współczynnika korelacji wielokrotnej wynosi $r = 0,964$ a średnia wartość odchylenia standardowego 0,283.

Natomiast rys. 6.102 przedstawia porównanie zmierzonych i obliczonych za pomocą równania (6.38) wartości grubości filmów cieczy przy ich przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz.



Rys. 6.101. Zredukowana grubość filmów cieczy w warunkach przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej

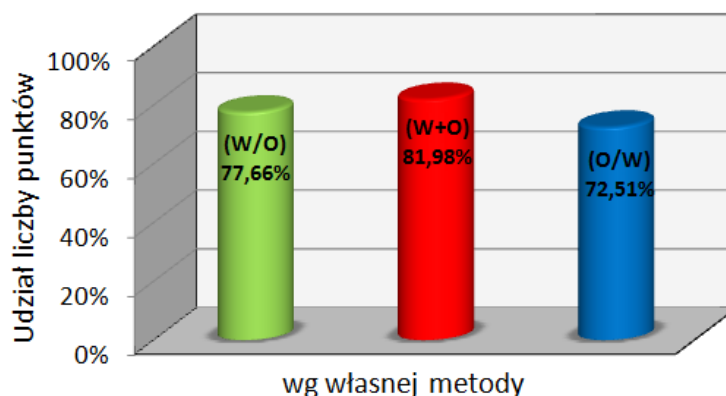


Rys. 6.102. Porównanie zmierzonych i obliczonych na podstawie równania (6.38) wartości zredukowanej grubości filmów cieczy przy przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz

Przedstawiony na rysunku układ punktów doświadczalnych wskazuje, że w zakresie błędu względnego $\pm 30\%$ mieści się ogólnie około 80% punktów eksperymentalnych, co świadczy o dużej dokładności opracowanej metody. Opracowana zależność (6.38) jest słuszna głównie w zakresach występowania przepływu o charakterze pierścieniowym, tj. w zakresie zmienności $\varepsilon_g = (0,344 - 0,997)$, $Re_z = (0,349 - 8920)$ oraz $Re_g = (215 - 42500)$.

Z kolei na rys. 6.102 zamieszczono porównanie dokładności obliczeń zredukowanej grubości filmów cieczy przy przepływie trójfazowym powietrze-woda-olej obliczonych według własnej metody (równanie 6.38). Wykres kolumnowy zawiera wartości średniego błędu względnego $\pm 30\%$, i przedstawia wyniki porównania dla trzech zakresów rodzaju przepływu trójfazowego, czyli dla przypadku dominacji wody w oleju (W/O), emulsji (W+O) i dominacji oleju w wodzie (O/W). Z danych zawartych na wykresie (rys. 6.103) widać, że najwyższą dokładnością obliczeń charakteryzował się rodzaj przepływu określany jako przepływ emulsji, czyli (W+O), dla której uzyskano wynik równy 81,98%. Nieznacznie gorsze wyniki odnotowano dla przepływu

z dominującą fazą olejową (W/O), dla której otrzymano wartość 77,66% i dominującą fazą wodną (O/W), reprezentującą wynik 72,51%.



Rys. 6.103. Porównanie dokładności obliczeń zredukowanej grubości filmów cieczy przy przepływie trójfazowym powietrze-woda-olej obliczonych wg własnej metody (6.38), dla wartości błędu średniego $\pm 30\%$

W wyniku przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników stwierdzić można, że opracowana własna zależność do wyznaczania zredukowanej wartości grubości spływającej warstwy mieszaniny cieczy w przepływie trójfazowym typu gaz-ciecz-ciecz cechuje się wysoką dokładnością obliczeń i można ją stosować dla tego rodzaju przepływów, również z wykorzystaniem cieczy bardzo lepkich.

7. PODSUNOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku przeprowadzonych, obszernych analiz literaturowych dotyczących przepływów dwufazowych typu ciecz-ciecz oraz trójfazowych typu gaz-ciecz-ciecz wykazano, że w obu tych obszarach występują liczne różnice w charakterystyce tego rodzaju przepływów. W literaturze przedmiotu, stwierdzono duże rozbieżności w opisie struktur przepływu przy opadającym przepływie pierścieniowym woda-olej oraz przy jego przepływie z udziałem fazy gazowej. Podobnie, zauważono braki przy opracowaniach dotyczących map przepływu, w których nie odnaleziono przypadków dedykowanych szczególnie dla opadającego w rurach pionowych, współprądowego przepływu trójfazowego. Analogicznie, w kwestii obliczania wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz oraz, przy określaniu dominacji danej fazy w obu typach rozważanych przepływów z wykorzystaniem zjawiska konduktywności, w przypadku którego odnaleziono nieliczne jak do tej pory opisy badań eksperymentalnych. W niniejszej pracy, rozważano także opracowanie równań mających na celu wyznaczenie wartości grubości filmów cieczy, z udziałem płynów o wyższej wartości lepkości w porównaniu do wody i rozszerzenie ich na zakres przepływu trójfazowego.

W nawiązaniu do powyższego, w niniejszej pracy w oparciu o przeprowadzone wyniki badań nad hydrodynamiką, współprądowego, opadającego w rurach pionowych przepływu wielofazowego dokonano rozszerzenia i uzupełnienia aktualnego stanu wiedzy w zakresie rodzaju tworzących się struktur przepływu wielofazowego oraz opracowania map przepływu dwu- i trójfazowego, określenia wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz oraz określenie wartości grubości filmów cieczy dwufazowej woda-olej, zarówno w warunkach jej spływu grawitacyjnego jak i przepływu z udziałem fazy gazowej.

W nawiązaniu do charakterystyki struktur przepływu, przy spływie grawitacyjnym dwóch niemieszających się cieczy tj. wody i czterech różnych pod względem właściwości fizycznych olejów, wyodrębniono w sumie siedem struktur. Scharakteryzowano trzy struktury w zakresie dominacji fazy wodnej i trzy struktury dla zakresu dominacji fazy olejowej, a także jedną wspólną dla obydwu przypadków strukturę o charakterze emulsji, czyli przypadku szczególnego, w którym nie można było jednoznacznie określić, która z faz stanowiła fazę dominującą. W zakresie struktur

z dominacją fazy wodnej stwierdzono występowanie struktury kropłowo-dyspersyjnej oleju w wodzie (DrDO/W), pianowo-dyspersyjnej oleju w wodzie (FDO/W) i dyspersyjnej oleju w wodzie (DO/W). Dla zakresu z dominacją fazy olejowej wyszczególniono z kolei strukturę kropłowo-dyspersyjną wody w oleju (DrDW/O), przerywano-dyspersyjną wody w oleju (IDW/O) i dyspersyjną wody w oleju (DW/O). Odrębną strukturę, w rozważanych typach przepływów stanowiła struktura o charakterze emulsji (O+W). Struktury przepływu określano zarówno wizualnie, z wykorzystaniem technik videograficznych oraz przy użyciu własnej metody konduktometrycznej określającej wartość napięcia w układzie ciecz-ciecz, charakterystyczną dla przepływu danej fazy ciekłej. Opracowana w tym zakresie metoda, szczegółowo opisana w rozdziale 5.2.3 służyła jako narzędzie wspomagające przy wizualnej obserwacji struktur w obu typach przepływu, a przeprowadzone badania wykazały, że metoda ta, może być pomocna także przy określaniu dominacji poszczególnych faz w przepływie wielofazowym. Pozwala ona także dokonać oceny tworzących się form przepływu.

Otrzymane w wyniku badań własnych struktury przepływu dwufazowego, rozszerzono następnie na zakres przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej, w którym podobnie jak dla przepływu woda-olej wyodrębniono analogiczne struktury, z tą różnicą, że wszystkie formy przepływu miały cechy przepływu pierścieniowego, z uwagi na udział w nim fazy gazowej. Szczegółowy opis wyodrębnionych struktur zawierają tabele (6.2), (6.4), (6.10) i (6.12).

Scharakteryzowane w pracy struktury znalazły swoje odzwierciedlenie przy opracowywaniu nowej mapy przepływu dwufazowego typu ciecz-ciecz, z uwzględnieniem średnich wartości napięcia, odpowiednich dla danej fazy ciekłej. Otrzymana w ten sposób mapy (rys.6.1 i rys.6.2) stały się podstawą do opracowania nowej mapy przepływu trójfazowego, której uniwersalną postać zawarto na rys. 6.4. Na mapie tej uwzględniono zarówno obszary występowania struktur przy przepływie dwufazowym ciecz-ciecz jak i przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz.

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano także nową metodę do obliczania wartości udziałów objętościowych faz w przepływie wielofazowym. Analizując wykonane badania stwierdzono, że w przypadku przepływu dwufazowego typu woda-olej, niezależnie od właściwości fizycznych rozpatrywanych w badaniach składników mieszaniny, wzrost prędkości pozornych obu faz ciekłych powodował

zawsze wzrost wartości ich udziałów objętościowych. Nie bez znaczenia pozostawał także aspekt dominacji danych faz w przepływie, który w przypadku dominacji oleju w przepływie, wpływał w większym stopniu na wzrost wartości jego udziałów objętościowych, niż w przypadku dominacji fazy wodnej. Natomiast, w przypadku przepływu trójfazowego kluczową rolę w wartościach udziałów objętościowych faz odgrywała także obecność fazy gazowej w przepływie.

W wyniku przeprowadzonej, szczegółowej analizy stwierdzono, że niezależnie od faktu, która z faz ciekłych, woda czy olej, stanowiła fazę dominującą w przepływie oraz niezależnie od wartości lepkości cieczy olejowej, udział objętościowy gazu wzrastał wraz ze wzrostem jego prędkości pozornej. Jednocześnie, w większości przedstawionych w pracy ujęć graficznych, wpływu tej wielkości na charakter przepływu trójfazowego stwierdzić można, że udział objętościowy gazu zmniejszał się jednocześnie wraz ze wzrostem prędkości pozornych każdej z faz ciekłych.

Celem wskazania na sposób obliczania wartości udziałów objętościowych faz zarówno dla warunków przepływu dwufazowego woda-olej jak i przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej, w pierwszej kolejności dokonano oceny statystycznej dostępnych w literaturze metod obliczeniowych opracowanych dla różnych warunków przepływu mieszanin gazowo-cieczowych.

Przeprowadzona w tym zakresie, w rozdziale 6.2.2, adaptacja wybranych metod obliczeniowych udziału objętościowego faz dla warunków spływu cieczy dwufazowej, wykazała, że żadna z dostępnych w literaturze metod nie zapewnia wystarczającej dokładności obliczeń. Stąd też, po analizie wpływu parametrów przepływowych i właściwości ciekłych składników układu dwufazowego ciecz-ciecz, opracowano nowe równanie (6.14) do obliczania udziału objętościowego oleju w mieszaninie wodno-olejowej, dla którego średnia wartość błędu względnego wynosi 21,6%.

Wykorzystując niniejsze równanie do określania zastępczych właściwości cieczy wodno-olejowej w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz, wykazano, że do obliczania udziału objętościowego gazu w tego typu przepływie mogą być wykorzystane m.in. metody Armanda, Zuber-Findlaya raz Bonnacaze i in., dla których średnia wartość błędu względnego jest mniejsza niż 15%. Ze względu jednak na najwyższą dokładność metody Armanda (średni błąd względny $\pm 12\%$) oraz sprawdzoną w literaturze jej przydatność w obliczaniu udziału objętościowego gazu dla cieczy wysokolepkich, zdecydowano się rozszerzenie zakresu stosowalności tej metody także

dla przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz. Sposób obliczania udziałów objętościowych powietrza, wody i oleju w opadającym przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz szczegółowo opisano w rozdziale 6.2.6, w którym poszczególne wielkości zaleca się obliczać odpowiednio z równań (6.22), (6.28) oraz (6.29). Warto przy tym zaznaczyć, że równania (6.28) i (6.29), przy zaniku strumienia gazu, tj. dla $R_g = 0$, przechodzą w postać równań do obliczania udziałów objętościowych wody (6.30) i oleju (6.31) dla spływającej cieczy dwufazowej woda-olej. Uwzględniając, że nowo opracowane metody cechują się dużą dokładnością obliczeń, można polecić je do praktycznego wykorzystania w obliczeniach aparatów cienkowarstewkowych.

W trakcie badania hydrodynamiki przepływu wielofazowego określano także grubości tworzących się filmów cieczy odpowiednio dla spływu grawitacyjnego mieszaniny wodno-olejowej oraz przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej. Dla każdego z przypadków opracowano szczegółowe zależności pozwalające na obliczanie ich wartości. Opracowane równania (6.36) i (6.37) do obliczania zredukowanej grubości spływającego filmu cieczy dwufazowej oraz równanie (6.38) do obliczania tej wielkości przy przepływie z fazą gazową cechują się dużą dokładnością obliczeń, na co wskazują wyniki obliczeń statystycznych przedstawionych w rozdziałach 6.3.1 i 6.3.2.

Uzyskane w wyniku pracy dane doświadczalne wskazują jednoznacznie, że możliwe i korzystne jest prowadzenie procesów w warunkach wymuszonego pierścieniowego przepływu cieczy dwufazowej i gazu, poprzez zapewnienie odpowiednich warunków do uzyskania cienkich i stabilnych filmów cieczy na całej długości rur aparatów cienkowarstewkowych.

Opracowane w pracy mapy przepływu wielofazowego oraz zależności do obliczania wartości udziałów objętościowych faz oraz grubości filmów cieczy dwufazowej, mogą być w pełni wykorzystane do projektowania oraz analizy warunków pracy aparatów cienkowarstewkowych z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy typu WFH.

8. WYKAZ LITERATURY

- [1] Kolev N.I.: Multiphase flow dynamics 1 Fundamentals, Wyd. 2, Springer Berlin Heidelberg, New York 2005.
- [2] Brandt A., Witczak S.: Annular flow of the multiphase mixture in vertical pipes, The 6th International Conference on Transport Phenomena In Multiphase Systems HEAT, s. 91-96, Ryn 2011.
- [3] www.raj-evaporators.com z dnia 22.05.2013r.
- [4] www.peenterprise.com z dnia 22.05.2013r.
- [5] Troniewski L.: Aparaty z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy, Studia i Monografie z. 14, Wyższa Szkoła Inżynierska, Opole 1989.
- [6] www.niroid.com z dnia 22.05.2013r.
- [7] Hapanowicz J.: Przepływ ciekłych układów dyspersyjnych, Studia i Monografie, Politechnika Opolska, Opole 2007.
- [8] Dziubiński M., Prywer J.: Mechanika płynów dwufazowych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
- [9] Nowak M.: Udziały objętościowe i opory przepływu trójfazowego w kanale pionowym, praca doktorska, Opole 2007.
- [10] Filipczak G.: Teoretyczna i eksperymentalna ocena odparowania smoły w przepływie dwufazowym z parą wodną, Studia i Monografie z. 206, Politechnika Opolska, Opole 2007.
- [11] Dziubiński M., Fidos H., Sosno M.: The flow pattern map of a two-phase non-Newtonian liquid-gas flow in the vertical pipe, Int. J. Multiphase Flow 30, s. 551-563, 2004.
- [12] Zhang J.P., Grace J.R., Epstein N., Lim K.S.: Flow regime identification in gas-liquid flow and three-phase fluidized beds, Chem. Eng. Sci. Vol. 52, No. 21/22, s. 3979-3992, 1997.
- [13] Hazuku T., Takamasa T., Matsumoto Y.: Experimental study on axial development of liquid film in vertical upward annular two-phase flow, Int. J. Multiphase Flow 34, s. 111-127, 2008.
- [14] Angeli P., Hewitt G.F.: Flow structure in horizontal oil-water flow,

- Int. J. Multiphase Flow 26, s. 1117-1140, 2000.
- [15] Kim J., Kim M.H.: A photochromic dye activation method for measuring the thickness of liquid films, *Measurement* 39, s. 497-504, 2006.
- [16] Geraci G., Azzopardi B.J., van Maanen H.R.E.: Effect of inclination on circumferential film thickness variation in annular gas/liquid flow, *Chem. Eng. Sci.* 62, s. 3032-3042, 2007.
- [17] Joseph D.D., Bannawart A.C., Liu Y.J.: Stability of annular flow and slugging, *Int. J. Multiphase Flow* Vol. 22, No. 6, s. 1247-1254, 1996.
- [18] Pedersen P.C., Cakareski Z., Hermanson J.C.: Ultrasonic monitoring of film condensation for applications in reduced gravity, *Ultrasonics* 38, s. 486-490, 2000.
- [19] Czernek K.: Hydrodynamika pierścieniowego współprądowego przepływu opadającego w rurach pionowych cieczy bardzo lepkiej i gazu, praca doktorska, Opole 2004.
- [20] Gstoehl D., Roques J.F., Crisinel P., Thome J.R.: Measurement of falling film thickness around a horizontal tube using a laser measurement technique, *Heat Transfer Eng.* 25, s. 28-34, 2004.
- [21] Utaka Y., Tasaki Y., and Okuda S.: Micro-liquid-layer behavior and heat transfer characteristics of boiling in a micro-channel vaporizer, *Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering - ENCIT 0798*, Rio de Janeiro 2004.
- [22] Han Y.B., Shikazono N.: Thickness of liquid film formed in slug flow in micro tube, *Proceedings of the ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale*, Whistler 2008.
- [23] Brandt A.: Wpływ lepkości cieczy na grubość filmu cieczy przy współprądowym przepływie z gazem, *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, seria: Mechanika*, z. 93, s. 13-14, Opole-Pokrzywna 2009.
- [24] Brandt A.: Grubość filmów cieczy przy pierścieniowym przepływie cieczy dwufazowej z gazem, *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, seria: Mechanika*, z. 98, s. 13-14, Opole-Pokrzywna 2011.
- [25] Brandt A.: Dwufazowy przepływ pierścieniowy w aparatach cienkowiarynkowych, *XXXV Międzynarodowa Sesja Studencka, seria: Konferencje* 65, s. 170-175, Częstochowa 2011.
- [26] Tek M.R.: Multiphase flow of water, oil and natural gas through vertical flow

- strings, *J. Petrol. Technol.*, s. 1029-1036, 1961.
- [27] Shean A.R.: Pressure drop and phase fraction in oil-water-air vertical pipe flow, M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, 1976.
- [28] Pleshko A., Sharma M.P.: An experimental study of vertical three-phase (oil-water-air) upwards flows, ASME Proceedings Conference on Advances in gas-liquid flows, s. 81-88, Dallas 1990.
- [29] Taitel Y., Bornea D., Dukler A.E.: Modelling of flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes, *AIChE J.* 26, s. 345-354, 1980.
- [30] Guo H.M., Zhou C.D., Jin Z.W.: An interpretative method for production logs in three-phase flows, SPE Asia-Pacific Conference, s. 229-235, Australia 1991.
- [31] Woods G.S., Spedding P.L., Watterson J.K., Raghunathan R.S.: Three-phase oil/water/air vertical flow, *Chem. Eng. Research and Design* 76, s. 571-574, 1998.
- [32] Chen X.Z.: An investigation on the upward vertical flow characteristics of oil, gas and water in tubes, praca doktorska, 1991.
- [33] Oddie G., Shi H., Durlafsky L.J., Aziz K., Pfeffer B., Holmes J.A.: Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes, *Int. J. Multiphase Flow* 29, s. 527-558, 2003.
- [34] Descamps M.N., Oliemans R.V.A., Ooms G., Mudde R.F., Kusters R.: Influence of gas injection on phase inversion in an oil-water flow through a vertical tube, *Int. J. Multiphase Flow* 32, s. 311-322, 2006.
- [35] Descamps M.N., Oliemans R.V.A., Ooms G., Mudde R.F.: Experimental investigation on three-phase flow in a vertical pipe: local characteristics of the gas phase for gas-lift conditions, *Int. J. Multiphase Flow* 55, s. 1205-1102, 2007.
- [36] Furukawa T., Fukano T.: Effects of liquid viscosity on flow patterns in vertical upward gas-liquid two-phase flow, *Int. J. Multiphase Flow* 27, s. 1109-1126, 2001.
- [37] Chupin G., Nydal O.J.: An experimental study of air/oil/water pipe flow at low liquid loading, *Proceedings of the International Conference on Multiphase: Extending the Boundaries of Flow Assurance*, s. 391-405, 2003.
- [38] Hewitt G.F.: Three-phase gas-liquid-liquid flows in the steady and transient states, *Nuclear Engineering and Design* 235, s. 1303-1316, 2005.

- [39] Wegmann A., Melke J., von Rohr P.R.: Three-phase liquid-liquid-gas flows in 5.6 mm and 7 mm inner diameter pipes, *Int. J. Multiphase Flow* 33, s. 484-497, 2007.
- [40] Brandt A., Witczak S.: The annular three-phase flow of two-phase liquid with gas, IX Workshop Modelling of Multiphase Flows in Thermo-Chemical Systems, s. 15, Wieżyca 2011.
- [41] Brandt A.: Przepływ pierścieniowy mieszaniny dwufazowej z gazem, Doktorant a innowacyjność podejmowanych tematów badań cz. 1, nauki inżynierskie, Creative Science - Monografia, s. 13-21, Opole 2011.
- [42] Dziubiński M.: Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-gaz, Politechnika Łódzka, Łódź 2005.
- [43] Wang Z.Y., Jin N.D., Gao Z.K., Zong Y.B., Wang T.: Nonlinear dynamical analysis of large diameter vertical upward oil-gas-water three-phase flow pattern characteristics, *Chem. Eng. Sci.* 65, s. 5226-5236, 2010.
- [44] Fujii T., Ohta J., Takenaka N., Morimoto O., Nakazawa T.: The flow characteristics of a horizontal immiscible equal-density liquid-liquid two-phase flow, *Proc. Int. Conference on Multiphase Flow*, s. 195-198, Tsukuba 1991.
- [45] Nadler M., Mewes D.: Flow induced emulsification in the flow of two immiscible liquids in horizontal pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, s. 23, 1997.
- [46] Zavareh F., Mill A.D., Podio A.L.: Flow regimes in vertical and inclined oil/water, *SPE* 18215, 1988.
- [47] Troniewski L., Witczak S., Trembacz J.: Przepływ dwufazowy woda-olej w rurach pionowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, seria Mechanika z.* 65, s. 39, 2000.
- [48] Bannwart A.C.: Modeling aspects of oil-water core-annular flows, *J. Petrol. Sci. Eng.* 32, s. 127-143, 2001.
- [49] Jana A.K., Das G., Das P.K.: Flow regime identification of two-phase liquid-liquid upflow through vertical pipe, *Chem. Eng. Sci.* 61, s. 1500-1515, 2006.
- [50] Jin N.D., Nie X.B., Ren Y.Y., Liu X.B.: Characterization of oil/water two-phase flow patterns based on nonlinear time series analysis, *Flow Meas. Instrum.* 14, s. 169-175, 2003.
- [51] Troniewski L., Filipczak G., Witczak S., Hapanowicz J.: Sprawozdanie merytoryczne z projektu badawczego nr 3-3436-92-03 Opole, 1993.

- [52] Liu L., Matar O.K., Lawrence C.J., Hewitt G.F.: Laser-induced fluorescence (LIF) studies of liquid-liquid flows Part 1: Flow structures and phase inversion, *Chem. Eng. Sci.* 61, s. 4007-4021, 2006.
- [53] Hu B., Angeli P.: Phase inversion and associated phenomena in oil-water vertical pipeline flow, *Can. J. Chem. Eng.* 84, s. 94-107, 2006.
- [54] Hu B., Matar O.K., Hewitt G.F., Angeli P.: Mean and turbulent fluctuating velocities in oil-water vertical dispersed flows, *Chem. Eng. Sci.* 62, s. 1199-1214, 2007.
- [55] Lin R.H., Tavlarides L.L.: Flow patterns of n-hexadecane-CO₂ liquid-liquid two-phase flow in vertical pipes under high pressure, *Int. J. Multiphase Flow* 35, s. 566-579, 2009.
- [56] Xu J.Y., Li D.H., Guo J., Wu Y.X.: Investigations of phase inversion and frictional pressure gradients in upward and downward oil-water flow in vertical pipes, *Int. J. Multiphase Flow* 36, s. 930-939, 2010.
- [57] Du M., Jin N-D., Gao Z-K., Wang Z-Y., Zhai L-S.: Flow pattern and water holdup measurements of vertical upward oil-water two-phase flow in small diameter pipes, *Int. J. Multiphase Flow* 41, s. 91-105, 2012.
- [58] Zhang J., Xu J-Y., Wu Y-X., Li D-H., Li H.: Experimental validation of the calculation of phase holdup for an oil-water two-phase vertical flow based on the measurement of pressure drops, *Flow Measurement and Instrumentation*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.08.002>, 2012.
- [59] Troniewski L., Spisak W.: Flow pattern in two-phase down flow of gas and very viscous liquid, *Int. J. Multiphase Flow* 13, s. 257-260, 1987.
- [60] Schmidt J., Giesbrecht H., van der Geld C.W.M.: Phase and velocity distributions in vertically upward high-viscosity two-phase flow, *Int. J. Multiphase Flow* 34, s. 363-374, 2008.
- [61] Bannwart A.C., Rodriguez O.M.H., Trevisan F.E., Vieira F.F., de Carvalho C.H.M.: Experimental investigation on liquid-liquid-gas flow: Flow patterns and pressure-gradient, *J. Petrol. Sci. and Eng.* 65, s. 1-13, 2009.
- [62] Charles M.E., Govier G.W., Hodgson G.W.: The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixtures, *Can. J. Chem. Eng.* 39, 1961.
- [63] Flores J.G.: Oil-Water Flow in Vertical and Deviated Wells, praca doktorska, Tulsa 1997.

- [64] Spisak W.: Przepływ dwufazowy gaz-ciecz bardzo lepka w rurach pionowych, praca doktorska, Wrocław 1986.
- [65] Oshinowo T., Charles M.E.: Vertical two-phase flow Part I: Flow pattern correlations, *Can. J. Chem. Eng.* 52, s. 25-35, 1974.
- [66] Mydlarz-Gabryk K.: Transport mieszanin wodno-olejowych w rurach pionowych, praca doktorska, Opole 2009.
- [67] Poesio P., Strazza D., Sotgia G.: Very-viscous-oil/water/air flow through horizontal pipes: Pressure drop measurement and prediction, *Chem. Eng. Sci.* 64, s. 1136-1142, 2009.
- [68] Chen X., Guo L.: Flow pattern and pressure drop in oil-air-water three-phase flow through helically coiled tubes, *Int. J. Multiphase Flow* 25, s. 1053-1072, 1999.
- [69] Gao Z-K., Jin N-D.: Nonlinear characterization of oil-gas-water three-phase flow in complex networks, *Chem. Eng. Sci.* 66, s. 2660-2671, 2011.
- [70] Yeh G.C., Haynie Jr. F.H., Moses R.A.: Phase-volume relationship at the point of phase inversion in liquid dispersion, *AIChE Journal* 10, s. 206-265, 1964.
- [71] Liu W.H., Guo L.J., Cheng K.H., Han X.I., Zhao X.W., Yang L.: Characteristics of oil-gas-water three-phase flow pattern in horizontal and slightly inclined pipes, *Acta Petrolei Sinica* 27, s. 120-125, 2006.
- [72] Abro E., Johansen G.A.: Improved void fraction determination by means of multibeam gamma-ray attenuation measurements, *Flow Measurement and Instrumentation* 10, s. 99-108, 1999.
- [73] Wallis G.B.: One-dimensional two-phase flow, Mc Graw-Hill, New York 1969.
- [74] Brauner N.: Two-phase liquid-liquid annular flow, *Int. J. Multiphase Flow* 17, s. 59, 1991.
- [75] Dix G.E.: Vapor void fraction for forced convection with subcooled boiling at low flow rates, praca doktorska, Berkeley 1971.
- [76] Jin N.D.: Flow pattern identification of oil/water two-phase flow based on kinematic wave theory, *Flow Measurement and Instrumentation* 14, s. 177, 2003.
- [77] Chisholm D.A.: Two-phase flow in pipelines and heat exchangers, George Godwin, London/New York 1983.

- [78] Diener R., Friedel L.: Reproductive accuracy of selected void fraction correlations for horizontal and vertical upflow, *Forsch. Ingenieurwes* 64, s. 87-97, 1998.
- [79] Mayinger F.: *Stromung und Wärmeübergang in Gas-Flussigkeits-Gemischen*, Springer-Verlag Wien, New York 1982.
- [80] Spedding P.L., Woods G.S., Raghunathan R.S., Watterson J.K.: Vertical two-phase flow, part I - part III, *Trans. Chem. Eng.* 76, s. 612-634, 1998.
- [81] McNeil D.A., Stuart A.D.: The effects of a highly viscous liquid phase on vertically upward two-phase flow in a pipe, *Int. J. Multiphase Flow* 29, s.1523-1549, 2003.
- [82] Spisak W., Idzik J.: Gas hold-up in stalactite and slug flows with highly viscous liquids, *Chem. Eng. J.* 56, s. B79-B85, 1994.
- [83] Lockhart R.M., Martinelli R.L.: Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes, *Chem. Eng. Prog.* 45, s. 39-48, 1949.
- [84] Premoli A., Di Francesco D., Prina A.: A dimensionless correlation for determining the density of two-phase flow measures, *Termotechnico* 25, s. 17-25, 1971.
- [85] Chisholm D.A.: The influence of viscosity and liquid flow rate on the phase velocities during two-phase flow, *NEL Report No. 33*, East Kilbride Glasgow.
- [86] Claxton K.T., Collier J.G., Ward J.A.: HTFS correlations for two-phase pressure drop and void fraction in tubes, *Heat Transfer and Fluid Flow Service*, Harwell GB, design report 28 (AERE-R 7162).
- [87] Ulbrich R.: Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz, *Zeszyty Naukowe WSI, seria: Mechanika z 32*, Opole 1989.
- [88] Zakrzewska M.: Wnikanie ciepła przy dwufazowym przepływie gaz-ciecz lepka w rurach pionowych, *praca doktorska*, Opole 2004.
- [89] Zuber N., Findlay J.A.: Average volume concentration in two-phase flow systems, *J. Heat Transfer* 87, *Trans. ASME*, s. 453-468, 1965.
- [90] Hobler T.: *Ruch ciepła i wymienniki*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
- [91] Mersmann A. i in.: *Thermal Separation Technology: Principles, Methods, Process Design*, VDI-Buch, DOI 10.1007/978-3-642-12525-6_3 Springer-

- Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [92] Broniarz-Press L.: Hydrodynamika spływu filmowego cieczy i zjawiska przenoszenia w aparatach warstewkowych, Politechnika Poznańska, Poznań 2004.
- [93] Nusselt W.: Die Oberflächenkondensation des Wasser Dampfes, VDI-Z 60, s. 542, 1916 wg [19].
- [94] Levic V.G.: Fiziko-chemiceskaja gidrodinamika, Fiz-mat-giz. Moskwa 1959 wg [19].
- [95] Cholpanov L.P.: Teplomassoobmen igidrodinamika plenocznego tekucenija zidkosti, Teor. Osn. Chim. Technol. No. 1, s. 86, 1987.
- [96] Koziół K., Broniarz L., Nowicka-Kubiszewska T.: Pasywna turbulizacja przepływu i jej wpływ na intensyfikację procesów wymiany ciepła i masy, ZNPP, Chemia i Inżynieria Chemiczna 15, s. 309, 1980.
- [97] Broniarz-Press L.: Materiały własne, niepublikowane wg [19].
- [98] Collier J.G., Hewitt G.F.: Data on the vertical flow of air-water mixtures in the annular and disperse flow regions, Trans. Inst. Chem. Eng. 39, No. 1, s. 127, 1961.
- [99] Jayanti S., Hewitt G.F.: Hydrodynamics and heat transfer of wavy thin film flow, Int. J. Heat Mass Transfer, tom 40, nr 1, s. 179, 1997.
- [100] Brötz W.: Über die Vorausberechnung der Absorptionsgeschwindigkeit von Gasen in strömenden Flüssigkeitsschichten, Chem. Ing. Technik, tom 26, nr 4, s. 470-478, 1954.
- [101] Brötz W.: Podstawy inżynierii reakcji chemicznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1964.
- [102] Brauer H.: Strömung und Wärmeübergang bei Rieselfilmen, VDI-Forschungsheft 457, s. 1-40, 1956.
- [103] Brauer H.: Stoffaustausch beim Rieselfilm, Chem. Ing. Technik, tom 30, nr 1, s. 75- 84, 1958.
- [104] Brauer H.: Grundlagen der Einphasen – und Mehrphasenstromungen, Verlag Sauerlander, Aarau 1971.
- [105] Portalski S.: Studies of falling liquid film flow, Chem. Eng. Sci. 18, s. 787-804, 1963.

- [106] Feind K.: Strömungsuntersuchungen bei Gegenstrom von Rieselfilmen und Gas in senkrechten Rohren, VDI – Forschungsheft 481, s. 1-35, 1960.
- [107] Živajkin L.Ja.: O tolščine plěnki židkosti v apparatach plenočnogo topa, *Chimičeskoe mašinostroenie* 6, s. 25-29, 1961.
- [108] Živajkin L.Ja., Volgin B.P.: Plenočnoe tečenie po vertikal'noj poverchnosti, *Ž. Prikl. Chimii* 6, s. 1236-1239, 1961.
- [109] Černobylskij I.I., Voroncov E.G.: Vestnik KPI, Ser. Chim. Masinostr. i Technol. No. 5, 1986 wg Voroncov E.G., Vlijanie vida i razmerov uporjadočennoj šerochovatosti na tečenie plěnki židkosti, *Ž. Prikl. Chimii*, tom 51, nr 4, s. 773-779, 1978.
- [110] Kutateladze S.S.: Fundamentals of Heat Transfer, Academic Press, New York 1963.
- [111] Kosky P.G.: Thin liquid films flow under simultaneous shear gravity forces, *Int. J. Heat Mass Transfer* 14, s. 1220-1224, 1971.
- [112] Lukač Ju. E. i in.: Opredelenie srednej tolščiny plěnki vody pri gravitacionnom tečenii po naružnoj poverchnosti vertikal'nych trub iz polimerov, *Izv. vuzov, Chim. i chim. Technol.*, tom 15, nr 1, s. 141-143, 1972.
- [113] Koneru R.D., Tananajko Ju. M., Černobylskij I.I.: Vlijanie poverchnostno-aktivnych veščestv na srednjuju tolščinu stekajuščej plěnki židkosti, *Ž. Prikl. Chim.*, tom 46, nr 11, s. 2502-2506, 1973.
- [114] Alekseenko S.V., i in.: Trenie pri stekanii plěnki po vertikal'noj stenke, *Inž.-fiz. Žurnal*, tom 24, nr 5, s. 824-830, 1973.
- [115] Kozlov V.M., Gudev V.V., Mestronov M.G.: Issledovanie gravitacionnogo tečenija plěnki židkosti metodom nejtronnoj diagnostiki, *Teor. osnovy chim. technol.* 10, s. 69-73, 1976.
- [116] Takahama H., Kato S.: Longitudial flow characteristics of vertically falling liquid films without co-current gas flow, *Int. J. Multiphase Flow*, tom 6, nr 2, s. 203-215, 1980.
- [117] Mostifizadech C., praca doktorska, Stuttgart 1980 wg [92].
- [118] Kvurt Ju. P., Cholpanov L.P., Maljusov V.A.: Tolščina plěnki židkosti v kanalach s reguljarnoj šerochovatost'ju, *Teor. osn. chim. technol.*, tom 20, nr 4, s. 479-484, 1986.

- [119] Geršakova M.S.: Massoobmen so svobodno padajuščimi plěnkami židkosti, *Ž. Vses. Chim. Obscestva im. Mendeleeva*, tom 23, nr 3, s. 354-355, 1978.
- [120] Broniarz L.: Oddziaływanie ściany aparatu warstewkowego na średnią grubość filmu cieczy i współczynnik wnikania masy w fazie ciekłej, *Inż. Chem. i Proc.*, tom 12, nr 2, s. 227-249, 1991.
- [121] Černyšev V.I., praca doktorska, Moskwa 1972 wg [92].
- [122] Ho F.C.K., Hummel R.L.: Average velocity distributions within falling liquid films, *Chem. Eng. Sci.*, tom 25, nr 7, s. 1225-1238, 1970.
- [123] Willets I.P.: Non-Aqueous Annular Two-Phase Flow, praca doktorska, Oxford 1987.
- [124] Azzopardi B.J.: Disturbance wave frequencies, velocities and spacing in vertical annular two-phase flow, *Nuclear Engineering and Design* 92, s. 121-133, 1986.
- [125] Bousman W.S.: Studies of Two-Phase Gas-Liquid Flow in Microgravity, NASA Contractor Report 195434.
- [126] de Jong P., Gabriel K.S.: A preliminary study of two-phase annularflow at microgravity: experimental data of film thickness, *Int. J. Multiphase Flow* 29, s. 1203-1220, 2003.
- [127] Hajiloo M., Chang B.H., Mills A.F.: Interfacial shear in downward two-phase annular co-current flow, *Int. J. Multiphase Flow* 27, s. 1095-1108, 2001.
- [128] Brandt A.: Badania grubości filmów cieczy bardzo lepkiej przy jej przepływie z gazem, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Opolska, Opole 2008.
- [129] Henstock W.H., Hanratty T.J.: The interfacial drag and the height of the wall layer in annular flows, *AIChE J.* 22, s. 990-1000, 1976.
- [130] Brandt A.: Adaptacja konduktywności do oceny struktur przepływu trójfazowego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*, seria: Mechanika z. 100, s. 19-22, Opole-Pokrzywna 2012.
- [131] *Tablice do obliczeń procesowych* pod red. L. Troniewskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006.
- [132] Czernek K.: Hydrodynamiczne aspekty projektowania aparatów cienkowarstewkowych dla cieczy bardzo lepkich, *Studia i Monografie* z. 347 Politechnika Opolska, Opole 2013.

- [133] Pendyk B., Witczak S.: Udział objętościowy faz przy przepływie dwufazowym ciecz-ciecz, *Inż. i Ap. Chem.* 3, s. 16-19, 2006.
- [134] Armand A.A: Resistance to two-phase flow In horizontal tubes (in Russian). *Izv. VTI* 15, s. 16-23, 1946 wg [8].
- [135] Chisholm D.: A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow, *Int. J. Heat Mass Transfer* 10, s. 1761, 1967.
- [136] Stomma Z.: Two-phase floks-void fraction values determination, IBJ Raport nr INR/1818/IX/A, Świerk 1979.
- [137] Hughmark G.A.: Holdup and heat transfer in horizontal slug gas-liquid flow, *Chem. Eng. Sci.* 20, s. 1007-1010, 1965.
- [138] PUNCHES W.C.: Method evaluates transient thermal-hydraulic condition in rod bundles, Report No 23517, 1977.
- [139] Pendyk B, Witczak S.: Adaptacja metod wyznaczania udziałów objętościowych gazu w przepływie dwufazowym dla warunków przepływu trójfazowego, seria: *Mechanika z.90*, s. 5-16, 2008.
- [140] Zivi S.M.: Estimation of steady state steam void fraction by means of the principle of minimum entropy production, *Trans. ASME, J. Heat Transfer* 86, s. 247-252, 1964.
- [141] Zhao T.S., Bi Q.C.: Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels, *Int. J. Multiphase Flow* 27, s. 765-782, 2001.
- [142] Bonnecaze R.H., Erskine W., Greskovich E.J.: Holdup and pressure drop for two phase slug flow in inclined pipes, *AIChE J.* 17, s. 1109-1113, 1971.
- [143] Pendyk B.: Udział objętościowy faz przy przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz w kanałach poziomych, praca doktorska, Opole 2002.
- [144] Lahey R.T., Acikgogz M., Franca F.: Global volumetric phase fractions in horizontal three-phase flows, *AIChE J.* 38, s. 1049-1058, 1992.

PRZEPIY W PIERŚCIENIOWY MIESZANINY WIELOFAZOWEJ W RURACH APARATÓW CIENKOWARSTEWKOWYCH

(Streszczenie)

W pracy przedstawiono wyniki badań oraz ich analizę odnośnie hydrodynamiki pierścieniowego przepływu wielofazowego gazu i dwóch wzajemnie niemieszających się cieczy. W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych, obejmujących identyfikację struktur przepływu wielofazowego, wyznaczanie wartości udziałów objętościowych poszczególnych faz oraz wartości grubości różnych jakościowo filmów cieczy dwufazowej woda-olej, dokonano rozszerzenia i uzupełnienia stanu wiedzy w wybranych obszarach opisu przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz.

W zakresie tym, opracowano nowe zależności do obliczania wartości udziałów objętościowych faz, zarówno w warunkach spływu grawitacyjnego dwóch cieczy wzajemnie niemieszających się oraz przy ich przepływie z fazą gazową. Wyodrębniono i opisano nowe struktury przepływu dla zakresów przepływu z dominacją fazy wodnej oraz fazy olejowej, w obu rozpatrywanych typach przepływu. Dla obiektywnej identyfikacji struktur przepływu cieczy dwufazowej opracowano własną, konduktometryczną metodę pomiarową, opartą o pomiar spadku wartości napięcia w filmie cieczy wodno-olejowym w zależności od udziału objętościowego obu składników. Określono obszary występowania określonych struktur wodno-olejowych na nowo opracowanej mapie przepływu, słusznej zarówno dla przepływu dwufazowego ciecz-ciecz, jak i dla przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz. Opracowano także równania opisujące wpływ wybranych parametrów przepływowych oraz właściwości faz na uzyskiwanie określonych wartości grubości filmów cieczy, zarówno dla przypadku ich spływu grawitacyjnego jak i przepływu trójfazowego powietrze-woda-olej.

Przedstawione w pracy mapy przepływu wielofazowego oraz zależności do obliczania udziałów objętościowych faz oraz grubości filmów cieczy dwufazowej, mogą być w pełni wykorzystane do projektowania oraz analizy warunków pracy aparatów cienkowarstewkowych z hydraulicznie wytwarzanym filmem cieczy typu WFH.

Słowa kluczowe: przepływ pierścieniowy, mieszanina wielofazowa, dominacja faz, konduktancja cieczy, aparaty cienkowarstewkowe.

THE ANNULAR FLOW OF MULTIPHASE MIXTURE IN PIPES OF THIN FILM-TYPE EVAPORATORS

(Abstract)

The research results and their analysis applied to hydrodynamics of annular multiphase flow of gas and two mutually non-mixing liquids were presented in this work.

In result to conducted experimental research involving the structures identification of multiphase flow, determination of each phase void fractions values and the values of qualitative different thicknesses of two-phase water-oil liquid films, the extension and complementation of knowledge state in chosen described ranges of three-phase gas-liquid-liquid flow were achieved.

In mentioned range the new correlations to calculate values of phase void fractions both, in conditions of gravitational flow of two liquids mutually non-mixing and its flow with gas phase were compiled. The new flow structures for ranges of water and oil phase domination in both types of considered flows were elaborated.

For objective structures identification of two-phase liquid, the own new conductivity measuring method based on voltage drop values in water-oil liquid film, depending on void fractions of both components was developed.

The occurring region of determining water-oil structures on new compiled flow map were determined which is legitimate both for two-phase liquid-liquid and three-phase gas-liquid-liquid flow.

The equations determining the influence of chosen flow parameters and phase properties for obtaining the specific values of liquid film thicknesses, both for its gravitational flow and three-phase air-water-oil flow case were elaborated.

Presented in this work the multiphase flow maps and correlations to calculate the phase void fractions and the two-phase liquid films thicknesses can be fully used to design and analysis the work conditions of thin film-type evaporators with hydraulically produced liquid film type WFH.

Key words: annular flow, multiphase flow, phase domination, liquid conductivity, thin film-type evaporators.