



POLITECHNIKA
OPOLSKA

Rozprawa doktorska pt.:

**Przepływ układów wielofazowych w rurze
poziomej wypełnionej pianą metalową**

Autor:

mgr inż. Adriana Szydłowska

Promotor:

dr hab. inż. Jerzy Hapanowicz,
profesor uczelni

Miejsce realizacji:

Politechnika Opolska
Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii Procesowej i Środowiska

Opole 2021

*Pragnę wyrazić wdzięczność
Panu Promotorowi dr hab. inż. Jerzemu Hapanowiczowi, prof. Politechniki Opolskiej
za okazane wsparcie, cenne wskazówki, poświęcony czas i cierpliwość,
a także mojemu mężowi Pawłowi
za wyrozumiałość, cierpliwość i wsparcie.*

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
Cel i zakres pracy	7
1. Wprowadzenie	8
2. Wybrane metody zwiększania wydajności cieplnej rekuperatorów	11
2.1. Wzrost gęstości upakowania powierzchni wymiany ciepła	11
2.2. Stosowanie przegród w wymiennikach płaszczowo-rurowych	12
2.3. Wykorzystanie rur ożebrowanych	21
2.4. Wykorzystanie turbulizatorów przepływu	26
3. Piana metalowa i jej cechy	31
3.1. Ogólna charakterystyka materiału	31
3.2. Parametry pian	36
3.3. Piana metalowa jako turbulizator przepływu	38
4. Hydraulika przepływu płynu w rurkach wymiennika	44
4.1. Przepływ jednofazowy	44
4.2. Przepływ dwufazowy	46
4.2.1. Układ gaz-ciecz	46
4.2.2. Układ ciecz-ciecz	49
4.3. Przepływ w rurze wypełnionej pianą metalową	53
4.3.1. Przepływ jednofazowy	54
4.3.2. Przepływ dwufazowy	62
5. Badania eksperymentalne	69
5.1. Stanowisko badawcze	69
5.2. Charakterystyka pian metalowych wykorzystanych	83
5.3. Metodyka prowadzenia eksperymentów	90
5.4. Wyniki badań i ich analiza	93
5.4.1. Przepływ jednofazowy	93
5.4.2. Przepływ układu gaz-ciecz	106
5.4.3. Przepływ układu ciecz-ciecz	116
6. Badania numeryczne	123
6.1. Sposób i zakres prowadzenia badań	123
6.2. Ocena uzyskanych wyników	130
7. Podsumowanie i wnioski	134
LITERATURA	137
ZAŁĄCZNIKI	150

Streszczenie	193
Summary.....	194

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a – powierzchnia właściwa, m^2/m^3
 d – średnica, m
 f – współczynnik tarcia Fanninga, -
 g – gęstość strumienia masy, $kg/(m^2s)$
 \hat{g} – przyspieszenie ziemskie, m/s^2
 h – różnica poziomów pomiędzy wlotem i wylotem kanału przepływowego, m
 k – średnia wysokość nierówności powierzchni, m
 l – długość włókna piany, m
 r – promień, m
 t – grubość/średnica włókna piany, m
 v – objętość, m^3
 w – prędkość, m/s
 x – udział masy, -
 F – współczynnik Forchheimera, -
 G – strumień masy, kg/s
 K – przepuszczalność piany, m^2
 L – długość kanału, m
 P – ciśnienie, Pa
 Q – strumień ciepła, W
 R – stała gazowa = $8314 J/(kmol \cdot K)$
 T – temperatura, K
 U – współczynnik przenikania ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$
 V – strumień objętości, m^3/s
 X – parametr Lockarta – Martinellego, -
 $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania, $1/s$
 ε – porowatość, -
 ζ – wlotowy udział objętości fazy w mieszaninie dwufazowej, -
 η – współczynnik dynamiczny lepkości, $Pa \cdot s$
 λ – liczba liniowego oporu, -
 ν – objętość właściwa, m^3/kg
 ξ – liczba miejscowego oporu, -
 ρ – gęstość, kg/m^3
 σ – napięcie powierzchniowe, N/m
 τ – naprężenie styczne, Pa
 β – współczynnik inercji piany, $1/m$
 ΔP – opór przepływu, Pa
 $\Delta P/\Delta L$ – jednostkowy opór przepływu, Pa/m
 Φ – poprawka oporu przepływu, -

Indeksy odnoszą się do:

$2F$ – układu dwufazowego
 c – cieczy
 $c-c$ – układu ciecz-ciecz
 cz – cząstki (ziarna)
 f – płynu (powietrza, wody lub oleju)
 fc – fazy ciągłej
 fr – fazy rozproszonej

g – gazu
g-c – układu gaz-ciecz
h – średnicy hydraulicznej
o – wielkości pozornej, obliczonej dla pełnego przekroju poprzecznego rury lub aparatu
obl – wartości obliczonej
ol – oleju
p – powietrza
pw – pora właściwego
pm – pora małego
r – rury
śc – ścianki rury
śr – wartości średniej
w – wody
zm - wartości zmierzonej
RR – rury reometru

Liczby kryterialne:

$$Da = \frac{K}{H^2} - \text{liczba Darcy'ego,}$$

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2} - \text{liczba Eulera,}$$

$$Fr = \frac{w^2}{\hat{g}d} - \text{liczba Frouda'a,}$$

$$Hg = 110 Re + 1,45 Re^2 - \text{liczba Hagena,}$$

$$Re = \frac{wd\rho}{\eta} - \text{liczba Reynoldsa,}$$

Skróty oznaczają:

PPI – liczba porów na długość 1 cala,

WWCH – współczynnik wydajności cieplno-hydraulicznej

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest lepsze poznanie i opisanie zjawisk towarzyszących przepływowi wielofazowych układów rozproszonych w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową.

Dla tak sformułowanego celu pracy przyjęto następujący jej zakres:

- analiza istniejącego stanu wiedzy w odniesieniu do: wybranych metod zwiększania wydajności cieplnej rekuperatorów płaszczowo-rurowych, możliwości zastosowania pian metalowych jako turbulizatora przepływu oraz hydrauliki przepływu jednofazowego i dwufazowego w rurach pustych, jak i wypełnionych pianą metalową;
- wykonanie badań eksperymentalnych pozwalających na ocenę wpływu obecności w rurze poziomej piany metalowej, jej parametrów strukturalnych oraz materiału z jakiego została wykonana na opory przepływu układów dwufazowych gaz-ciecz i ciecz-ciecz, a także tworzących je substancji jednofazowych;
- wykonanie badań numerycznych zmierzających do zaproponowania metodyki modelowania przepływu układu powietrze-woda przez strukturę piany metalowej
- przeprowadzenie szczegółowej analizy wyników własnych badań eksperymentalnych pod kątem:
 - oceny wpływu obecności piany metalowej w rurze na hydrodynamikę przepływu jednofazowego gazu i cieczy oraz układów dwufazowych gaz-ciecz i ciecz-ciecz
 - oceny wpływu parametrów strukturalnych piany metalowej oraz materiału z jakiego została ona wykonana na opory przepływu jednofazowego gazu i cieczy oraz układów dwufazowych gaz-ciecz i ciecz-ciecz
 - oceny jakościowej i ilościowej literaturowych metod obliczania oporów przepływu jednofazowego oraz układów dwufazowych gaz-ciecz i ciecz-ciecz, prowadzącej do opracowania nowych metod obliczania oporów przepływu tych układów w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową

1. Wprowadzenie

Wymienniki ciepła są aparatami przepływowymi szeroko stosowanymi w praktyce przemysłowej. Spośród nich, najpowszechniej korzysta się z wymienników płaszczowo-rurowych. Dobra funkcjonalność przy wysokich ciśnieniach i temperaturach, wytrzymała mechanicznie konstrukcja i prosta geometria oraz łatwa konserwacja to największe zalety wymienników płaszczowo-rurowych, w porównaniu z innymi wymiennikami ciepła [1]. Wydajność procesu wymiany ciepła w tego typu aparatach zależy od wielu ich parametrów konstrukcyjnych, takich jak: rozmieszczenie rurek, ich liczba i długość, a także liczba i typ zastosowanych przegród [2].

Optymalizacja konstrukcyjno-procesowa wymienników ciepła ma duże znaczenie praktyczne ze względu na powszechność stosowania tych aparatów w instalacjach przemysłowych i energetycznych. Jej celem jest zaprojektowanie aparatu o najlepszej konstrukcji pod względem kryterium zapotrzebowania energii niezbędnej do realizacji określonego procesu wymiany ciepła oraz tłoczenia czynników wymieniających ciepło [3].

Pod względem procesowym, projektowanie wymienników ciepła wymaga rozpatrzenia równań matematycznych modelu procesu takich jak równanie zachowania energii, równanie kinetyki procesu wymiany ciepła, czy też równanie wyrażające opory przepływu.

Z konstrukcyjnego punktu widzenia istnieją trzy metody zwiększania intensywności wymiany ciepła w wymiennikach ciepła: metoda pasywna, aktywna oraz kombinowana (łączona). Metoda pasywna polega na geometrycznych modyfikacjach aparatu oraz powierzchni wymiany ciepła. Pośród takich rozwiązań można wymienić stosowanie przegród, żeber lub różnego rodzaju wypełnień przestrzeni rurowej, a także rurek o zmodyfikowanym kształcie powierzchni. Metoda aktywna polega na wykorzystaniu dodatkowej energii pochodzącej z zewnątrz. Natomiast metoda kombinowana składa się z połączenia metody aktywnej i pasywnej [4]. Aktualnie, głównym celem badaczy w obszarze budowy i eksploatacji wymienników ciepła jest zwiększanie wymiany ciepła przy zastosowaniu metod pasywnych. Główną zaletą, a jednocześnie potrzebą intensyfikacji wymiany ciepła jest miniaturyzowanie układu (zmniejszenie rozmiaru i masy urządzeń), co pozwala zmniejszyć koszty całkowite oraz daje możliwość bardziej efektywnego wykorzystania przestrzeni [1]. Wymienić można również korzyści środowiskowo-ekonomiczne, takie jak zwiększenie wydajności

procesu wymiany ciepła, zmniejszenie strat ciśnienia związanych z przepływem czynników, siły napędowej procesu wymiany ciepła oraz zapotrzebowania energii na pokonanie oporów przepływu czynników wymieniających ciepło [4].

W świetle dostępnych rozwiązań innowacyjnym może okazać się wypełnienie rurek wymiennika ciepła pianą metalową. Jednak jej obecność w rurze zaburza przepływ płynu, co może mieć szczególnie istotne znaczenie w parownikach i skraplaczach, w których nierzadko występuje przepływ dwufazowy. Zaburzenie hydrodynamiki przepływu należy rozpatrywać w dwojaki sposób, gdyż w przypadku układów wielofazowych zmiana burzliwości oraz struktury przepływu z jednej strony rzutuje na opory przepływu, a z drugiej strony wpływa na wydajność procesu wymiany ciepła. Z kolei powiązanie tych parametrów ze sobą pozwala ustalić wartość współczynnika wydajności cieplno-hydraulicznej (WWCH) wymiennika ciepła, definiowanego w uproszczeniu jako ilość wymienionego ciepła na jednostkowe straty ciśnienia

$$E = \frac{Q}{\Delta P}, \quad (1.1)$$

którego znaczenie jest istotne z punktu widzenia optymalizacji aparatów do wymiany ciepła. W związku z tym dysponowanie opisem matematycznym parametrów Q i ΔP obowiązującym dla przepływu płynów przez piany metalowe jest kluczowe dla znalezienia optymalnego rozwiązania wymiennika ciepła z rurkami wypełnionymi pianą metalową.

Niniejszą pracę poświęcono jedynie zagadnieniom związanym z oporami przepływu płynów w rurze wypełnionej pianą metalową. Przepływ płynu jednofazowego oraz układów wielofazowych w pustej rurze jest już stosunkowo dobrze poznany. Z kolei, mimo licznych opracowań poświęconych przepływowi jednofazowemu i dwufazowemu gaz-ciecz przez piany metalowe wiedza w tym zakresie nadal jest nie do końca usystematyzowana. Szczególne braki odnoszą się również do jednoznacznego opisu matematycznego geometrii pian metalowych. Dodatkowy problem stanowi brak doniesień literaturowych odnośnie przepływu układu ciecz-ciecz przez piany metalowe.

W związku z powyższym podjęto działania zmierzające do uzupełnienia i rozszerzenia stanu wiedzy dotyczącej oporów przepływu jednofazowego, dwufazowego gaz-ciecz oraz dwufazowego ciecz-ciecz przez piany metalowe.

Zaplanowane i zrealizowane badania eksperymentalne oraz numeryczne zostały ukierunkowane na poznanie zjawisk towarzyszących przepływowi układów wielofazowych w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową. Ich wyniki pozwoliły stworzyć możliwie uniwersalne metody obliczania oporów przepływu jednofazowego i dwufazowego gaz-ciecz oraz ciecz-ciecz przez rury wypełnione pianą metalową.

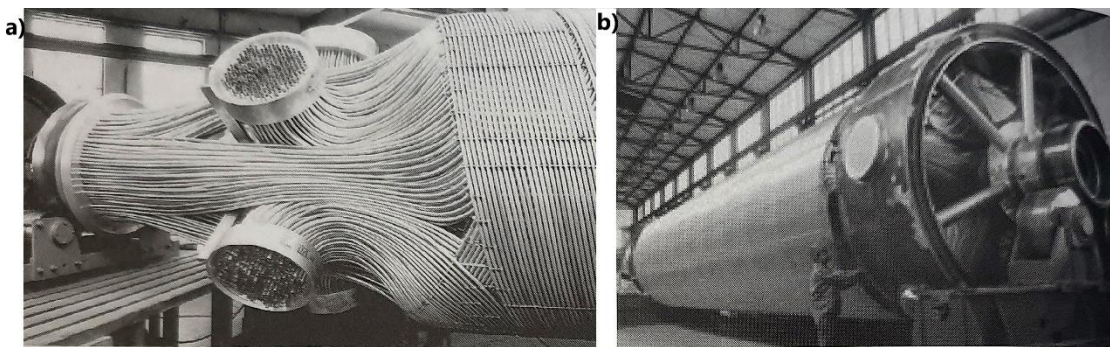
Prowadzenie szczegółowych badań naukowych wymagało:

- dokonania przeglądu aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do stosowanych rozwiązań zwiększających wydajność cieplną wymienników ciepła, możliwości stosowania piany metalowej jako turbulizatora przepływu w rurkach wymiennika ciepła, charakterystyki piany metalowej jako medium porowate oraz w odniesieniu do przepływu płynów przez piany metalowe;
- zaplanowania i realizacji zakresu badań eksperymentalnych, zgodnie z którym zaadaptowano wcześniej już istniejące stanowisko pomiarowe;
- zaplanowania i realizacji zakresu badań numerycznych;
- dokonania prób zastosowania lub adaptacji istniejących metod obliczania oporów przepływu w odniesieniu do rozpatrywanych w pracy przepływów;
- opracowania i analizy skuteczności własnych metod wyznaczania oporów przepływu dla rozpatrywanych w pracy układów.

2. Wybrane metody zwiększania wydajności cieplnej rekuperatorów

2.1. Wzrost gęstości upakowania powierzchni wymiany ciepła

Bardzo dobrze zbadaną i znormalizowaną grupą wysokowydajnych rekuperatorów płaszczowo-rurowych są wymienniki helikoidalne, określane również mianem wymienników typu JAD oraz WWB. Aparaty te wykonywane są jako nierozbieralne. Pod ich płaszczem znajduje się zestaw rurek o znormalizowanych wymiarach. Rurki ułożone są warstwowo w sposób helikoidalny, co przedstawiono na rys. 2.1. [5].



Rys. 2.1. Wymiennik typu JAD wg [6]:
a) koniec sekcji wiązki rur, b) wymiennik w produkcji

Dzięki wysokiej wydajności i przystosowaniu do pracy w warunkach wysokiego ciśnienia wymienniki typu JAD/WWB są z powodzeniem stosowane w węzłach ciepłowniczych. Wymienniki te przewidziane są do pracy w pozycji pionowej, co sprawia, że nie są one uniwersalne w zastosowaniu przemysłowym.

Dodatkowym sposobem zwiększenia wydajności cieplnej wymiennika typu JAD może być zastosowanie rury o powierzchni zniekształconej wgłębieniami, którą zilustrowano na rys. 2.2.

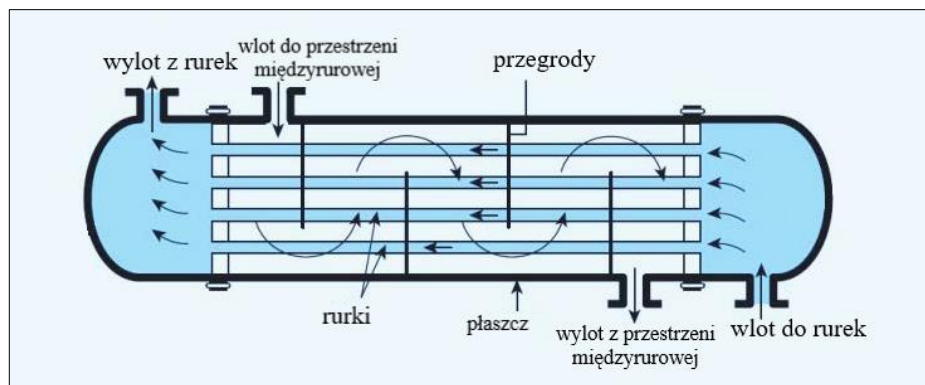


Rys. 2.2. Zwinięta spiralnie rura z wgłębieniami, wg [7]

Jednak na podstawie przeprowadzonych badań i analiz wykazano [7], że straty ciśnienia związane z przepływem przez zwiniętą spiralnie rurę o zniekształconej wgłębianiami powierzchni były wyższe, niż podczas przepływu w rurze gładkiej zwiniętej spiralnie oraz rurze gładkiej prostej o odpowiednio 73-130% i 171-334%. Tym samym straty ciśnienia okazały się zbyt wysokie w stosunku do poprawy szybkości wymiany ciepła. Zatem stosowanie tego rozwiązania konstrukcyjnego nie było korzystne pod względem wydajności cieplno-hydraulicznej wymiennika ciepła.

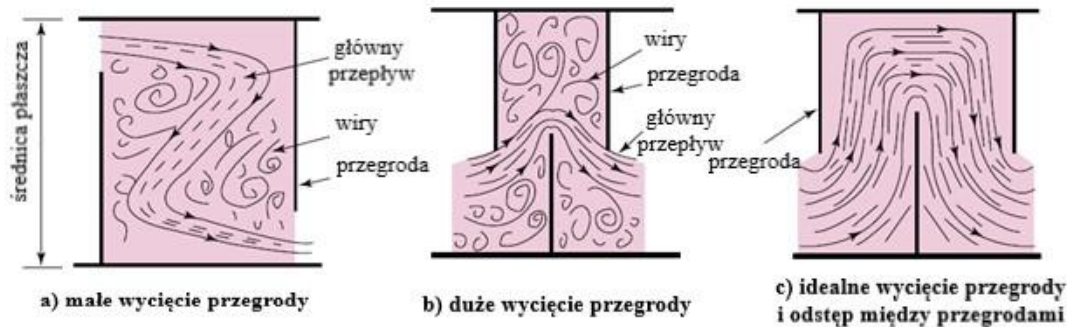
2.2. Stosowanie przegród w wymiennikach płaszczowo-rurowych

Jednym z najbardziej powszechnych sposobów zwiększania wydajności cieplnej wymienników płaszczowo-rurowych jest stosowanie przegród segmentowych w przestrzeni międzyrurowej. Ich obecność zwiększa turbulencję przepływu, a tym samym intensyfikuje mieszanie się przepływającego płynu. Przegrody te mają postać płyt i są instalowane poprzecznie w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła, zajmując od ok. 50 do 80% przekroju poprzecznego tej przestrzeni [6]. Schemat płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi przedstawiono na rys. 2.3.



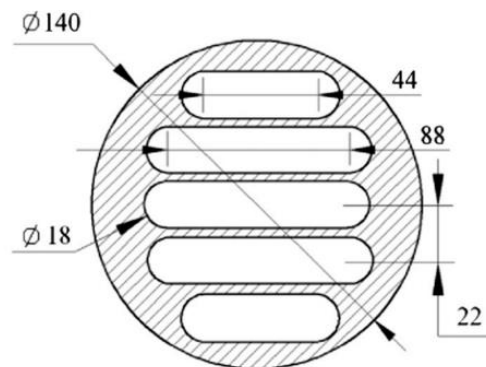
Rys. 2.3. Schemat płaszczowo-rurkowego wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi, wg [8]

Jak widać na schemacie pokazanym na rys. 2.3., kierunek przepływu czynnika w przestrzeni międzyrurowej wymuszany jest przez zainstalowane przegrody i odbywa się w poprzek i wzdłuż rurek. Jednakże taki sposób przepływu płynu ma pewne wady, m. in. duże przestrzenie martwe, stosunkowo wysoki stopień mieszania wstecznego, czy wzrost oporów przepływu oraz wysokie ryzyko awarii na skutek wibracji [6],[9]. Kierunki przepływu substancji w przestrzeni międzyrurowej aparatu z przegrodami przedstawiono schematycznie na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Przepływ płynu w przestrzeni międzyrurowej wymiennika z przegrodami, wg [6]

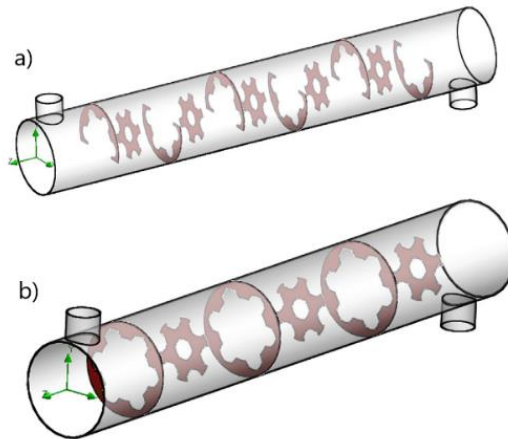
W celu ograniczenia wad związanych ze stosowaniem konwencjonalnych przegród segmentowych wielu badaczy przeprowadziło badania poświęcone próbom wykorzystania ich różnych modyfikacji. Jednym z tego przykładów jest praca [10], w której zaproponowano nowatorską geometrię przegrody segmentowej, nazywaną przegrodą płytową. Jej rysunek przedstawiono na rys. 2.5.



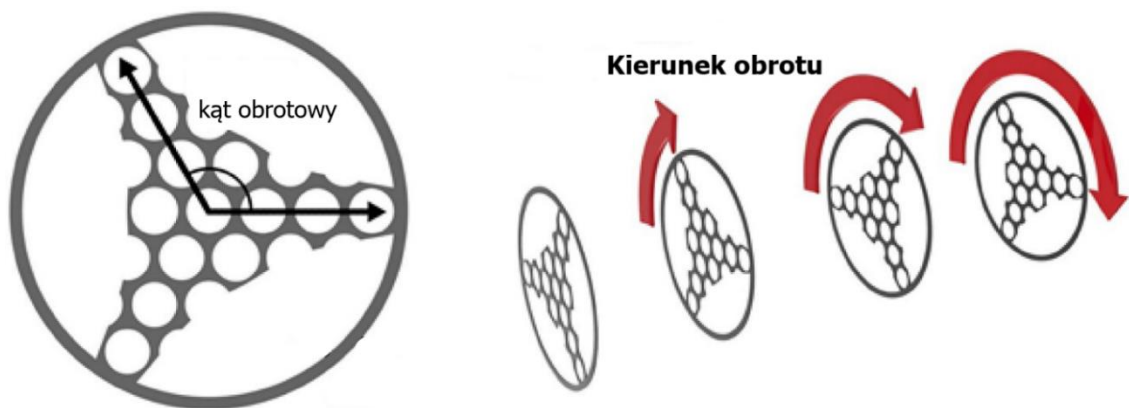
Rys. 2.5. Przegroda płytowa, wg [10]

Inną alternatywę dla przegród segmentowych mogą stanowić zaproponowane w pracy [11] przegrody dyskowe oraz segmentowo-dyskowe, których modele trójwymiarowe przedstawiono na rys. 2.6.

Z kolei w pracy [2] zaproponowano oraz dokonano próby optymalizacji wymiennika ciepła z zastosowaniem przegród trójstrefowych, których strukturę przedstawiono na rys. 2.7. W wyniku przeprowadzonych analiz ustalono, że ich stosowanie pozwala na zmniejszenie oporów przepływu o 49% w stosunku do typowych przegród segmentowych, a dodatkowo skutkuje znaczącym zwiększeniem mocy cieplnej wymiennika ciepła. Co więcej, trójstrefowa konstrukcja przegród wpływa również na zmniejszenie wibracji wywoływanych przepływem płynów w przestrzeni międzyrurowej wymiennika.



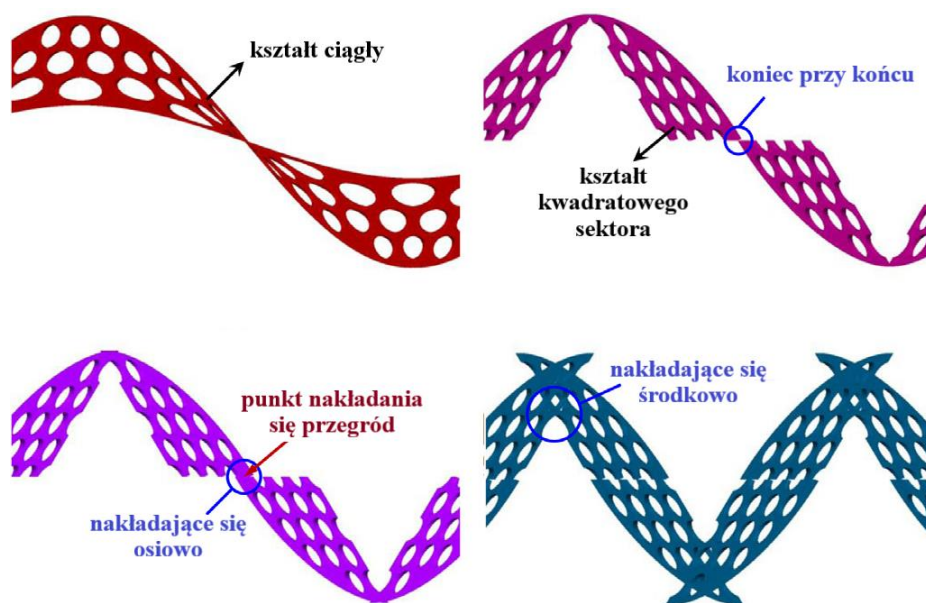
Rys. 2.6. Płaszczyznowo-rurowy wymiennik ciepła z przegrodami, wg [11]:
a) segmentowo-dyskowymi, b) dyskowymi



Rys. 2.7. Przekrój aparatu z poprzeczną przegrodą trójstrefową, wg [2]

Dużym postępem w zwiększeniu sprawności wymienników ciepła okazało się wykorzystanie przegród w kształcie helisy. Jak podaje wiele źródeł, m.in. [9], [12–18] pionierem w tym zakresie byli Lutcha i Nemcansky. Wyniki ich badań zostały opublikowane w pracy [19], a na ich podstawie powstał patent opracowany przez ABB Lummus Global Inc. [20]. Kolejni badacze prowadzili prace nad ulepszeniem tego typu przegrody. W ten sposób powstały różne warianty przegród w kształcie helisy, wśród których można wyróżnić m. in. przegrody ciągłe [21], kombinowane [22], trójdzielne [23], czy w kształcie sekstantu [13]. Na rys. 2.8. zilustrowano przegrody ciągłe i kombinowane o różnym stopniu nakładania się.

Literatura przedmiotu zawiera wiele pozycji poświęconych badaniom nad optymalnym kątem przegród helikalnych. Autorzy pracy [19] wykazali, że najbardziej korzystny kąt nachylenia nieciągłych przegród helikalnych jest równy 40° .



Rys. 2.8. Modele geometryczne przegród o kształcie helisy, wg [18]

Z kolei w pracy [24] przedstawiono wyniki przemysłowych pomiarów przeprowadzonych w zakładzie petrochemicznym, dotyczących zastąpienia przegród segmentowych nieciągłymi przegradami helikalnymi o kącie helisy równym 40° częściowo na siebie zachodzącymi (rys. 2.9.).



Rys. 2.9. Konstrukcja wymiennika ciepła z przegradami helikalnymi wg [24]

Wykazano, że zmodyfikowany wymiennik osiągał lepszą wydajność ogólną, definiowaną zgodnie z równaniem (1.1), przy czym współczynnik przenikania ciepła był o 15-57% niższy, niż w przypadku wcześniej stosowanego wymiennika z przegradami segmentowymi przy zachowaniu takich samych warunków przepływu. Podobne rezultaty przedstawiono w pracy [9].

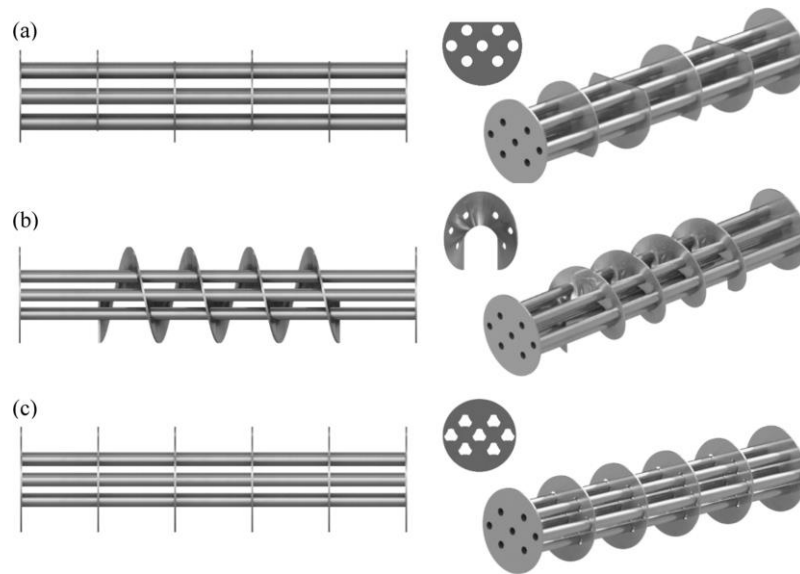
Autorzy pracy [14] przytoczyli zawarte w [25] wyniki badań nad stosowaniem przegród helikalnych o pięciu różnych kątach nachylenia w zakresie od 20° do 32° oraz

przegród segmentowych, wskazując, iż przy zastosowaniu przegród o kącie 20° osiągnięto zarówno lepszy współczynnik przenikania ciepła, jak i WWCH (1.1) w porównaniu do pozostałych przegród. Z kolei praca [14] poświęcona jest badaniom nad optymalnym (pod względem wydajności) kątem nachylenia przegród helikalnych w zakresie od 12° do 28° . Wykazano, że przegrody o kącie nachylenia 12° i 16° pozwalają na osiągnięcie zarówno najwyższego współczynnika przenikania ciepła, jak i WWCH (1.1) spośród rozpatrywanych wariantów. W pracy [26] wykazano, że przegrody helikalne o kącie spirali w zakresie 25° generują niemal 90% niższe opory, niż typowe przegrody segmentowe, przy zachowaniu takich samych warunków przepływu. Z kolei autorzy pracy [27] na podstawie eksperymentów przeprowadzonych na wymiennikach ciepła wyposażonych w przegrody helikalne o kącie nachylenia 7° , 13° oraz 25° , a także z przegrodami segmentowymi dowiedli, że szybkość wymiany ciepła i opory przepływu są największe w przypadku przegród helikalnych o kącie nachylenia 7° , a towarzyszy temu najmniejsza wartość WWCH (1.1). Natomiast autorzy pracy [12] wykazali, że wartość tego współczynnika dla wymiennika z przegrodami helikalnymi o kącie helisy równym 20° wzrasta o $69,0 \div 84,5\%$ w porównaniu do wymiennika z przegrodami segmentowymi.

Autorzy pracy [28] podjęli próbę oceny wpływu odstępu pomiędzy przegrodami helikalnymi o kącie nachylenia 40° na wydajność wymiennika ciepła. W wyniku przeprowadzonych badań okazało się, że istotne znaczenie ma nie tylko kąt nachylenia przegród, ale także sposób ich rozmieszczenia. Wykazano, że im mniejsze są odstępy między przegrodami, tym większe są straty ciśnienia płynu. Z kolei zwiększeniu odstępów towarzyszy zmniejszenie wartości współczynnika przenikania ciepła.

Literatura przedmiotu zawiera też liczne prace, w których proponowane są inne rozwiązania konstrukcyjne przegród helikalnych i segmentowych. Autorzy [29] na drodze numerycznej porównali wydajność cieplno-hydrauliczną wymiennika dla trzech typów przegród (rys. 2.10.): helikalnych, segmentowych oraz przegród o „trójlistnym” otworze na rurki, które są stosunkowo nowym rozwiązaniem stosowanym głównie w układach energetyki jądrowej. W rozwiązaniu konstrukcyjnym przegród o „trójlistnym” otworze na rurki płyn przepływa wzdłużnie przez wolne przestrzenie pomiędzy krawędziami otworów a ściankami rurek. W porównaniu do konwencjonalnych wymienników płaszczowo-rurowych z przegrodami segmentowymi, przegrody te w dobrym stopniu zwiększają wydajność cieplną wymiennika,

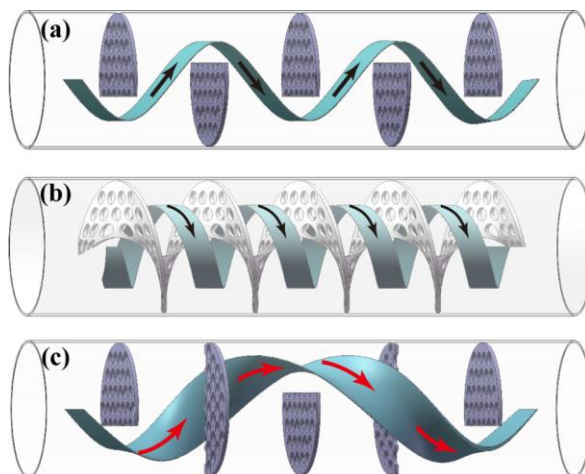
a jednocześnie są mniej podatne na zanieczyszczenie, eliminują tzw. „martwe strefy” recyrkulacji i zapobiegają drganiom wywołanym przepływem.



Rys. 2.10. Modele wiązek rur wymiennika z różnymi przegrodami, wg [29]
a) segmentowymi, b) helikalnymi ciągłymi, c) z otworami „trójlistnymi”

W pracy [29] wykazano też, że największą wydajność cieplno-hydrauliczną osiągnięto przy zastosowaniu przegród o kształcie helisy. Ustalono, że rozkład prędkości elementów płynu w przypadku tych przegród jest bardziej równomierny i jednorodny, niż dla przegród segmentowych i o otworach „trójlistnych”. Z kolei stosowanie tych ostatnich znacząco zwiększa strumień wymienianego ciepła, lecz kosztem dużych strat ciśnienia płynu.

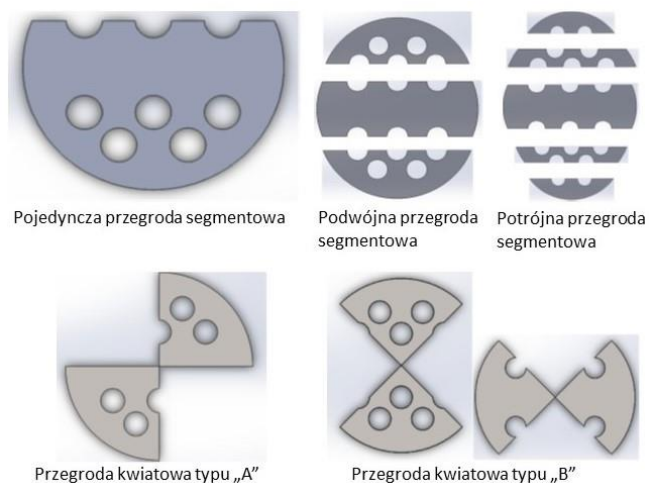
Autorzy pracy [16] opracowali taką konfigurację przegród segmentowych, która pozwala na uzyskanie przepływu spiralnego, zbliżonego do przepływu występującego przy zastosowaniu przegród helikalnych. Jest to o tyle istotne, że zarówno wytwarzanie, jak i montaż przegród helikalnych jest bardziej skomplikowany i kosztowny. Na rys. 2.11. przedstawiono porównanie kierunku przepływu płynu przy zastosowaniu przegród segmentowych, o kształcie helisy oraz nowej konfiguracji przegród tworzonej przez przegrody segmentowe, które kolejno są względem siebie obrócone o stały kąt w ustalonym kierunku zgodnym lub przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Jak widać, tak ustalona konfiguracja przegród segmentowych wywołuje przepływ płynu zbliżony do przepływu indukowanego przez przegrody o kształcie helisy.



Rys. 2.11. Kierunek przepływu płynu w wymienniku z przegrodami, wg [16]
 a) segmentowymi, b) o kształcie helisy, c) segmentowymi w układzie obróconym,

W rezultacie wykazano, że wymiennik, w którym zastosowano konfigurację obróconych przegród segmentowych, uzyskuje niższą wartość współczynnika przenikania ciepła niż w przypadku przegród o kształcie helisy, a nawet segmentowych przy takim samym masowym strumieniu przepływu płynu. Jednak jednocześnie związany jest z tym znaczący spadek zapotrzebowania energii na tłoczenie płynu, co ostatecznie sprawia, że stosowanie konfiguracji obróconych przegród segmentowych jest rozwiązaniem najbardziej korzystnym spośród rozpatrywanych.

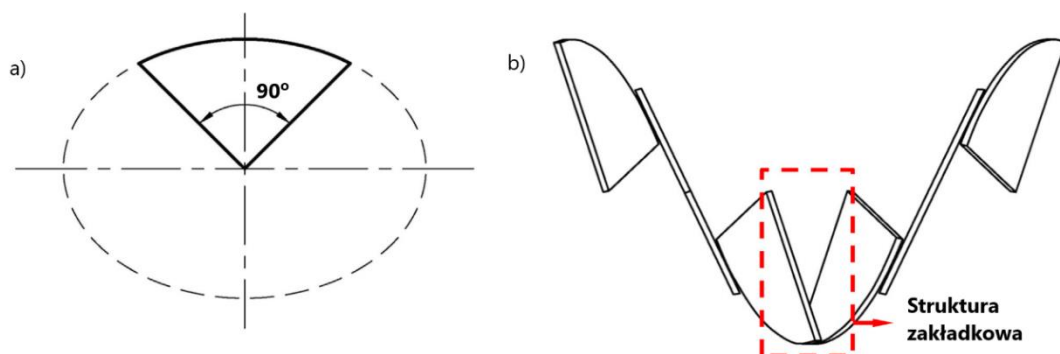
W pracy [30] porównano różne konfiguracje geometryczne przegród segmentowych, przedstawionych na rys. 2.8. oraz przegrody o kształcie helisy pod względem wydajności cieplno-hydraulicznej wymiennika. Na rys. 2.12. pokazano konfiguracje geometryczne rozpatrywanych przegród segmentowych, wśród których znalazła się pojedyncza, podwójna i potrójna przegroda segmentowa oraz przegroda kwiatowa typu „A” i typu „B”.



Rys. 2.12. Różne konfiguracje geometryczne przegród segmentowych, wg [30]

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych ustalono, że przegrody kwiatowe są najbardziej efektywne spośród rozpatrywanych wariantów, gdyż redukują straty ciśnienia o 25-35%, czemu towarzyszy jednak zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła o 30-35%, w porównaniu do pojedynczych przegród segmentowych. Wprawdzie, w porównaniu do pojedynczych przegród segmentowych przegrody o kształcie helisy redukują straty ciśnienia o 30-35%, ale jednocześnie towarzyszy temu zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła o 40%.

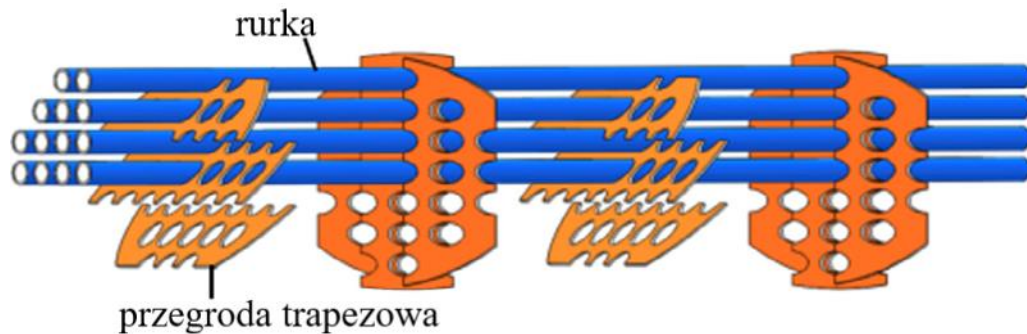
Autorzy pracy [18] w sposób numeryczny porównali osiem typów przegród helikalnych różniących się parametrami geometrycznymi i konstrukcyjnymi. Ich celem było ustalenie, który wariant spośród rozpatrywanych ma korzystny lub niekorzystny wpływ na wymianę ciepła i zachowanie się strugi przepływającego płynu. Wśród badanych przegród znalazły się przegrody helikalne: ciągłe, w kształcie ćwierci koła ułożonych w sposób ciągły, gdy przy końcu jednej przegrody ułożona jest kolejna i ułożone w sposób osiowo zachodzący na siebie o różnym stopniu nakładania się w zakresie od 10% do 50% oraz o kształcie sekstantu, którego geometrię przedstawiono na rys. 2.13.



Rys. 2.13. Schemat geometrii przegród helikalnych w kształcie sekstantu ,wg [13]:
a) kształt, b) rozmieszczenie,

W rezultacie ustalono, iż przegrody w kształcie sekstantu pozwalają na osiągnięcie najwyższej wydajności cieplno-hydraulicznej aparatu, podczas gdy najniższą jego wartość uzyskano w przypadku przegród ciągłych. Autorzy wskazują również, że duży stosunek zachodzenia na siebie przegród w kształcie ćwierci koła jest korzystny dla poprawy wymiany ciepła, lecz wywołuje jednocześnie duże straty ciśnienia, co również skutkuje niską wartością WWCH.

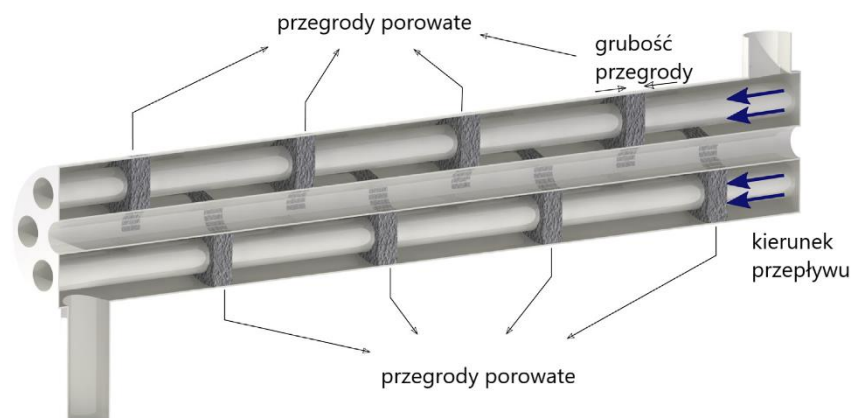
Kolejnym innowacyjnym rozwiązaniem konstrukcyjnym przegród stosowanych w płaszczowo-rurowych wymiennikach ciepła są przegrody trapezowe (rys. 2.14.), które zaproponowano m. in. w pracy [17].



Rys. 2.14. Przegrody trapezowe płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła, wg [17]

Wzajemnie prostopadle rozmieszczone dwie grupy przegród trapezowych składających się z dwóch wzajemnie równoległe usytuowanych przegród stanowią łącznie układ, który powielony wzdłuż rurek wymiennika pozwala na uzyskanie promieniowego i osiowego, okresowo zmiennego sposobu przepływu płynu w przestrzeni międzyrurowej. To z kolei pozwala na znaczące zwiększenie wymiany ciepła i zredukowanie oporów przepływu. Dla tego rodzaju wymienników zaleca się, aby kąt nachylenia przegrody wynosił od 30° do 45° , odstęp między przegrodami nie był większy niż 150 mm, a szerokość przegrody wynosiła około 90 mm.

Niedawno ukazały się prace, m. in. [31–33], w których zaproponowano nowatorskie, a jednocześnie niekonwencjonalne rozwiązanie konstrukcyjne przegród wymiennika ciepła, gdyż są one wykonane z porowatej piany metalowej. Na rys. 2.15. przedstawiono przykładową ilustrację wymiennika ciepła z przegrodami wykonanymi z piany metalowej.



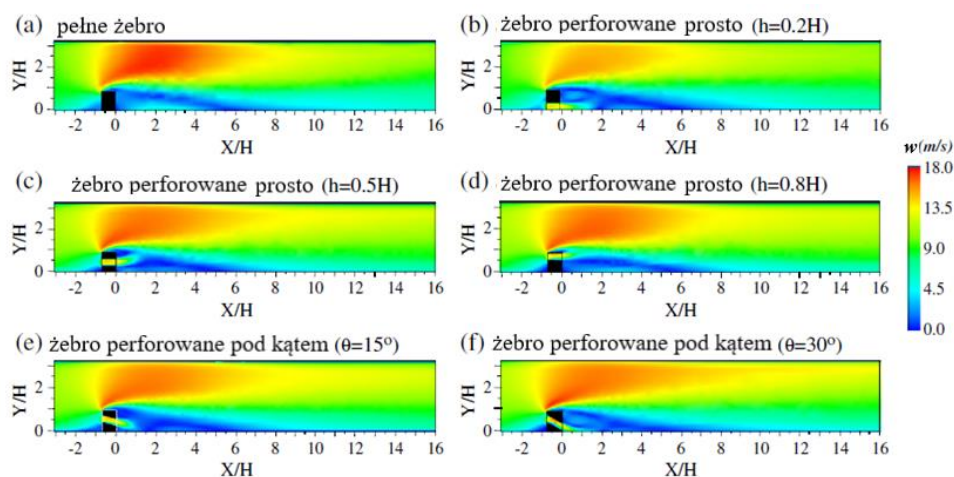
Rys. 2.15. Wymiennik ciepła z przegrodami wykonanymi z piany metalowej, wg [33]

W rezultacie przeprowadzonych badań wykazano, że przegrody tego typu znacząco podnoszą wydajność wymiennika ciepła, zwiększając ilość wymienianego ciepła, przy jednoczesnej redukcji strat ciśnienia. Tym samym stanowią najlepsze pod względem wydajności cieplno-hydraulicznej rozwiązanie spośród wszystkich zaproponowanych dotychczas w literaturze przedmiotu.

2.3. Wykorzystanie rur ożebrowanych

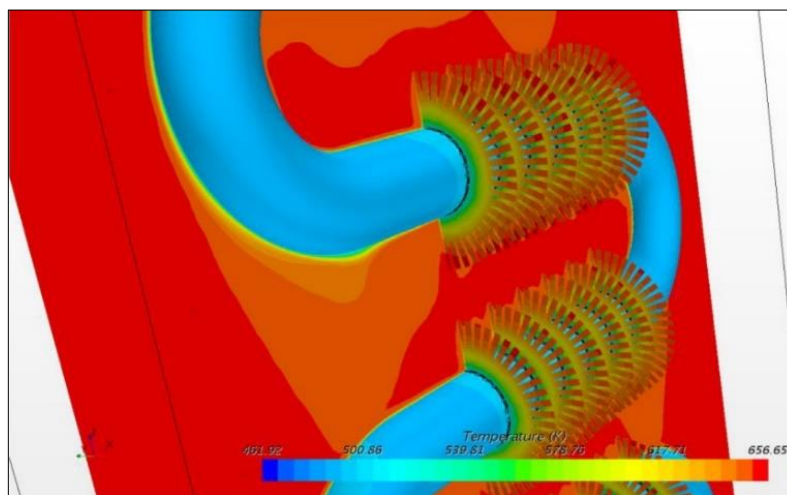
Innym powszechnie stosowanym sposobem podnoszenia wydajności wymienników ciepła jest wykorzystanie rur ożebrowanych. Również w tym zakresie prowadzone są intensywne prace badawcze, mające na celu udoskonalenie tego rozwiązania. Żebra dzieli się na dwa podstawowe typy: żebra porzeczne, wśród których można wyróżnić zewnętrzne (najbardziej powszechne) i wewnętrzne oraz żebra wzdlużne. Mechanizm zwiększenia wymiany ciepła przy zastosowaniu rur ożebrowanych wynika z wywołania silnego przepływu ścinającego na powierzchni każdego żebra, co skutkuje efektywnym zakłóceniem termicznej warstwy przyściennej, a tym samym usprawnia proces wymiany ciepła [34]. Dodatkowo, żebra stanowią rozwinięcie powierzchni wymiany ciepła, gdyż są trwale połączone ze ścianką rurek lub stanowią ich integralną część [35].

Charakterystyka geometryczna żeber, czyli ich kształt, rozmiar, położenie a także rozmieszczenie, ma istotny wpływ na wydajność wymienników z rurami ożebrowanymi [36]. Główną wadą stosowania standardowych litych żeber jest powstawanie na skutek separacji i recyrkulacji przepływu tzw. gorących punktów (ang. *hot spot*) tuż za żebrem, co prowadzi do pogorszenia wymiany ciepła w tym obszarze. Zaproponowane, m.in. w pracach [34] i [37] żebra perforowane są jednym ze sposobów pozwalających na usunięcie tego defektu. Jak wynika z rozkładu prędkości dla różnych geometrii żeber (rys. 2.16.), stanowiącego wyniki autorów pracy [34], rozmiar i lokalizacja obszarów recyrkulacji są znacząco uzależnione od geometrii żebra. Jego perforacja pod kątem prostym nieznacznie wpływa na poprawę wymiany ciepła, podczas gdy żebra perforowane pod kątem 30° pozwalają na zauważalne polepszenie wymiany ciepła bezpośrednio za żebrami, co skutkuje znacznym wzrostem wydajności wymiennika.



Rys. 2.16. Kontur prędkości dla różnych geometrii żeber, wg [34]

Inną alternatywę dla typowych poprzecznych żeber zewnętrznych stanowią zaproponowane w pracy [38] żebra ząbkowane, które zilustrowano na rys. 2.17.

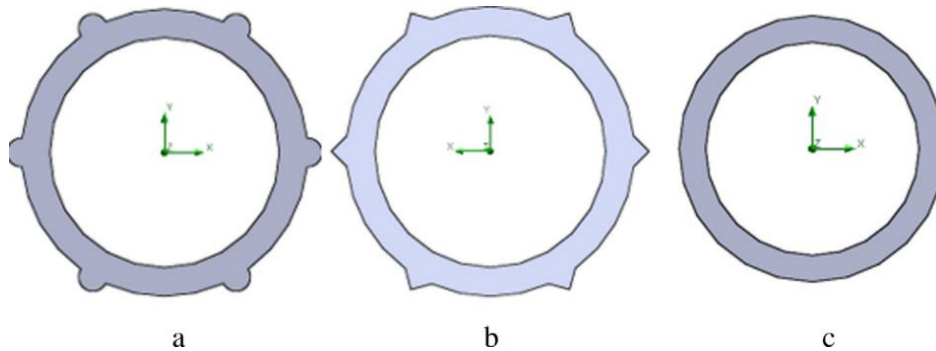


Rys. 2.17. Rozkład temperatur przy zastosowaniu żeber ząbkowanych, wg [38]

Analiza numeryczna przeprowadzona w pracy [38] pokazuje korzystny wpływ stosowania takich żeber na poprawę wymiany ciepła, co wynika głównie z faktu, że przerywana struktura żeber potęguje mieszanie płynu, co pozwala na poprawę wymiany ciepła.

W pracy [11] badano wpływ obecności oraz kształtu żeber wzdłużnych na ciepło-hydrauliczną wydajność płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła. W tym celu na drodze obliczeń numerycznych porównano rurki z ożebrowaniem wzdłużnym o okrągłym i trójkątnym kształcie żeber z rurką gładką, jak pokazano na rys. 2.18. W rezultacie wykazano, że żebra wzdłużne o kształcie trójkątnym korzystniej wpływają na intensyfikację ruchu ciepła niż o kształcie okrągłym. Generują przy tym spadek ciśnienia na podobnym poziomie, co sprawia, że rurki ożebrowane wzdłużnie żebrami

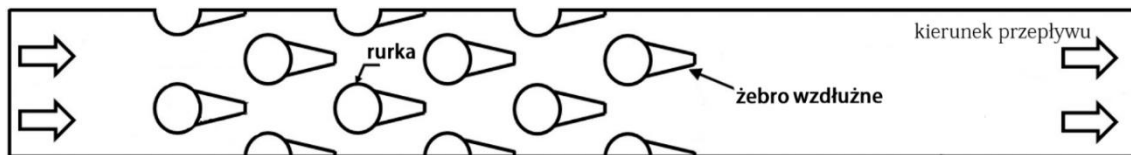
o kształcie trójkątnym stanowią jedno z dobrych rozwiązań podnoszących wydajność cieplno-hydrauliczną płaszczowo-rurowych wymienników ciepła.



Rys. 2.18. Przekrój poprzeczny rurek rozpatrywanych w pracy [11]:

a) z zewnętrznym wzdłużnym ożebrowaniem okrągłym; b) z zewnętrznym wzdłużnym ożebrowaniem trójkątnym; c) bez ożebrowania

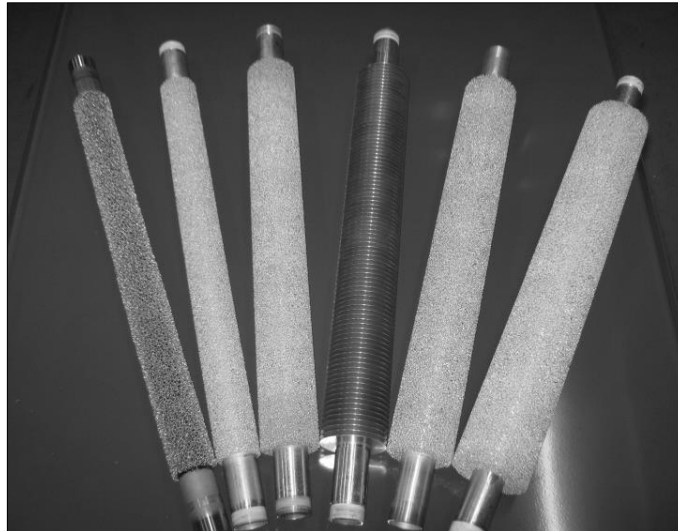
Z kolei w pracy [35] zaproponowano rurki ożebrowane wzdłużnie żebrami o kształcie stożkowym, które umieszczone zostały na tylnej powierzchni rury zgodnie z kierunkiem przepływu płynu w przestrzeni międzyrurowej; jak pokazano na rys. 2.19.



Rys. 2.19. Rurki jednostronnie ożebrowane wzdłużne żebrami o kształcie stożkowym, wg [35]

Okazało się, że takie rozwiązanie pozwala na zwiększenie efektywnej powierzchni konwekcyjnego przenoszenia ciepła, zwiększając tym samym szybkość jego wymiany. Dodatkowo ograniczona zostaje ilość wirów za rurką, zmniejszając w ten sposób opór przepływu płynu, co sumarycznie prowadzi do zwiększenia WWCH aparatu.

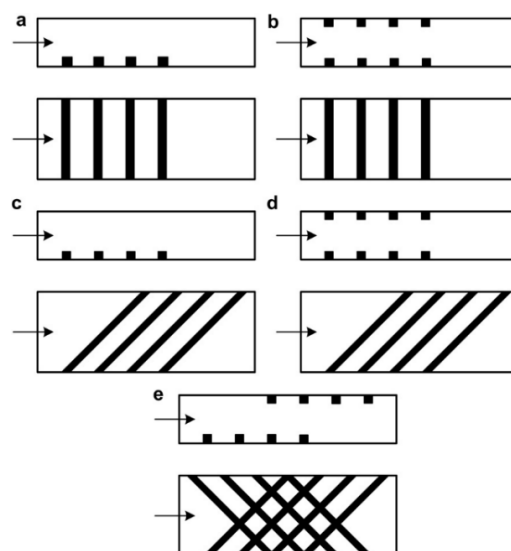
Z kolei w pracy [31] przedstawiono porównanie efektów wykorzystania rurek nieożebrowanych oraz wyposażonych w klasyczne żebra z rurkami, w których rolę żebra pełniła warstwa piany metalowej. Ich przykładową fotografię przedstawiono na rys. 2.20. Wykazano, że zarówno wymiennik z rurkami ożebrowanymi poprzecznie, jak i wzdłużnie ponad dwukrotnie szybciej wymienia ciepło niż aparat z rurkami bez ożebrowania, przy podobnym poziomie strat ciśnienia tłoczonych płynów. Obliczono, że stosowanie żeber poprzecznych lub wzdłużnych wykonanych z piany metalowej może zwiększyć ilość wymienionego ciepła od 102,87% do 121,06% przy maksymalnym wzroście strat ciśnienia o 8,1%, w porównaniu do rur bez ożebrowania.



Rys. 2.20. Różne warianty rurek ożebrowanych pianą metalową i rurka ożebrowaną poprzecznie, wg [39]

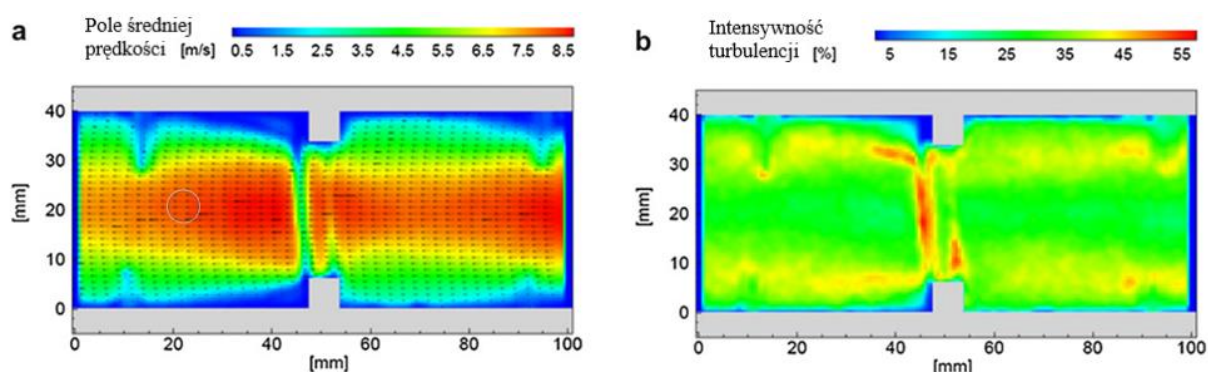
Wyniki przedstawionych w pracy [31] badań i obliczeń dowodzą, że żebra wykonane z piany metalowej mogą zwiększać wydajność cieplno-hydrauliczną wymienników ciepła. Jej autorzy tłumaczą ten efekt specyficzną strukturą żeber porowatych charakteryzującą się dużą powierzchnią właściwą zakłócającą laminarny przepływ płynu w warstwie przyściennej.

W pracy [36] przedstawiono wyniki badań wpływu rozmieszczenia żeber wewnętrznych w prostokątnym kanale aerodynamicznym na intensywność wymiany ciepła oraz straty ciśnienia. W tym celu porównano wartości liczby Nusselta i współczynnika tarcia mierzonych dla tworzonych przez żebra wewnętrzne pięciu typów generatorów wirów poprzecznych, schematycznie zilustrowanych na rys. 2.21.



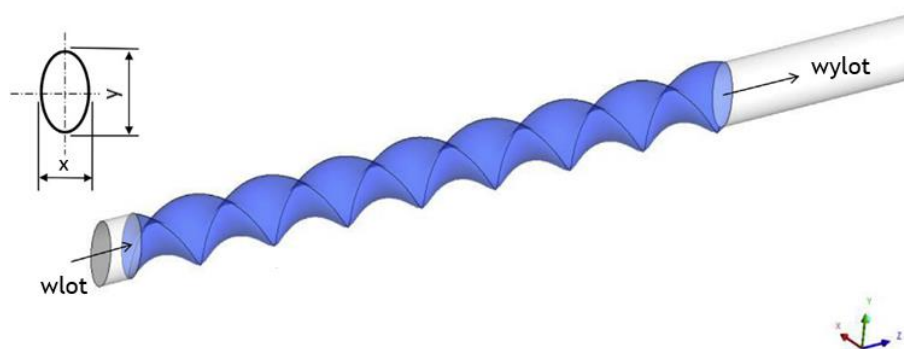
Rys. 2.21. Rozmieszczenie żeber wewnętrznych kanału aerodynamicznego, wg [36]:
 a) poprzecznie jednostronne, b) poprzecznie dwustronne, c) pod kątem 45° jednostronne, d) pod kątem 45° dwustronne, e) krzyżowo pod kątem 45°

W wyniku przeprowadzonych analiz wykazano, że jednostronne rozmieszczenie żeber pod kątem 45° skutkuje podobną, jak dla kanału nieożebrowanego, intensywnością wymiany ciepła i stratami ciśnienia, podczas gdy poprzecznie dwustronne rozmieszczenie żeber pozwala na znaczne zwiększenie intensywności wymiany ciepła. Jednak wtedy związane jest to z równie wysokim wzrostem oporów przepływu. Autorzy pracy [36] wykazali, że obecne w kanale żebra wewnętrzne intensyfikują konwekcyjny ruch ciepła, co wynika ze zwiększenia turbulencji przepływu poprzez generowanie wirów poprzecznych (rys. 2.22.). Dlatego też rozmieszczenie żeber ma szczególnie istotny wpływ na wydajność cieplno-hydrauliczną wymiennika.



Rys. 2.22. Pole średniej prędkości (a) i intensywność turbulencji (b) dla rozmieszczenia żeber wg rys. 2.21.b), wg [36]

Podobne efekty działania dotyczą rur, których przekrój poprzeczny oraz powierzchnia są zniekształcone. Przykładem może być przedstawiona w pracy [40] skrzywiona rura eliptyczna pokazana na rys. 2.23.



Rys. 2.23. Model fizyczny skrzywionej rury eliptycznej, wg [40]

W pracy [40] na drodze numerycznej porównano pod względem wydajności cieplno-hydraulicznej skrzywioną rurę eliptyczną o różnym stopniu skrzywienia z prostą (nieskrzywioną) rurą eliptyczną. W wyniku tych badań wykazano, że stopień skrzywienia rury eliptycznej wpływa na jej wydajność cieplno-hydrauliczną. Ustalono również, iż rura eliptyczna, której długość skrzywienia wynosiła 128 mm, odznaczała się nieznacznie

wyższą wydajnością cieplno-hydrauliczną od rury nieskręconej, osiągając WWCH na poziomie 2% większym.

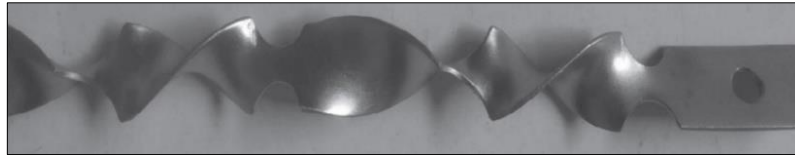
2.4. Wykorzystanie turbulizatorów przepływu

Generatorami wirów, nazywanych też turbulizatorami przepływu, są umieszczone we wnętrzu rurki wkładki, zwykle w postaci skręconej taśmy. Zasada ich działania polega na wytwarzaniu pola sił odśrodkowych wywołujących mieszanie płynu w kierunku od ściany do środka kanału. Jak wskazują autorzy prac [41–44], zmniejsza to grubość laminarnej warstwy przyściennej, a tym samym wpływa na zwiększenie współczynnika przenikania ciepła, jednak kosztem zwiększonych strat ciśnienia. W literaturze przedmiotu dostępnych jest wiele prac poświęconych różnym modyfikacjom konstrukcyjnym taśm skręconych oraz nowym, niekonwencjonalnym rozwiązaniom konstrukcyjnym turbulizatorów. Ich autorzy dążą do poprawy wymiany ciepła przy możliwie niskich stratach ciśnienia, spełniając tym samym warunki zrównoważonego rozwoju.

W pracy [45] zaproponowano modyfikację taśmy skręconej, która polegała na jej nacięciu w kształcie litery „V”. Porównano taśmę skręconą naciętą z gładką (nienaciętą), a także wpływ współczynnika skrętu oraz głębokości i szerokości nacięcia na wymianę ciepła i opory przepływu. Wyniki przeprowadzonych badań i analiz wykazały, że nacięta skręcona taśma, mimo zwiększenia oporów przepływu, zapewnia wyższy współczynnik przenikania ciepła oraz WWCH, niż skręcona taśma gładka. Zauważono również, że głębokość nacięcia taśmy ma większe znaczenie niż szerokość jej nacięcia.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów strat ciśnienia podczas przepływu wody w rurach zawierających układ wielu identycznych, równomiernie rozmieszczonych, fizycznie oddzielonych krótkich taśm skręconych autorzy pracy [41] dowiedli, że stosowanie zaproponowanej alternatywy dla taśmy skręconej o maksymalnej długości (względem możliwego wypełnienia rury) może zwiększyć intensywność wymiany ciepła przy stratach ciśnienia niższych przynajmniej o 50%.

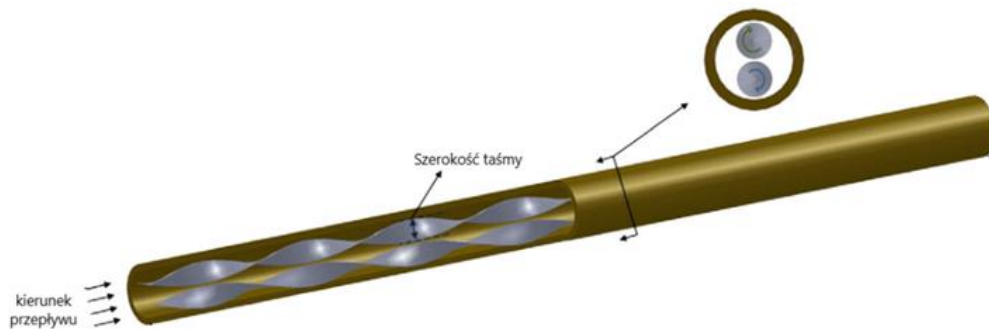
Inną odmianą turbulizatora jest zaproponowana w pracy [42] taśma naprzemiennie skręcona w kierunku zgodnym i przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, której zdjęcie przedstawiono na rys. 2.24.



Rys. 2.24. Taśma skręcona naprzemiennie w kierunku zgodnym i przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, wg [42]

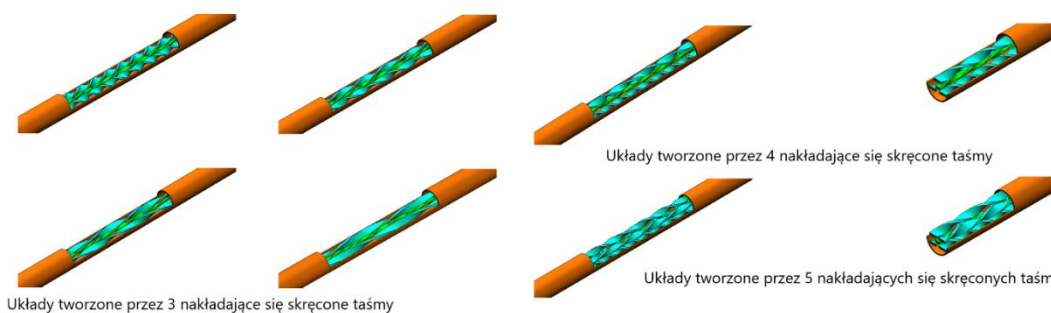
W wyniku przeprowadzonych badań i analiz autorzy [42] wykazali, że zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne turbulizatora stanowi bardzo dobrą alternatywę dla typowej taśmy skręconej. Osiągnięto wyższy WWCH układu wynoszący 1,42, chociaż towarzyszył temu wzrost oporów przepływu o od 2,42 do 4,95 razy, w porównaniu do pustej rury.

Z kolei autorzy pracy [44] zaproponowali turbulizator składający się z dwóch przeciwnie skręconych taśm, których ilustrację przedstawiono na rys. 2.25. Podwójna skręcona taśma zapewniała znaczną poprawę wymiany ciepła, a także wydajności cieplno-hydraulicznej sięgającej do 1,34 w porównaniu z wartościami dla pustej rury.



Rys. 2.25. Podwójna przeciwnie skręcona taśma, wg [44]

W pracy [46] badano wpływ współczynnika pokrywania się skrętów i liczby taśm dla różnych kombinacji nakładających się wielu taśm skręconych na przenoszenie ciepła i charakterystykę przepływu. Do badań wykorzystano małe i duże taśmy umieszczone w rurze w różnych układach, takich jak trzy skręcone taśmy, cztery skręcone taśmy i pięć skręconych taśm, co pokazano na rys. 2.26.



Rys. 2.26. Układy nakładających się wielu skręconych taśm umieszczonych w rurze, wg [46]

Wykazano, że zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne turbulizatorów zapewnia ponadprzeciętną szybkość wymiany ciepła, o czym może świadczyć stosunek uzyskanej liczby Nusselta dla układu tworzonych przez pięć skręconych taśm do liczby Nusselta dla pustej rury. Jego wartość była równa niemal 2. Zwiększoną wymianę ciepła tłumaczono powstawaniem wielu przepływów wirowych usprawniających mieszanie oraz zwiększających strumień ciepła przenieszonego w warstwie przyściennej. Ustalono, że wraz ze wzrostem liczby taśm, zwiększa się szybkość wymiany ciepła, natomiast najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie układu tworzonych przez 3 taśmy o najwyższym współczynniku skrętu.

Z kolei autorzy pracy [43] zaproponowali zastosowanie turbulizatora w formie dwóch zwiniętych taśm umieszczonych w spiralnie ożebrowanej wewnętrznie rurze, co przedstawiono na rys. 2.27.



Rys. 2.27. Dwie skręcone taśmy umieszczone w spiralnie ożebrowanej rurze, wg [43]

Z opisanych w pracy [43] badań wynika, że jednoczesne stosowanie turbulizatora w formie dwóch skręconych taśm i zniekształcenia powierzchni rury w formie jej spiralnego ożebrowania wewnętrznego pozwala na znaczną poprawę intensywności wymiany ciepła. Rozwiązanie to pozwoliło na osiągnięcie wartości WWCH powyżej 2,0 w stosunku do rury gładkiej i spiralnie ożebrowanej, ale bez turbulizatora.

Znane są również mniej powszechne rozwiązania konstrukcyjne turbulizatorów, zaproponowane m. in. w pracach [47–51].

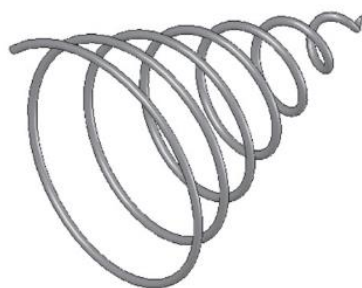
Autorzy pracy [47] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące wymiany ciepła i oporów przepływu powietrza w rurze wyposażonej we wkładki w kształcie diamentu o różnych parametrach geometrycznych, które, jak wynikało z wyników przeprowadzonych badań, mają wpływ zarówno na szybkość procesu wymiany ciepła, jak i na opory przepływu. Jednak, zaproponowane rozwiązanie pozwoliło na usprawnienie wymiany ciepła o niespełna 60% przy ponad 5-ciokrotnym zwiększeniu strat ciśnienia, co sprawia, że nie można uznać takiej formy turbulizatora za optymalny.

W pracy [48] na drodze numerycznej wykazano, że umieszczony w rurze spiralnie zwinięty drut, przedstawiony schematycznie na rys. 2.28., również wywołuje powstawanie wirów oraz przyspiesza przejście przepływu laminarnego w turbulentny.



Rys. 2.28. Spiralnie zwinięty drut turbulizujący przepływ w rurze, wg [48]

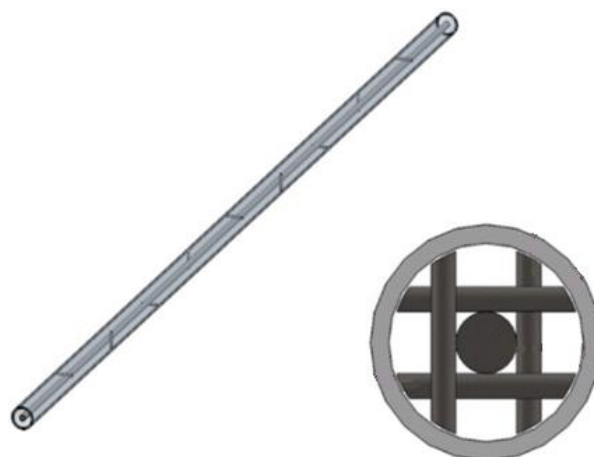
Z kolei w pracy [49] przedstawiono turbulizator w postaci stożkowej sprężyny, co schematycznie zilustrowano na rys. 2.29.



Rys. 2.29. Turbulizator w postaci sprężyny o kształcie stożka, wg [49]

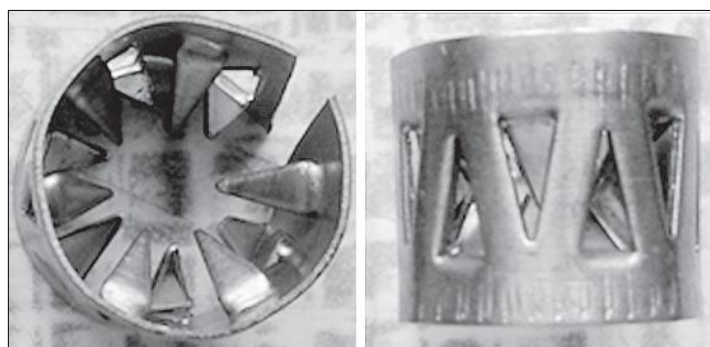
Autorzy pracy [50] podjęli próby optymalizacji parametrów geometrycznych i strukturalnych turbulizatorów o kształcie spiralnych wirników łopatkowych. Wykazali, że w zależności od kształtu przekroju poprzecznego oraz liczby łopatek, takie rozwiązanie konstrukcyjne turbulizatora pozwala uzyskać wydajność cieplno-hydrauliczną o ok. 1,5-2,2 razy lepszą w stosunku do pustej rury.

W pracy [4] przeprowadzono badania wydajności cieplno-hydraulicznej rekuperatora, w którym zastosowano różne konfiguracje turbulizatorów składających się z poprzecznych prętów podtrzymujących okrągły pręt umieszczony w rdzeniu rury, co schematycznie przedstawiono na rys. 2.30. Zaproponowane w pracy [4] rozwiązanie pozwoliło na zwiększenie wydajności cieplno-hydraulicznej o 180-215% w stosunku do pustej rury.



Rys. 2.30. Schemat turbulizatora złożonego z okrągłego pręta i podtrzymujących go poprzecznych przecików, wg [4]

Jako turbulizatory zwiększające sprawność wymiennika ciepła, autorzy pracy [52] zaproponowali z kolei wykorzystanie metalowych pierścieni Białeckiego, przedstawionych na rys. 2.31.



Rys. 2.31. Pierścienie Białeckiego, wg [52]

W wyniku przeprowadzonych badań i analiz wykazano, że podczas przepływu cieczy ich obecność w rurze powoduje 1,5-2-krotny wzrost wartości współczynnika przenikania ciepła oraz ok. 100-krotny wzrost strat ciśnienia w stosunku do jej przepływu w pustej rurze.

W pracy [51] w wyniku porównania efektów działania turbulizatorów w postaci taśm skręconych z wynikami dotyczącymi pierścieni Białeckiego (przedstawionymi w pracy [52]) ustalono, że pierścienie Białeckiego generują 10-25 razy większe opory przepływu w stosunku do taśm skręconych, podczas gdy te niewiele mniej (do 1,7 razy) usprawniają szybkość wymiany ciepła. Z tego względu wykorzystanie pierścieni Białeckiego do intensyfikacji ruchu ciepła w rekuperatorach płaszczowo-rurowych nie wydaje się rozwiązaniem korzystnym.

3. Piana metalowa i jej cechy

3.1. Ogólna charakterystyka materiału

Piany metalowe, a właściwie metale komórkowe są materiałami porowatymi. Ich przestrzenny szkielet, tworzący osnowę dla porów (puste przestrzenie), wykonany jest z metalu. Pory mają formę zwartych wielościennych brył o rozmiarze nawet o rząd większym od rozmiarów poprzecznych szkieletu. Zapewnia to pianom bardzo wysoką porowatość i niską gęstość. [53]

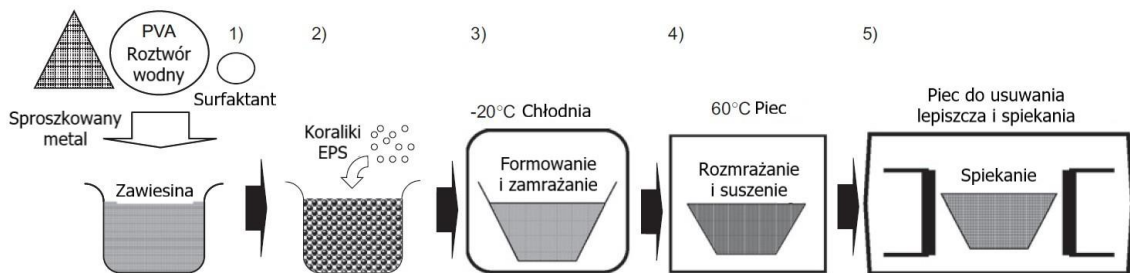
Jak wskazano w pracy [54], istnieje wiele sposobów wytwarzania metali komórkowych. Niektóre metody są podobne do technik wykorzystywanych podczas spieniania roztworów wodnych lub cieczy polimerowych, a inne zaprojektowano uwzględniając charakterystyczne właściwości metali. Na rys. 3.1. zaprezentowano podział metod produkcji pian metalowych ze względu na stan skupienia metalu, z którego piana jest wytwarzana.



Rys. 3.1. Podział metod wytwarzania pian metalowych, wg [54]

Jednak jak podają autorzy pracy [55], sposoby wytwarzania pian metalowych dzieli się głównie na dwie grupy: metody rozprężania gazu (ang. *gas expansion method*) oraz metody wydrążonej sfery (ang. *hollow sphere methods*). Metody rozprężania gazu dzieli się z kolei ze względu na źródło i sposób doprowadzania gazu: (i) gaz jest uwalniany

z rozproszonych cząstek (np. H_2 z TiH_2); (ii) gaz jest wstrzykiwany do ciekłego metalu; (iii) uwięziony obojętny gaz generuje wysokie ciśnienie, które skutkuje jego rozproszeniem w objętości stopionego metalu. Natomiast wśród metod wydrążonej sfery wyróżnia się dwa sposoby wytwarzania pian metalowych, w których: (i) zawiesiny sproszkowanych tlenków lub hydratów metali są rozdmuchiwane na cienkościennie sfery a następnie spiekane; (ii) sproszkowany stop jest atomizowany – powietrze uwięzione w kroplach cieczy podczas spiekania rozszerza się. Z kolei w [56] wyróżniono opatentowaną przez autorów [57] metodę wytwarzania metali komórkowych (głównie stopów aluminium), która polega na zmieszaniu czynnika pieniającego ze stopionym metalem. Na uwagę zasługuje również opracowana przez badaczy [58] tania metoda wytwarzania wysokoporowatych pian metalowych. Proces ten oznaczany jako SWS (ang. *Space holders and Whipped Slurry*) jest kombinacją metody z wykorzystaniem wypełniacza przestrzeni oraz metody ubijanej zawiesiny, a jego przebieg składa się z pięciu kroków. Przedstawiono je w formie graficznej na rys. 3.2.



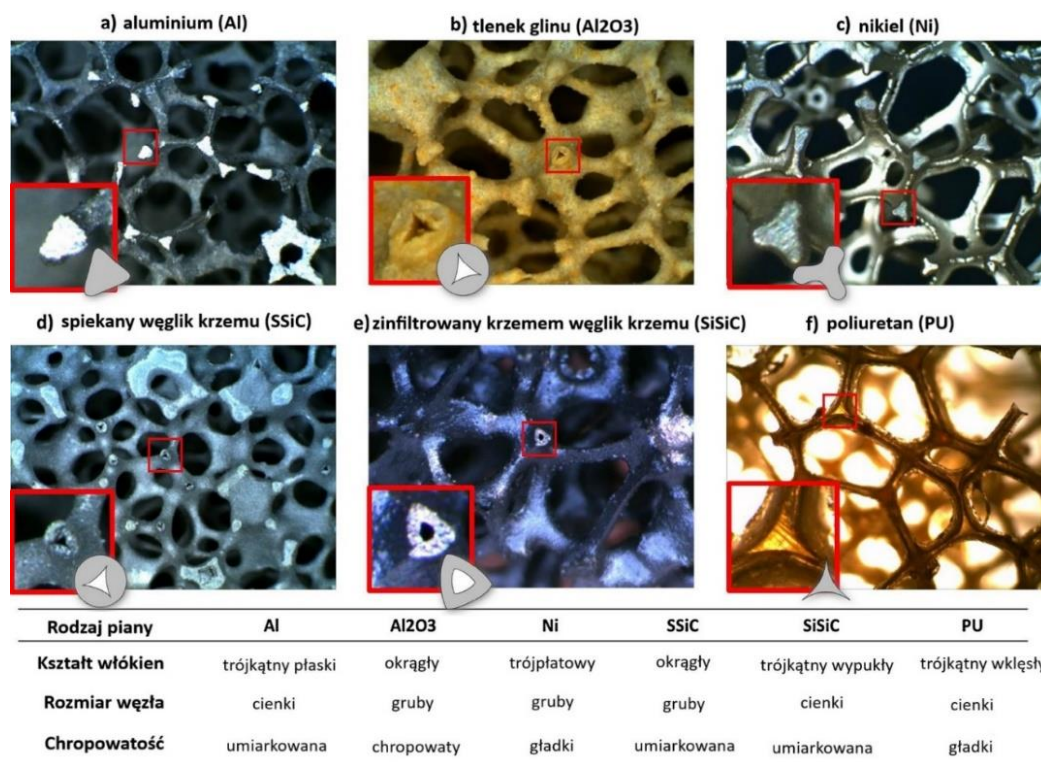
Rys. 3.2. Metoda SWS produkcji piany metalowej, wg [58]:

1) preparacja zawiesiny; 2) mieszanie zawiesiny z koralikami wypełniacza (EPS) i ubijanie; 3) formowanie i zamrażanie; 4) żelowanie zawiesiny i suszenie; 5) spiekanie;

Więcej informacji odnoszących się do technologii wytwarzania pian metalowych można znaleźć m. in. w pracach [54],[56],[59].

Piany wykonywane są z różnych metali. Najczęściej spotyka się piany aluminiowe, niklowe, miedziane, a także ze stali węglowej. Poza pianami metalowymi powszechnie stosowane są również piany ceramiczne, czy nawet poliuretanowe. W zależności od materiału, piany różnią się między sobą geometrią struktury materiału komórkowego, a głównie rozmiarem i kształtem włókien oraz węzłów. Autorzy pracy [60] na podstawie zdjęć mikroskopowych, przedstawionych na rys. 3.3., scharakteryzowali morfologię sześciu rodzajów pian. Porównując wyniki eksperymentów opisanych w pracach [62] i [63] uzasadnili, że różnice w otrzymanych wynikach odnoszących się do stopnia zatrzymania wody wynikają właśnie z różnic

morfologicznych pomiędzy różnymi rodzajami pian a także różną zwilżalnością ich powierzchni, zależną od właściwości materiału tworzącego strukturę piany.



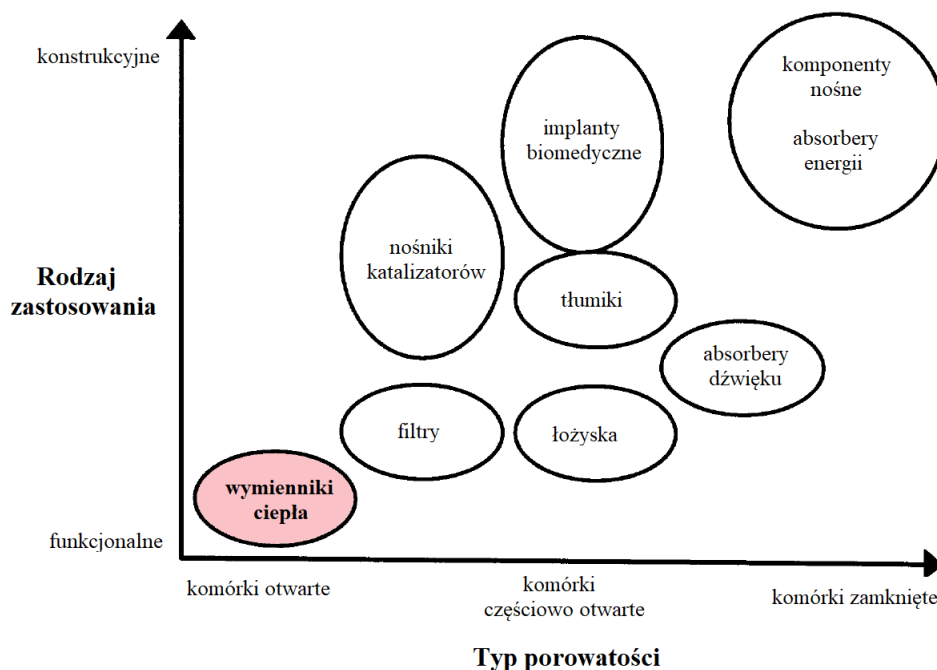
Rys. 3.3. Charakterystyka morfologiczna pian wykonanych z różnych materiałów, wg [60]

Jak wynika z przeprowadzonej analizy morfologicznej pian zawartej w [60], ich węzły różnią się nie tylko grubością, ale przede wszystkim kształtem, który zmienia się od okrągłego, poprzez trójkątny wypukły, trójkątny, trójkątny trójplątowy, kończąc na trójkątnym wklęsłym. Zatem piany o identycznej gęstości upakowania porów, lecz wykonane z różnych metali, różnią się rozmiarem porów i komórek oraz porowatością. Dodatkowo chropowatość powierzchni wpływa na jej zwilżalność, a wszystkie te czynniki rzutują na zjawiska związane z hydrodynamiką przepływu płynu przez takie struktury komórkowe.

Piany metalowe ze względu na strukturę dzieli się na dwa główne typy – o porach otwartych i zamkniętych.

Piany o otwartych porach odznaczają się wysoką porowatością przekraczającą 90%, mocno rozbudowaną powierzchnią właściwą mieszczącą się w zakresie od 400 do 1 500 m³/m², wysoką przepuszczalnością gazów oraz niską masą. Dodatkowo, dzięki krętym drogom przepływu doskonale mieszają płyny, a ich stosunkowo wysoka wytrzymałość i twardość zapewniająca stabilność strukturalną sprawia, że absorbują energię oraz dźwięk [63].

Istotną cechą metali komórkowych jest ich bardzo szeroki zakres stosowalności na co wskazuje autor pracy [55]. Na rys. 3.4. przedstawiono schematycznie obszary zastosowań pian metalowych w zależności od ich struktury.



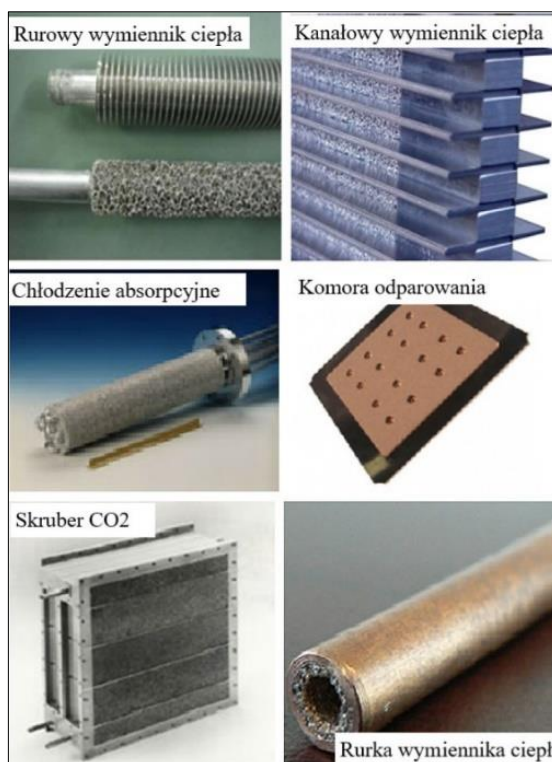
Rys. 3.4. Obszary zastosowań pian metalowych w zależności o ich struktury, wg [54]

Wyróżniono na nim zakres stosowalności pian metalowych istotnych z punktu widzenia niniejszej pracy. Metale komórkowe o porach otwartych dzięki takim cechom, jak wysoka przewodność cieplna i bardzo dobrze rozwinięta powierzchnia właściwa, a przy tym wysoka porowatość znajdują zastosowania w aparaturze procesowej do wymiany ciepła.

Fotografie przedstawione na rys. 3.5. prezentują aplikacje pian metalowych w aparaturze do wymiany ciepła. Najczęściej stanowią one wypełnienie rur lub przestrzeni międzypłytkowych wymienników ciepła zwiększając ich wydajność [54], [55], [64–66].

Z kolei autorzy [67] opisali efekty działań dotyczących zwiększenia wydajności procesu wrzenia w dużej objętości dzięki wykorzystaniu miedzianych struktur komórkowych.

Dzięki bardzo dużej powierzchni właściwej piany niklowe i ceramiczne wykorzystywane są w aparaturze procesowej również jako nośniki katalizatorów [68–71]. Zgodnie z wnioskami autorów pracy [72] oferują one lepiej rozwiniętą powierzchnię właściwą, niż złożę usypanych cząstek ceramicznych i generują dziesięciokrotnie mniejsze opory przepływu.

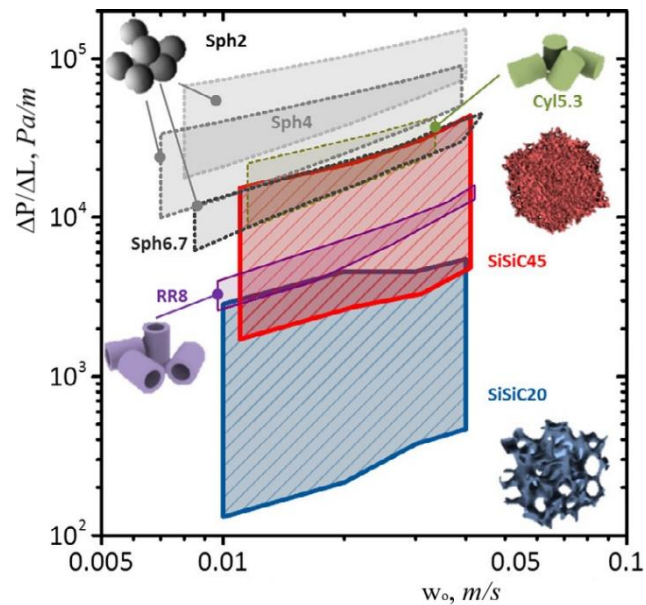


Rys. 3.5. Aplikacje pian metalowych w procesach wymiany ciepła, wg [77]

Autorzy prac [70], [74] i [75] proponują połączenie funkcji piany jako nośnika i mieszadła w reaktorze. Z kolei w pracach [76] i [77] wskazano, że piana wypełniająca wnętrze rury przepływowej może pełnić funkcję mieszadła statycznego. Autorzy m.in. prac [78] i [79] wyraźnie wskazują na zwiększenie burzliwości płynów płynących przez piany metalowe, a tym samym intensyfikację konwekcyjnego ruchu ciepła i masy. Duża skuteczność zatrzymywania cząsteczek oraz odporność na korozję, a także właściwości hydrofobowe czynią piany metalowe dobrymi przegrodami filtracyjnymi [54,80]. Piany o odpowiednio przygotowanej powierzchni znajdują również zastosowanie w procesach separacji fazy olejowej, zarówno z ośrodka ciekłego, jak i gazowego [81–83], a także wspomagają koalescencję, co opisano w pracy [84]. Ponadto, komórkowa struktura stopu metalu reprezentuje dużą wytrzymałość mechaniczną, zdolność do absorbowania energii i dźwięku oraz niską gęstość (lekkość), dzięki czemu piany metalowe znajdują wiele zastosowań konstrukcyjnych w branży motoryzacyjnej, lotniczej oraz w budowie maszyn [58], [84]. Magnezowe i tytanowe piany metalowe stosowane są np. jako implanty i protezy w inżynierii biomedycznej.

Stosowanie wypełnień aparatów przepływowych (wymyenniki ciepła czy kolumny do wymiany masy) zawsze związane jest ze zwiększeniem zapotrzebowania na energię do tłoczenia płynów. Jednak, jak sugerują autorzy pracy

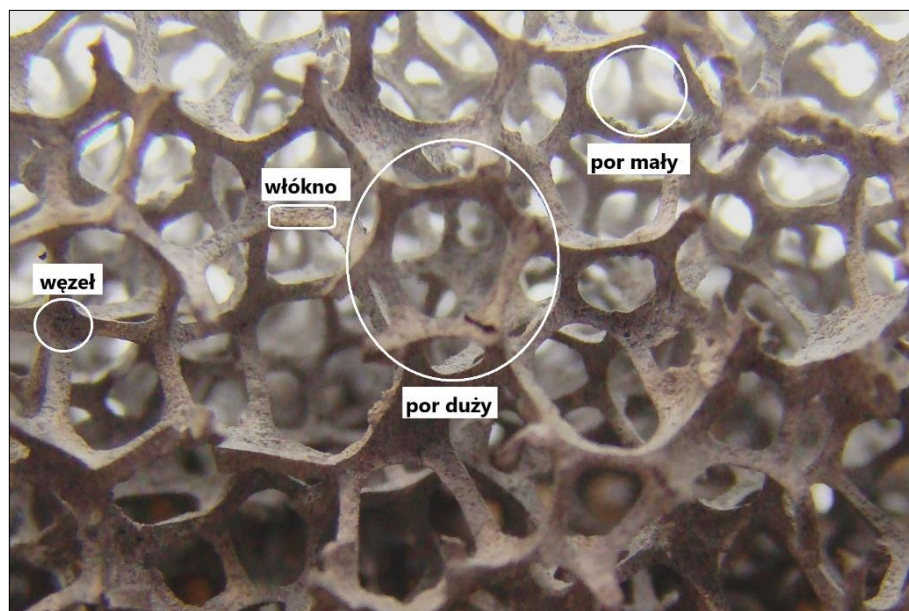
[60], w porównaniu do innych rodzajów wypełnień struktury komórkowe mogą generować najmniejsze opory przepływu (rys. 3.6.)



Rys. 3.6. Zakresy oporów przepływu przez różne wypełnienia aparatu kolumnowego dla współprądowego przepływu układu gaz-ciecz w dół, wg [60]

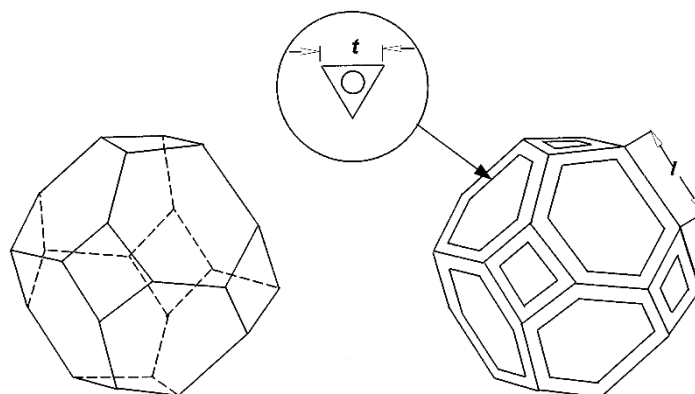
3.2. Parametry pian

Na rys. 3.7. przedstawiono zdjęcie mikroskopowe szkieletu piany metalowej. Jak na nim widać, włókna piany są ze sobą połączone w tzw. węzłach tworząc pory o różnych rozmiarach.

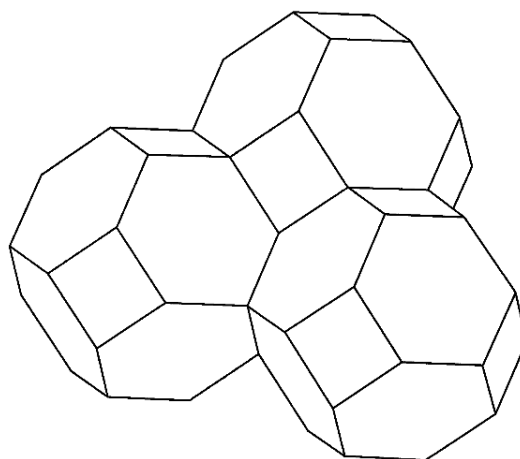


Rys. 3.7. Zdjęcie mikroskopowe szkieletu metalu komórkowego, wg [85]

W pracach [73] i [95] podano za autorami [59], że kształt pora dużego (właściwego) może być z powodzeniem przybliżony do czternastościanu ograniczonego ośmioma sześciokątami i sześcioma czworokątami „oknami”. Natomiast strukturę porowatą można przybliżyć zbiorowiskiem czternastościanów połączonych wspólnymi oknami (porami małymi), co określa się mianem struktury Kelvina [87]. Schemat czternastościennego modelu pora i strukturę Kelvina przedstawiono odpowiednio na rys. 3.8. i 3.9.



Rys. 3.8. Schemat modelu czternastościanu, wg [72];
t – grubość włókna, l – długość włókna



Rys. 3.9. Schemat struktury Kelvina, wg [86]

Głównym parametrem służącym do klasyfikacji pian metalowych jest tzw. gęstość upakowania porów oznaczana jako PPI (pores per inch), wskazująca liczbę porów na długości jednego cala, a tym samym pośrednio przybliżająca rozmiar porów. Standardowo, gęstość upakowania porów mieści się w zakresie od 5 do 120 PPI. Jednak autorzy pracy [88] wskazują, że piany należy porównywać ze sobą dysponując

znajomością nie tylko parametru PPI, ale także porowatości, a przede wszystkim posługując się średnicą pora i włókna.

W pracy [59] dokonano parametryzacji wymiarów geometrycznych tetrakaidekahedrona, którą autorzy pracy [72] udoskonaliли ograniczając liczbę zmiennych do porowatości piany i średnicy pora w odniesieniu do powierzchni właściwej oraz tylko do porowatości dla grubości włókna. Postać różnych korelacji opisujących wymiary geometryczne struktury komórkowej zawarto w tabeli 3.1.

Tabela 3.1.

Wielkości geometryczne modelu komórki

Wielkość	Źródło	Korelacja	Nr równania
objętość pora	[59]	$V_p=11,31l^3$	(3.1)
powierzchnia właściwa struktury	[59]	$a_v=(36tl)/[V_k(1-\varepsilon)]$	(3.2)
	[72]	$a_v=[12,979[1-0,971(1-\varepsilon)^{0,5}]]/[d_p(1-\varepsilon)^{0,5}]$	(3.3)
	[89]	$a_v=[6,702[1-1,003(1-\varepsilon)^{0,5}]]/[d_p(1-\varepsilon)^{0,5}]$	(3.4)
	[64]	$a_v=[4,867[1-0,971(1-\varepsilon)^{0,5}]]/[d_p(1-\varepsilon)^{0,5}]$	(3.5)
	[65]	$a_v=[4,82(1-\varepsilon)^{0,5}]/(t+d_p)$	(3.6)
średnica hydrauliczna struktury	[66]	$d_h=4\varepsilon/a_v$	(3.7)
długość włókna	[59]	$l=(0,5498dp)/[1-0,971(1-\varepsilon)^{0,5}]$	(3.8)
	[59]	$l=(1,030t)/[(1-\varepsilon)^{0,5}]$	(3.9)
grubość/średnica włókna	[72]	$t=[0,5338d_p(1-\varepsilon)^{0,5}]/[1-0,971(1-\varepsilon)^{0,5}]$	(3.10)
	[59]	$t=1-0,971(1-\varepsilon)^{0,5}l$	(3.11)

3.3. Piana metalowa jako turbulizator przepływu

Wysoko porowata i przepuszczalna struktura piany metalowej o bardzo dobrze rozbudowanej powierzchni właściwej, a dodatkowo wykonana z materiału cechującego się dobrą przewodnością cieplną, z powodzeniem jest stosowana w konstrukcji wymienników ciepła, jako element intensyfikujący proces jego wymiany [90].

Wyniki badań przedstawionych w pracy [91] wskazują, że zastąpienie jednolitych przegród tunelu powietrznego przegrodami lub innymi przeszkodami, wykonanymi z piany metalowej, może zwiększyć szybkość wymiany ciepła. Co więcej, jednocześnie możliwa jest redukcja oporów przepływu. Jednak autorzy pracy [92] porównali wewnątrznie ożebrowaną rurkę wymiennika z rurką wypełnioną pianą metalową w sposób pierścieniowy. Wyniki przeprowadzonych analiz pokazały, iż wypełnienie rurki zwiększa co prawda efektywność cieplną układu o 30%

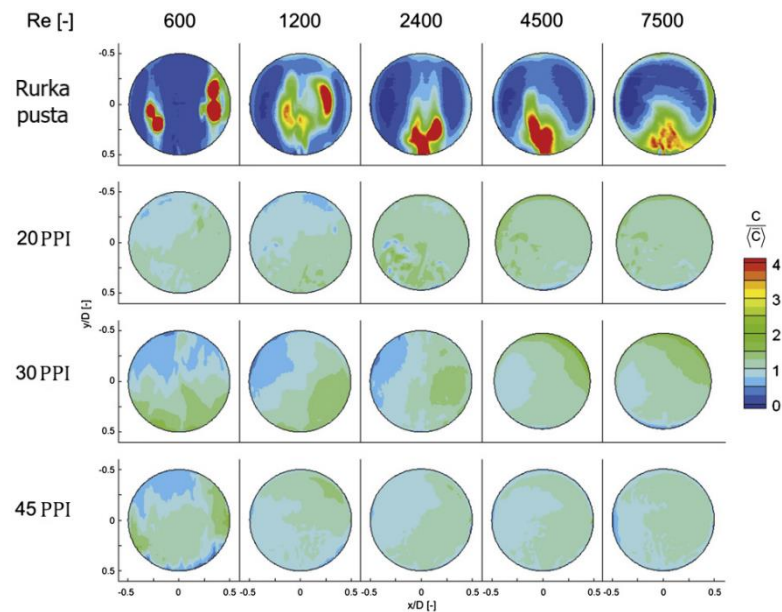
w porównaniu do wewnętrznego ożebrowania rury, jednak towarzyszy temu wzrost oporów przepływu. Różnica w stratach ciśnienia wywoływanych oporami przepływu pomiędzy rurą wypełnioną pianą a jej ożebrowaniem wewnętrznym, jednakże zmniejsza się wraz ze wzrostem masowego strumienia przepływu płynu. Według autorów pracy [92] stanowi to podstawę do upatrywania w pianie metalowej potencjału w przenoszeniu ciepła podczas przepływu kondensacyjnego.

Z kolei w pracy [75] porównano efekty wypełnienia kanału pianą metalową i innymi materiałami włóknistymi. W wyniku tego stwierdzono większą wydajność piany metalowej niż spiekanych włókien brązu, odznaczających się przecież dobrymi parametrami termicznymi. Wysoką wydajność piany tłumaczono jej otwartą strukturą, która ułatwia odprowadzanie pary powstałej w pobliżu ścianki, co z kolei znacznie poprawia przenoszenie ciepła. Ponadto straty ciśnienia generowane w pianie są 10-krotnie mniejsze niż we włóknach spiekanych, przy takich samych warunkach przepływu i wymiany ciepła. W pracy [93] wykazano, że w zależności od wartości liczby Reynoldsa wypełnienie rurki pianą metalową może zwiększyć od czterech do nawet dziewięciu razy intensywność wymiany ciepła dla czynnika chłodniczego R245fa, co jednak wiąże się z wielokrotnie większymi oporami przepływu.

W pracy [94] także udokumentowano zwiększenie wydajności cieplnej podczas przepływu wrzącego czynnika chłodniczego w rurce wypełnionej pianą metalową. Zmierzone wartości współczynnika przenikania ciepła były o od 1,5 do 3,2 razy większe niż podczas przepływu w pustej rurce. Również autorzy pracy [95] wskazują na znacznie szybszą wymianę ciepła w części kanału przepływowego wypełnionego pianą metalową.

Intensyfikacja wymiany ciepła poprzez zainstalowanie piany metalowej w rurce wymiennika w znacznej mierze wynika z faktu, iż złożona struktura piany promuje turbulencję przepływu, co jest jednak źródłem wzrostu oporów przepływu. Autorzy pracy [76] dowiedli eksperymentalnie, że „pseudolosowa struktura” piany metalowej wywołuje więcej zakłóceń, niż układy uporządkowane, co prowadzi do lepszych efektów mieszania. W tym celu do głównego strumienia po dwóch przeciwnych stronach kapilary umieszczonej w rurce przed pianą wstrzykiwano barwnik wskaźnikowy. Do zbadania przestrzennej zmienności składowych prędkości osiowej i promieniowej oraz do oceny pola koncentracji barwnika wskaźnikowego zastosowano połączenie techniki anemometrii obrazowej (PIV) oraz techniki fluorescencyjne indukowanych przez laser planarny (PLIF). Pomiary prowadzono w odcinku rury

za pianą metalową. Jak wynika z grafiki przedstawionej na rys. 3.10., w przypadku pustej rury przy liczbie Reynoldsa równej 600 nie obserwowano dyspersji barwnika.



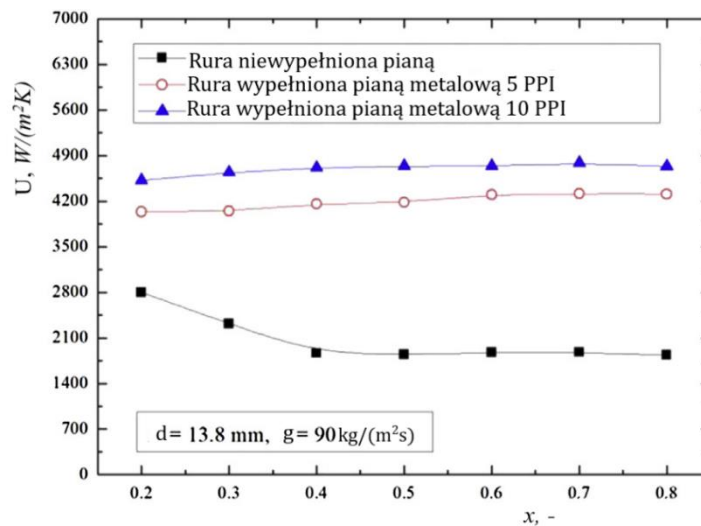
Rys. 3.10. Kontury pola średniego stężenia barwnika za elementami piankowymi, wg [76]

Możliwe było nawet wyróżnienie dwóch obszarów odpowiadających miejscu wstrzyknięcia barwnika, co świadczy o bardzo niskim stopniu wymieszania płynącej substancji. Oczywiście wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa zwiększa się rozproszenie barwnika oraz nie jest już możliwe wyróżnienie miejsc jego wstrzyknięcia. Ten wzrost intensywności mieszania spowodowany jest zwiększeniem poziomu turbulencji. Niemniej jednak, nadal można zauważyć szczytowe wartości stężenia barwnika, co wskazuje, że stopień wymieszania składników mógłby być jeszcze większy. Natomiast wyniki odnoszące się do różnych pian metalowych umieszczonych w rurze wykazują znacznie bardziej jednolite pole koncentracji barwnika. W przeciwieństwie do pustej rury, w rurze wypełnionej pianą nie obserwuje się szczytowej wartości jego stężenia niezależnie od wartości liczby Reynoldsa. Zatem poczynione przez badaczy [76] obserwacje wyraźnie dowodzą wpływu obecności w rurze piany metalowej na intensyfikację procesu mieszania. Tym samym wskazują również, iż struktura piany metalowej intensyfikująca proces mieszania może prowadzić do zintensyfikowania procesu wymiany ciepła, czy też wymiany masy podczas przepływu dwufazowego. Podkreślają przy tym, że mimo wywoływania większych strat oporów przepływu niż rura pusta, rura wypełniona pianą odznacza się kilkukrotnie lepszą wydajnością procesu

mieszania, rozumianą jako nakład energii niezbędnej do uzyskania określonego stopnia wymieszania.

Także w pracy [63] wykazano, że obecność piany metalowej w kanale przepływowym zwiększa turbulencję i intensyfikację ruchu ciepła. Przeprowadzone badania i analizy pozwoliły ustalić, że przepływ powietrza przez pianę jest turbulentny, podczas gdy między żaluzjowym ożebrowaniem rur przepływa ono w sposób laminarny przy jednakowych warunkach przepływu.

Wykres na rys. 3.11. przedstawia przebieg zmian zmierzonych przez autorów pracy [94] wartości współczynnika przenikania ciepła dla rury wypełnionej pianą metalową na tle wartości obliczonych dla rury pustej, przy tych samych warunkach przepływu.

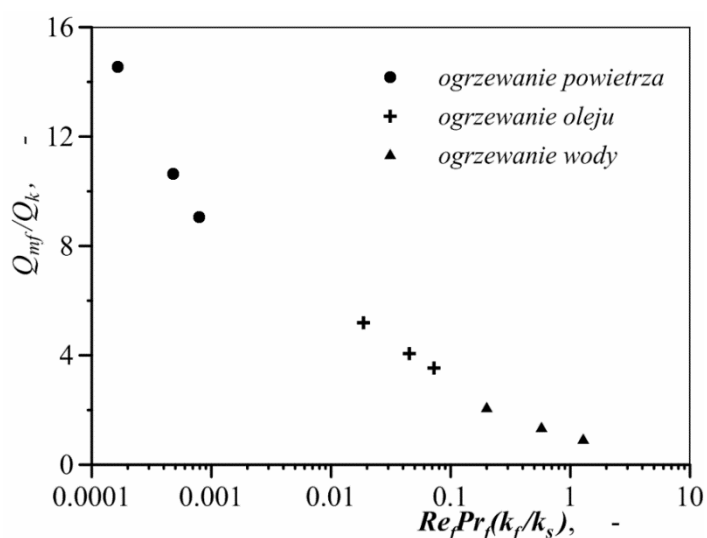


Rys. 3.11. Porównanie współczynnika przenikania ciepła w rurze wypełnionej pianką metalową z istniejącą korelacją dla rury gładkiej, wg [94]

Wynika z niego, że w przypadku rurki wypełnionej pianą przy stałym strumieniu masy czynnika chłodniczego wartość współczynnika przenikania ciepła łagodnie wraza wraz ze wzrostem udziału pary. Z kolei dla rurki niewypełnionej pianą wartość współczynnika przenikania ciepła maleje. Badacze [94] tłumaczą ten efekt różnymi strukturami przepływu w obu wariantach rur. Mianowicie w rurze niewypełnionej pianą układ dwufazowy ciecz-para płynie w sposób rozwarstwiono-falowy, co sprawia, że wartość współczynnika przenikania ciepła maleje wraz ze wzrostem stężenia pary. Z kolei w rurze wypełnionej pianą, pod wpływem jej obecności struktura przepływu zmienia się w przepływ pierścieniowy. Wraz ze wzrostem ilości pary zwiększa się też prędkość cieczy na obwodzie rury, co sumarycznie prowadzi do wzrostu współczynnika przenikania ciepła.

Również w przywołanej już wcześniej pracy [82] wskazano, że obecność piany metalowej w rurze zwiększa burzliwość płynu oraz sprzyja kształtowaniu się pierścieniowej struktury przepływu przy niższym strumieniu masy substancji, niż wynika to z warunków przepływu w pustej rurze. Fakt ten potwierdzono także w pracy [94].

Jednak najbardziej istotną zaletą piany metalowej – stawiającą ją w przewadze do innych sposobów zwiększania wydajności wymienników ciepła – jest jej rozbudowana powierzchnia i dobra przewodność cieplna. Ułatwia to ruch ciepła od płynu w rdzeniu rury, bowiem piana nie tylko turbulizuje przepływ, ale także pełni funkcję żebra wewnętrznego [96]. Takie cechy piany metalowej zostały też wskazane przez autora pracy [87]. Na drodze obliczeń numerycznych porównano w niej ilość ciepła oddawanego do płynu przez strukturę piany do ilości ciepła przekazywanego przez ściankę kanału, co przedstawiono graficznie na wykresie pokazanym na rys. 3.12.



Rys. 3.12. Wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawionych w pracy [87] (opis w tekście)

Jak z niego wynika, w zależności od rodzaju ogrzewanego płynu Pr_f i charakteru jego przepływu Re_f oraz stosunku przewodności cieplnej płynu i materiału piany k_f/k_s strumień ciepła przekazywanego przez pianę Q_{mf} może być nawet kilkunastokrotnie większy od strumienia ciepła oddanego za pośrednictwem samej powierzchni wewnętrznej kanału Q_k . Jak podaje autor pracy [87], powierzchnia piany jest przy tym jedynie ok. 3,5 razy większa od powierzchni ścianki.

Biorąc pod uwagę istotny wpływ piany metalowej na intensyfikację procesu wymiany ciepła, na co, jak przedstawiono powyżej, składa się wiele czynników, można spostrzec duży potencjał w celowości stosowania tego materiału w budowie

wymienników ciepła. Jednakże, przy aktualnym stanie wiedzy nadal trudno wskazać najlepsze rozwiązanie maksymalizujące intensywność wymiany ciepła przy minimalnym zapotrzebowaniu na energię konieczną do tłoczenia czynników wymieniających ciepło. W tym celu należy jednak dysponować dobrą znajomością zarówno przebiegu procesu wymiany ciepła z użyciem piany metalowej, jak i związanych z tym zagadnień hydrodynamicznych. W literaturze przedmiotu dostępnych jest wiele prac poświęconych wymianie ciepła w układach konstrukcyjnych zawierających piany metalowe, z których jedynie część przywołano powyżej. Natomiast znacznie mniej jest pozycji związanych z hydrodynamiką przepływu płynów przez te piany. Jako jedne z nielicznych przykładów można wskazać prace [97,98], których autorzy wskazują na parametry pian metalowych mające znaczący wpływ na opory przepływu. Warto przy tym dodać, że prace eksperymentalne dotyczą głównie przepływów jednofazowych.

4. Hydraulika przepływu płynu w rurkach wymiennika

4.1. Przepływ jednofazowy

Opory przepływu jednofazowego cieczy w rurze poziomej wynikają jedynie ze zjawiska tarcia i wyznacza się je przy zastosowaniu równaniu Darcy'ego-Weisbacha

$$\Delta P = \lambda \frac{w^2 \rho L}{2 d}. \quad (4.1)$$

W odniesieniu do gazów równanie (4.2) przyjmuje postać

$$\Delta P = \lambda \frac{g^2 L}{2 \rho_{sr} d}, \quad (4.2)$$

w którym ze względu na ich ściślność operuje się ich średnią, zależną od ciśnienia gęstością. Sposób wyznaczania wartości liczby oporu liniowego w równaniach (4.1) i (4.2) zależy od charakteru przepływu danej substancji oraz chropowatości rury.

W przypadku przepływu laminarnego, czyli przy mniejszej od 2100 liczbie Reynoldsa zdefiniowanej jako

$$\text{Re} = \frac{wd\rho}{\eta} = \frac{gd}{\eta}, \quad (4.3)$$

wartość λ wyznacza się zgodnie z zależnością

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (4.4)$$

W warunkach nielaminarnego przepływu płynu w rurze o hydraulicznie gładkiej ścianie obowiązują różne równania empiryczne podawane w literaturze, np. [99]. Jako najbardziej powszechną należy wskazać zależność Blasiusa

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (4.5)$$

które obowiązuje w zakresie zmian liczby Reynoldsa od $2,3 \cdot 10^3$ do 10^5 oraz równanie Nikuradsego

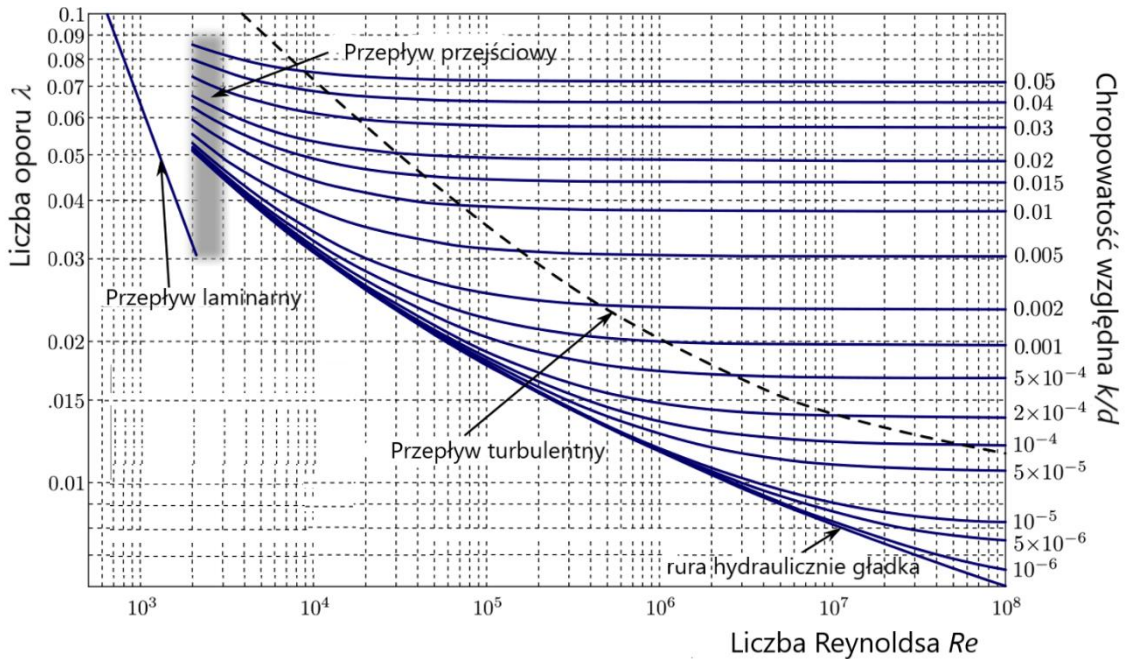
$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}}, \quad (4.6)$$

obowiązujące przy liczbie Reynoldsa większej od 10^5 .

Z kolei podczas przepływu turbulentnego w rurze hydraulicznie chropowatej liczbę oporu λ można wyznaczyć w oparciu o często przywoływane w literaturze równanie Colebrooka-White'a

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \lg \left(\frac{2,51\sqrt{\lambda}}{\lambda Re} + \frac{k}{3,71d} \right) \sqrt{\lambda}, \quad (4.7)$$

w którym stosunek średniej wysokości nierówności powierzchni do średnicy rury wyraża chropowatość względną powierzchni jej ściany. W literaturze dostępny jest również wykres służący do wyznaczania liczby oporu przepływu jednofazowego w zależności od liczby Reynoldsa i chropowatości względnej rury, który pokazano na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Liczba oporu dla przepływu w rurze, wg [100]

Z kolei na całkowite straty ciśnienia płynu w rurkach np. wymiennika typu JAD, składa się opór liniowy wynikający z tarcia, opory miejscowe wywoływane przez przeszkody lokalne (np. zakrzywienie rurek) oraz ciśnienia hydrostatycznego, które musi być pokonane, jeśli wlot i wylot rurki znajdują się na różnej wysokości.

Do wyznaczania wartości miejscowych oporów przepływu można skorzystać z równania

$$\Delta P = \xi \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (4.8)$$

w którym symbol ξ oznacza liczbę oporu miejscowego. Jej wartości wyznaczone są eksperymentalnie i zależą od kształtu danego elementu rurociągu, a niekiedy również od charakteru przepływu płynu przez ten element. Wartości liczby oporu miejscowego dla różnego rodzaju armatury, w tym również rur zakrzywionych, podaje literatura, np. [101].

Z kolei straty ciśnienia płynu związane z różnicą poziomów wlotu i wylotu z rury wyznacza się zgodnie z równaniem

$$\Delta P = \rho \hat{g} h. \quad (4.9)$$

Zatem wymagane nadciśnienie związane z przepływem płynu przez wymiennik ciepła wyznacza się jako sumę równań (4.1) (4.8) i (4.9) w przypadku cieczy oraz sumę równań (4.2) i (4.8) dla gazu, ponieważ jego ciśnienie hydrostatyczne jest na tyle małe, że w praktyce może być pominięte.

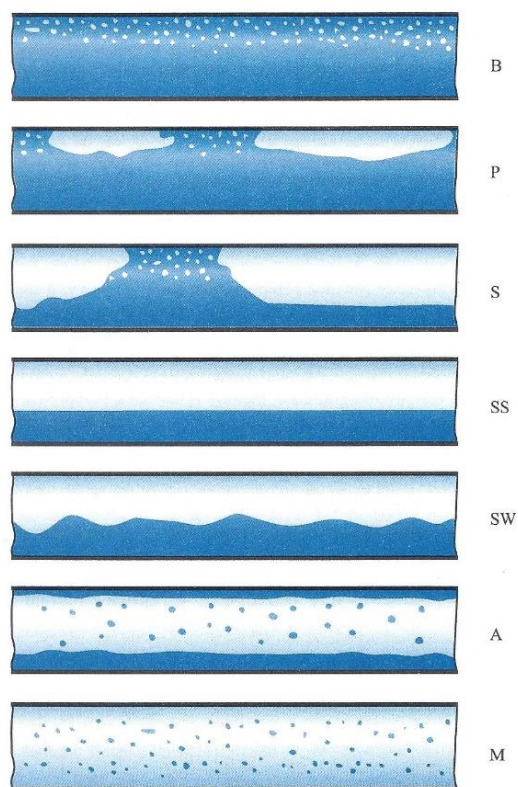
4.2. Przepływ dwufazowy

Poprzez termin „*przepływ wielofazowy*” należy rozumieć jednoczesny przepływ przynajmniej dwóch faz. Z kolei jako fazę rozumiany jest jednorodny pod względem fizycznym składnik mieszaniny odseparowany od innych powierzchnią międzyfazową. Wyróżnia się przepływy wielofazowe jednoskładnikowe, w których fazy są zróżnicowane jedynie pod względem stanu skupienia (np. przepływ wrzącej wody) oraz przepływy wielofazowe wieloskładnikowe, w których fazy różnią się pod względem chemicznym oraz fizycznym (np. przepływ niemieszających się cieczy lub wody i powietrza). Przepływy wielofazowe towarzyszą wielu procesom zachodzącym w aparaturze przemysłu chemicznego, petrochemicznego, energetycznego i spożywczego. Najczęściej można je spotkać w wymiennikach ciepła typu skraplacz lub parownik, ale też w przepływowych reaktorach chemicznych oraz kolumnach destylacyjnych i ekstrakcyjnych.

Przepływowi układów wielofazowych towarzyszą charakterystyczne dla nich zjawiska, takie jak kształtowanie się określonych struktur przepływu, redukcja oporów przepływu, poślizg międzyfazowy oraz zmienne w czasie i przestrzeni udziały objętościowe faz.

4.2.1. Układ gaz-ciecz

Podczas przepływu układu gaz-ciecz w ograniczonym ścianką przewodzie formują się różne struktury przepływu, a ich kształt i rozmieszczenie faz jest zależne od kształtu przewodu oraz od ilości, proporcji i właściwości przepływających płynów. W wyniku analizy eksperymentów prowadzonych przez wielu badaczy Dziubiński [102] wyróżnił siedem głównych struktur przepływu, przedstawionych na rys. 4.2. oraz opisanych w tabeli 4.1.

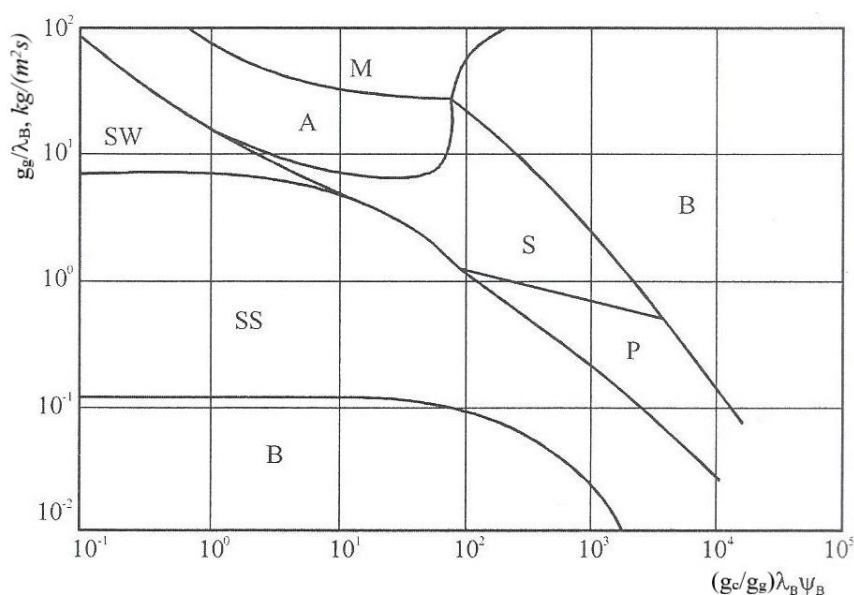


Rys. 4.2. Struktury przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w kanale poziomym wraz z oznaczeniami wg [102];
 B – przepływ pęcherzykowy, P – tłokowy, S – rzutowy, SS – warstwowy, SW – falowy,
 A – pierścieniowy, M – kropelkowy

Tabela 4.1.
 Charakterystyka struktur poziomego przepływu dwufazowego ciecz-gaz, wg [102]

Struktura przepływu	Oznaczenie	Opis
pęcherzykowa	B	Strumień cieczy wypełnia cały przekrój poprzeczny kanału, a w jego górnej części przepływają drobne pęcherzyki gazu
tłokowa	P	Z drobnych pęcherzyków gazu powstają duże podłużne pęcherze płynące górną częścią kanału
rzutowa	S	Przez kanał płyną naprzemiennie ciecz (z drobnymi pęcherzykami gazu) i pęcherz gazu zajmujący znaczną część przekroju poprzecznego kanału
warstwowa	SS	Płynąca struga dwufazowa jest rozdzielona: ciecz zajmuje dolną część kanału, a gaz górną; powierzchnia rozdziału jest gładka.
falowa	SW	Płynąca struga dwufazowa jest rozdzielona: ciecz zajmuje dolną część kanału, a gaz górną; powierzchnia rozdziału jest silnie zafalowana.
pierścieniowa	A	Gaz wraz z nielicznymi kropelkami cieczy płynie środkiem kanału, a ciecz cienką warstwą po jego ściance; w dolnej części kanału film cieczy jest grubszy niż w górnej.
kropelkowa	M	Całym przekrojem poprzecznym kanału płynie gaz niosący w sobie drobne kropelki cieczy

Warunki w jakich występują poszczególne struktury przepływu wielofazowego przedstawiane są na specjalnych wykresach, nazywanych mapami przepływu. W odniesieniu do układu dwufazowego gaz-ciecz płynącego w rurze poziomej w literaturze przedmiotu dostępnych jest kilkadziesiąt map przepływu, spośród których do najpopularniejszych należą: mapa Bakera [103], Mandhane'a, Gregory'ego i Aziza [104], Weismana, Duncana, Gibsona i Crawforda [105] oraz mapa Troniewskiego i Ulbricha [106]. Uważa się, że przedstawiona na rys. 4.3. mapa Troniewskiego i Ulbricha pozwala na określenie statystycznie najbardziej prawdopodobnych warunków kształtowania się określonych struktur przepływu układu gaz-ciecz [102].



Rys. 4.3. Mapa struktur przepływu dwufazowego gaz-ciecz, wg [106],
oznaczenia jak w tab. 4.1.

W zależności od sposobu rozmieszczenia jednej fazy względem drugiej, układ dwufazowy może być rozpatrywany jako homogeniczny lub rozdzielony. Na podstawie tego kryterium do obliczania strat ciśnienia płynącego układu wielofazowego wykorzystuje się odpowiednio model matematyczny.

Model układu homogenicznego zakłada, że mieszanina wielofazowa jest jednorodna w każdym punkcie pod względem prędkości, gęstości oraz lepkości. Podstawową zależność stanowi wtedy klasyczne równanie Darcy'ego-Weisbacha

$$\Delta P_{2F} = \lambda_{2F} \frac{w_{2F}^2 \rho_{2F}}{2} \frac{L}{D}, \quad (4.10)$$

które jest „udoskonalane” poprzez definiowanie w różny sposób współczynnika oporów przepływu, gęstości oraz lepkości układu wielofazowego.

Model układu rozdzielonego powstał na bazie założenia, że każda z faz płynie z inną prędkością, ma inne właściwości, a tym samym opory przepływu każdej z nich są różne. Modelowanie oporów przepływu mieszaniny dwufazowej w oparciu o model układu rozdzielonego polega na opisie ruchu każdej fazy oddzielnie. Wynik jest następnie uzupełniany o człon uwzględniający oddziaływanie międzyfazowe. Klasycznym przykładem równania dotyczącego tego modelu jest korelacja Lockarta – Martinellogo

$$\left(\frac{\Delta P_{2F}}{\Delta L}\right) = \varphi_i^2 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i, \quad (4.11)$$

która doczekała się wielu modyfikacji [107]. W równaniu (4.11) jednostkowy opór przepływu $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_i$ jest obliczany zgodnie z równaniem Darcy’ego-Weisbacha osobno dla każdej fazy. Natomiast parametr φ_i^2 jest funkcją parametru Lockarta – Martinellogo definiowanego jako

$$X = \left[\frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_c}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_g} \right]^{0.5}. \quad (4.12)$$

Często cytowaną zależność wyrażającą wartość φ_c^2 zaproponował Chisholm [108]

$$\varphi_c^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}. \quad (4.13)$$

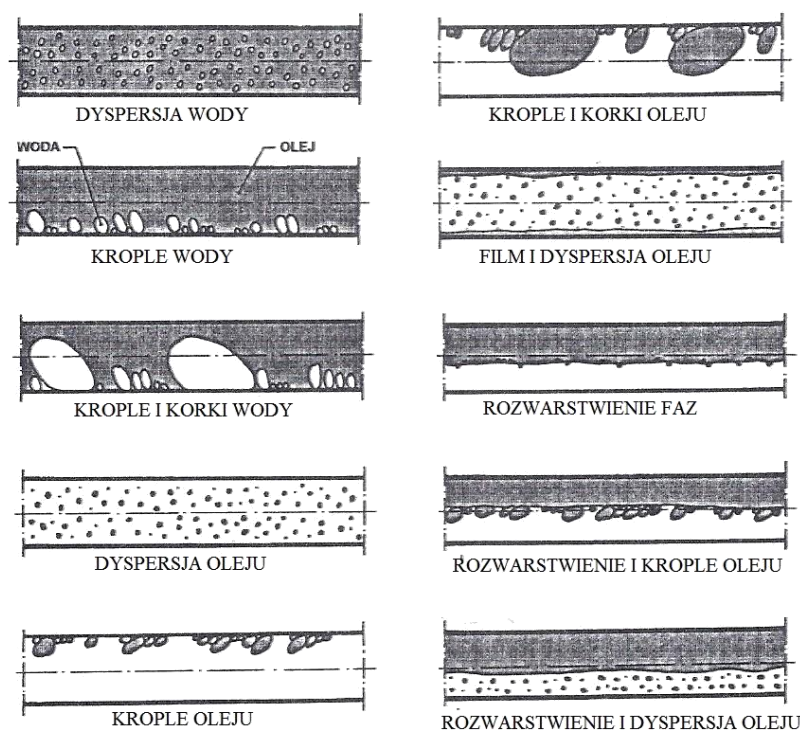
W pracach [102] i [107] szczegółowo opisano zagadnienia związane z przepływem układu dwufazowego gaz-ciecz w rurze i są one obecnie uważane za wyczerpane i usystematyzowane.

4.2.2. Układ ciecz-ciecz

Innym rodzajem układu dwufazowego jest mieszanina ciecz-ciecz. Jednoczesny przepływ dwóch niemieszających się cieczy w przewodzie może wykazywać najbardziej złożony charakter spośród innych układów dwufazowych, ponieważ związany jest ze zjawiskiem inwersji faz i redukcją oporów przepływu. Efekty te nie występują podczas przepływu układów gaz-ciecz, gaz-ciało stałe, czy też ciecz-ciało stałe. Ciekłe układy wielofazowe są przetwarzane w aparatach przemysłu chemicznego, petrochemicznego, spożywczego, farmaceutycznego i energetycznego. Są typowe dla

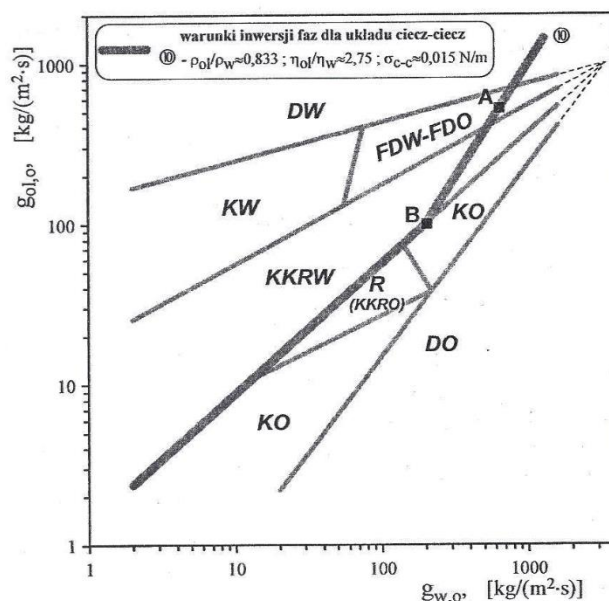
ekstrakcji [109], niektórych procesów wymiany ciepła i masy [110] oraz wydobycia i transportu surowej ropy naftowej z dna morza [111], co właściwie zapoczątkowało badania nad przepływem układów wodno-olejowych i zjawiskami, które mu towarzyszą.

Podczas przepływu układu ciecz-ciecz mogą kształtować się kroplowe, kroplowo-korkowe, rozwarstwione, dyspersyjne oraz filmowo-dyspersyjne struktury dwufazowe, które schematycznie przedstawiono na rys. 4.4. [109].

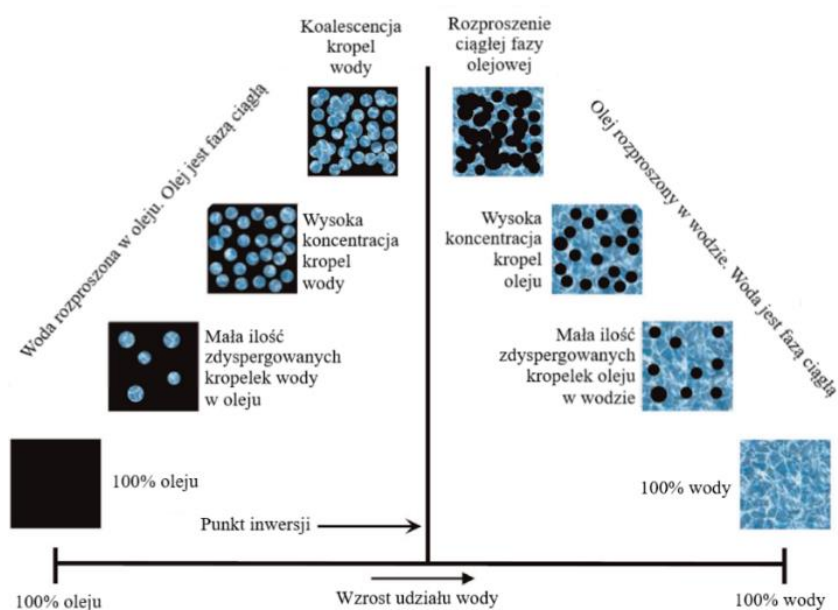


Rys. 4.4. Schematy struktur przepływu układu wodno-olejowego, wg [109]

W literaturze przedmiotu dostępne są również systematyki struktur przepływu ciekłych układów dwufazowych opracowane przez innych autorów, np. [112,113], lecz nie różnią się one znacznie w stosunku do klasyfikacji przedstawionej na rys. 4.4. Nieco inaczej kształtują się struktury przepływu woda-bardzo lepki olej, co opisano w pracy [114]. Warunki występowania struktur dla układu ciecz-ciecz także przedstawiane są na mapach przepływu. Na rys. 4.5. pokazano uogólnioną mapę opracowaną przez autora pracy [109] z wyróżnieniem granicy odpowiadającej inwersji faz. Inwersja faz jest zjawiskiem charakterystycznym dla układów ciecz-ciecz, a schemat jej przebiegu przedstawiono na rys. 4.6.



Rys. 4.5. Uogólniona mapa struktur przepływu dla układu ciecz-ciecz z wyróżnioną granicą inwersji faz, wg [109]



Rys. 4.6. Schemat przebiegu inwersji faz, wg [114]

Do inwersji dochodzi wtedy, gdy do układu o stałej objętości doprowadzana będzie zwiększająca się ilość fazy rozproszonej. Kropelki fazy rozproszonej będą łączyć się wówczas w większe krople, a następnie w korki, aż ulegną zupełnej koalescencji. W efekcie tego, dotychczasowa faza rozproszona stanie się ciągłą, a przy spełnieniu odpowiednich warunków w jej objętości dojdzie do rozproszenia uprzedniej fazy ciągłej. Moment, w którym dochodzi do zmiany typu ciekłego układu rozproszonego nazywany jest punktem inwersji, a odpowiada mu krytyczny udział cieczy tworzącej fazę rozproszoną, przy którym ulega ona zupełnej koalescencji [109].

Opory przepływu ciekłej mieszaniny dwufazowej oblicza się w podobny sposób, jak w przypadku układu gaz-ciecz, czyli wykorzystując model homogeniczny i równanie (4.10) lub odpowiednio zaadaptowany model rozdzielony i równanie (4.11). Trudności w stosowaniu równania (4.10) są identyczne, jak w przypadku układu gaz-ciecz. Z kolei równanie (4.11) jest adaptowane na potrzeby układu ciecz-ciecz na różne sposoby. Hapanowicz [115] opracował metodę obliczania oporów przepływu ciekłych układów rozproszonych obowiązujących dla mieszaniny wody z olejem zarówno o mniejszej, jak i większej gęstości od wody. Jej zapis matematyczny to

$$\frac{\Delta P_{c-c}}{\Delta P_{w,o}} = \Theta_w = 1 + 1,21 X_{c-c}^{1,38} Fr_{w,o}^{-0,40}, \quad (4.14)$$

gdzie

$$X_{c-c}^2 = \frac{\Delta P_{ol,o}}{\Delta P_{w,o}}, \quad (4.15)$$

a

$$Fr_{w,o} = \frac{w_{w,o}^2}{\tilde{g} d_r}. \quad (4.16)$$

Zgodnie z oceną statystyczną skuteczności równania (4.14) metoda okazała się poprawna. Jednak po wnikliwej analizie spostrzeżono, że zwłaszcza przy małych strumieniach przepływu wody przebieg funkcji danej równaniem (4.14) odbiega od charakteru rzeczywistych zmian oporów, gdyż są one zależne od udziałów poszczególnych faz, a więc struktur przepływu jakie kształtują się w rurze. Podobne wnioski podają autorzy prac [116–118]. W pracy [119] zaproponowano sposób skojarzenia metody obliczania oporów przepływu ciekłych układów dwufazowych ze strukturami, jednak nadal nie jest to podejście dające zawsze poprawne rezultaty. Hapanowicz [109] opracował także inny sposób obliczania oporów przepływu układów ciecz-ciecz. Zaproponowana zależność

$$\frac{\Delta P_{c-c}}{\Delta P_{w,o}} = \Phi_{c-c} = C_i R_{fr}^{n_i} Re_{fc,0}^{n_{ii}} \Pi_{ol-w} \quad (4.17)$$

odznacza się szerokim zakresem stosowalności. Parametr Π_{ol-w} to

$$\Pi_{ol-w} = \left(\frac{\dot{V}_{ol}}{\dot{V}_w} \right)^{n_{ii} + n_{iv}} \left(\frac{C_{ol}}{C_w} \frac{Re_{w,o}^{n_w}}{Re_{ol,o}^{n_{ol}}} \right)^{n_{iv}} \tilde{\rho}^{n_{iv}} \tilde{\eta}^{n_v}, \quad (4.18)$$

w którym parametry $Re_{w,o}$ i $Re_{ol,o}$ to liczby Reynoldsa odnoszące się do przepływu odpowiednio wody i oleju w warunkach prędkości pozornej danej substancji.

Z kolei wielkości $\tilde{\rho}$ i $\tilde{\eta}$ wyrażają odpowiednio stosunek gęstości i lepkości oleju do wody. W tabeli 4.2. podano stałe i wykładniki równań (4.17) i (4.18).

Tabela 4.2.

Stałe i wykładniki równań (4.17) i (4.18) wg [109]

Typ układu	Faza ciągła	C_i	n_i	n_{ii}	n_{iii}	n_{iv}	n_v
O/W	woda	$1,55 \cdot 10^2$	0,96	-0,32	-0,90	0,66	-0,41
W/O	olej	$2,57 \cdot 10^2$	0,39	-0,40	0,71	0,73	-0,73
W+O	olej	$9,33 \cdot 10^5$	2,00	-1,13	2,34	0,34	-1,45

Wartości stałych C_w i C_{ol} oraz wykładników n_w i n_{ol} występujących w (4.18) zostały uzależnione od relacji pomiędzy liczbami Reynoldsa wody i oleju. Zestawiono je w tabeli 4.3.

Tabela 4.3.

Stałe i wykładniki równania (4.18) wg [109]

$Re_{ol,o}$	$Re_{w,o}$	C_{ol}	n_{ol}	C_w	n_w
<2100	<2100	64	1	64	1
<2100	>2100	64	1	0,3164	0,25
>2100	<2100	0,3164	0,25	64	1
>2100	>2100	0,3164	0,25	0,3164	0,25

4.3. Przepływ w rurze wypełnionej pianą metalową

Podczas przepływu przez ośrodki porowate wystąpić mogą różne reżimy przepływu. Generalnie wyróżnia się 4 przypadki [98]:

- przepływ pre-Darcy – odnosi się do zakresu laminarnego, przy którym prawo Darcy’ego jeszcze wprost nie obowiązuje. Jego zmodyfikowana postać na potrzeby opisu zjawisk odpowiadających reżimowi pre-Darcy zapisywana jest jako [120]

$$\frac{\Delta P - \delta P}{L} = \frac{\eta}{K} w. \quad (4.19)$$

Równanie (4.19) odpowiada następującym warunkom [120]:

$$\frac{\Delta P - \delta P}{L} < 0 - \text{brak przepływu,}$$

$$\frac{\Delta P - \delta P}{L} > 0 - \text{reżim przepływu pre-Darcy,}$$

$$\frac{\delta P}{L} = 0 - \text{reżim przepływu Darcy.}$$

Prowadzenie badań w warunkach przepływu pre-Darcy wymaga oprzyrządowania cechującego się wysoką czułością, pozwalającego na zmierzenie bardzo niskich wartości strat ciśnienia i prędkości przepływu płynu;

- przepływ Darcy'ego – przy którym obowiązuje prawo Darcy'ego (opory przepływu zmieniają się liniowo w funkcji prędkości płynu) [98]

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\eta}{K} w \quad (4.20)$$

- przepływ Forcheimer'a – obejmujący znacznie szerszy zakres przepływu laminarnego niż przepływu Darcy'ego; opory przepływu w tym reżimie są funkcją kwadratową prędkości płynu [120]

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\eta}{K} w + \frac{F \rho}{\sqrt{K}} w^2 = \frac{\eta}{K} w + \beta \rho w^2 \quad (4.21)$$

Dyssypacja energii jest sumą składowej tarciowej (η/K) i bezwładnościowej ($F\rho/\sqrt{K}$), określanej również mianem współczynnika inercji β . W formie bezwymiarowej równanie (4.21) przyjmuje postać

$$f = \left(\frac{1}{\text{Re}} \right) + F, \quad (4.22)$$

gdzie współczynnik tarcia jest definiowany jako

$$f = \frac{\Delta P \sqrt{K}}{L \rho w^2}, \quad (4.23)$$

a liczba Reynoldsa wyrażona zależnością

$$\text{Re} = \frac{\rho w \sqrt{K}}{\eta}. \quad (4.24)$$

- przepływ turbulentny – w którym współczynnik tarcia, a więc i opory przepływu są niezależne od liczby Reynoldsa. Opory w tym reżimie przepływu wyrażane są równaniem (4.21), lecz współczynnik tarcia ma stałą wartość [98].

4.3.1. Przepływ jednofazowy

Przepływ jednofazowy gazu przez piany metalowe był przedmiotem wielu prac opublikowanych w ciągu ostatniej dekady. Z kolei przepływ jednofazowy cieczy przez piany jest zagadnieniem poruszonym w literaturze przedmiotu dopiero od ostatnich pięciu lat. Problematyka wyznaczania oporów przepływu gazu przez metale komórkowe została poruszona m. in. w pracach [121–126], w których wykazano,

że ze wzrostem prędkości przepływu opory zwiększają się w funkcji kwadratowej. W praktyce inżynierskiej zmiany te są opisywane równaniem Forcheimer'a (4.21). Z powodu trudności związanych z identyfikacją cech strukturalnych pian metalowych, współczynniki K i β w równaniu (4.21) wyznaczone są wg korelacji opracowanych dla ziarnistych złóż porowatych. Niestety to może prowadzić do znacznych odchyień od wartości rzeczywistych. W pracy [127] dokonano przeglądu korelacji opisujących parametry K i β . Spośród nich na szczególną uwagę zasługują zależności zaproponowane przez autorów pracy [122], gdyż opracowano je na podstawie znacznej liczby danych doświadczalnych. Zależności te mają postać

$$\frac{1}{K} = 205234 \left[\frac{a_v^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right]^{0,4898} \quad (4.25)$$

oraz

$$\beta = 9,5016 \left[\frac{a_v (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right]^{0,7104} . \quad (4.26)$$

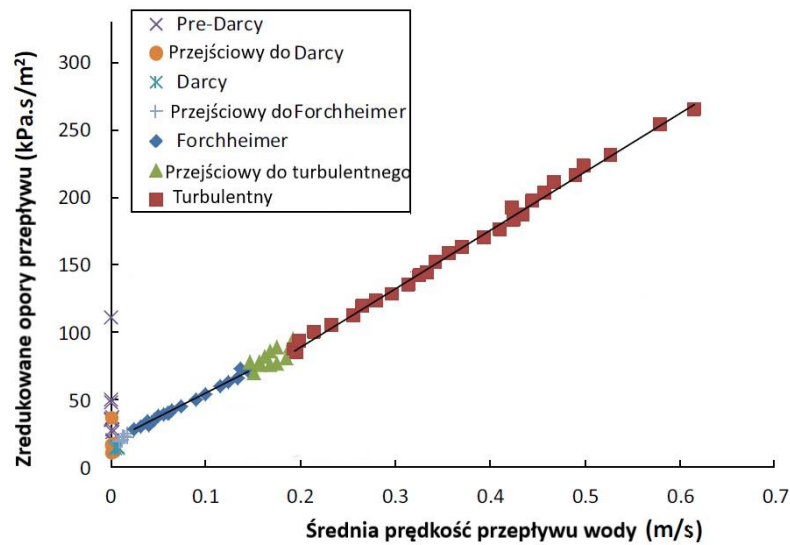
Ich wprowadzenie do równania (4.21) pozwala obliczyć opory przepływu płynu przez piany metalowe [127].

Przepływem cieczy przez piany metalowe zajmowali się m.in. autorzy prac [93,98,120,128,129]. W pracy [120] badano hydrodynamikę przepływu wody przez piany aluminiowe w warunkach odpowiadającym różnym reżimom przepływu. Przepływ zachodził w rurze poziomej o średnicy wewnętrznej 50,80 mm, wypełnionej pianą aluminiową (20PPI, $\varepsilon=0,876$) na długości 305 mm. Wyniki badań pozwoliły wyznaczyć warunki występowania 4 głównych reżimów przepływu cieczy przez piany metalowe:

- przepływ pre-Darcy – $Re < 0,4$;
- przepływ Darcy'ego – $1,2 < Re < 1,9$;
- przepływ Forcheimer'a – $6,4 < Re < 37,5$;
- przepływ turbulentny – $Re > 50$.

Jako kryterium podziału wykorzystano liczbę Reynoldsa zdefiniowaną równaniem (4.24). Ponadto wyróżniono też 3 reżimy przejściowe, występujące pomiędzy reżimami głównymi. Zidentyfikowane eksperymentalnie reżimy przepływu autorzy pracy [120] przedstawili na wykresie (rys. 4.7.) zredukowanych oporów przepływu $\Delta P/(\Delta L w)$

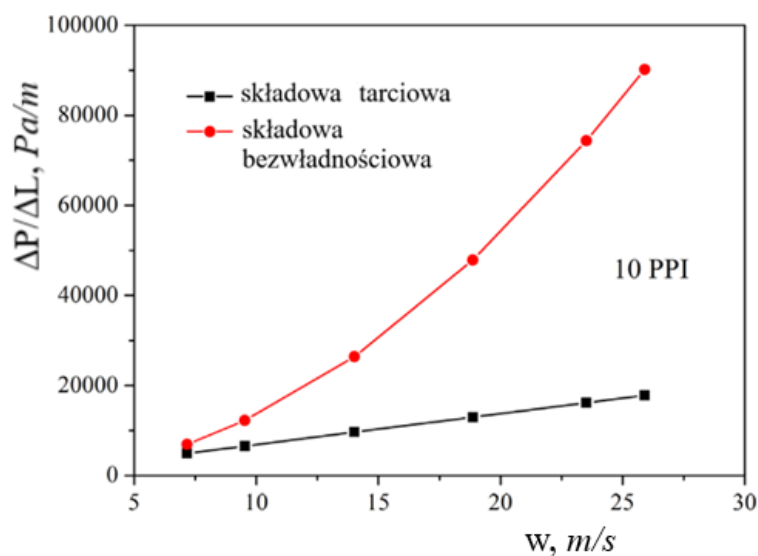
w funkcji średniej prędkości przepływu w_{sr} wody przez piany metalowe. Wykres ten stanowi interpretację równania (4.21).



Rys. 4.7. Zredukowane opory przepływu w funkcji średniej prędkości przepływu wody przez piany metalowe z rozróżnieniem zaobserwowanych reżimów przepływu, wg [120]

Autorzy prac [98,120,128] zauważyli też, że przepuszczalność i współczynnik Forcheimer'a danej piany metalowej są różne dla każdego reżimu przepływu. Zatem, także opory przepływu powinny być ustalane w sposób zależny od reżimu przepływu.

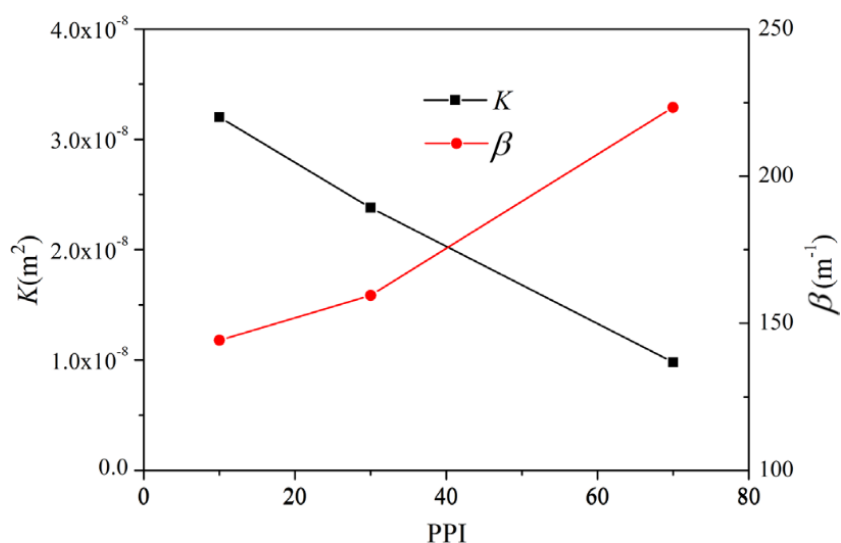
Z badań opisanych w pracach [98,130,131] wynika, że przy wyższych prędkościach przepływu gazu przez metale komórkowe składowa bezwładnościowa ma większy wpływ na całkowite opory przepływu niż składowa tarciova, rys. 4.8.



Rys. 4.8. Zależność członów równania (4.21) od prędkości przepływu gazu, wg [130]

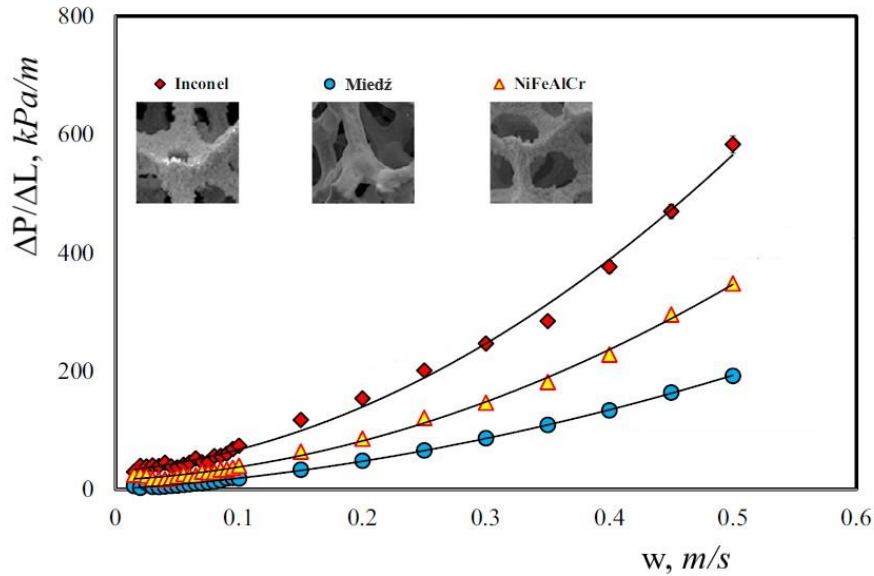
W związku z tym metody obliczania oporów przepływu przez piany metalowe opracowane na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych przy niskich prędkościach przepływu gazu, mogą okazać się nieodpowiednie do przewidywania tych oporów przy wysokich prędkościach przepływu gazu.

W wielu pozycjach literaturowych, m. in. w pracach [66,121,124,125,132] wykazano też, że wraz ze wzrostem porowatości piany opory przepływu zmniejszają się. Jednocześnie, autorzy pracy [121] zaznaczyli, iż przy porowatości powyżej 90% jej wpływ na opory przepływu jest niewielki, natomiast bardziej istotnym czynnikiem jest gęstość upakowania porów. Fakt ten potwierdzają prace [121], [122], [124–126], [130], [133], [134]. Wykazano w nich, że opory przepływu gazu przez piany metalowe są zależne od gęstości upakowania porów. Przepuszczalność maleje wraz ze wzrostem tej gęstości natomiast współczynnik inercji wzrasta, co przedstawiono w formie wykresu na rys. 4.9. Efekt ten wynika stąd, że wraz ze zmniejszaniem się rozmiarów porów zwiększa się powierzchnia właściwa piany.



Rys. 4.9. Zależność współczynników K i β od gęstości upakowania porów, wg [130]

Wpływ chropowatości powierzchni piany na charakter przepływu cieczy analizowano w pracy [98]. Jej autorzy w swoich badaniach wykorzystali trzy rodzaje pian: miedzianą (nisko chropowata), ze stopu NiFeAlCr (chropowata) oraz ze stopu Inconel (wysoko chropowata). W wyniku eksperymentów wykazali (rys. 4.10.) wyraźny wpływ chropowatości powierzchni piany na opory przepływu wody. Zwiększały się one wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni materiału, z którego była wykonana piana. Jednocześnie zaznaczono, że grubość włókien piany nie ma znaczącego wpływu na opory przepływu cieczy.



Rys. 4.10. Opory przepływu wody dla pian o różnej chropowatości ich powierzchni, wg [98]

Wpływ parametrów pian, determinowanych przez właściwości materiału, z jakiego piany te wykonano i/lub procesu ich wytwarzania (tj. chropowatość, rozmiar porów, kształt i średnica włókien), na opory przepływu jest coraz częściej rozpatrywany również na podstawie symulacji numerycznych. Dowodem tego mogą być prace [87,129,135].

Analiza literatury przedmiotu pozwala stwierdzić, że prowadzono intensywne badania zmierzające do ustalenia matematycznego opisu oporów przepływu jednofazowego przez piany metalowe. Przykładowo, autor pracy [136] zaadaptował równanie (4.21) w odniesieniu do przepływu gazu przez ziarniste złożę sfer do postaci

$$\frac{\Delta P}{L} = E_1 \frac{\eta(1-\varepsilon)^2 w}{\varepsilon^3 d_{cz}^2} + E_2 \frac{\rho(1-\varepsilon) w^2}{\varepsilon^3 d_{cz}} \quad (4.27)$$

zawierającej indywidualne dla danego przypadku stałe E_1 i E_2 . W ten sposób opisał opory przepływu płynu przez materiały porowate uwzględniając ich porowatość oraz wymiary charakterystyczne warstwy. Wówczas współczynniki przepuszczalności K i inercji β przyjmują następującą postać

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_{cz}^2}{E_1 (1-\varepsilon)^2}, \quad (4.28)$$

$$\beta = \frac{E_2 (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_{cz}}. \quad (4.29)$$

Stałe E_1 i E_2 są zależne od rodzaju materiału porowatego. Można je określić na podstawie pomiarów oporów przepływu gazu przez porowate medium o znanej porowatości i rozmiarze ziaren. Jednak w przypadku przepływu przez piany metalowe równanie (4.27) jest problematyczne w stosowaniu. Wątpliwości dotyczą wiarygodnego zdefiniowania parametru d_{cz} , gdyż ośrodek ten jest ciągłą strukturą włóknistą. W związku z tym w literaturze pojawiło się wiele definicji parametru d_{cz} oraz modyfikacji równania (4.27). W tabeli 4.4 zestawiono proponowane korelacje wraz z informacjami na temat warunków prowadzenia badań.

Tabela 4.4.

Adaptacje równania (4.27) do obliczania oporów przepływu przez struktury komórkowe

Źródło	Zakres badań	Korelacje	Nr równ.
[139] wg [130]	Piany ceramiczne: 30÷75 PPI, $\varepsilon=0,85\div0,89$; $w=0\div4$ m/s	$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \eta w}{\varepsilon^3 d^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho w^2}{\varepsilon^3 d},$ $d = 1,5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} d_{pm}$	(4.30)
[140] wg [130]	Piany ceramiczne: 8÷45PPI, $\varepsilon=0,76\div0,94$ $w=0\div5$ m/s	$\frac{\Delta P}{L} = 1,275 \cdot 10^9 \frac{(1-\varepsilon)^2 \eta w}{\varepsilon^3 d_{pm}^{0,05}} + 1,89 \cdot 10^4 \frac{(1-\varepsilon) \rho w^2}{\varepsilon^3 d_{pm}^{0,25}}$	(4.31)
[141]	Przepływ pionowy opadający w rurze, $w=0\div5$ m/s, $l=0,1$ m; piany ceramiczne: $d_{pw}=1100\div3700\pm50\mu\text{m}$, $\varepsilon=0,91\div0,915$	$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \eta w}{\varepsilon^3 d_{cz}^2} + 1,75 \frac{\rho(1-\varepsilon)w^2}{\varepsilon^3 d_{cz}}$ $d_{cz} = \frac{6}{4} d_s, \text{ gdzie } d_s = \frac{d_{pm} [(4/3\pi)(1-\varepsilon)]^{0,5}}{1 - [(4/3\pi)(1-\varepsilon)]^{0,5}}$	(4.32)
[122]	Przewód o przekroju kwadratowym ($a=10,16$ cm); piana aluminiowa: 10, 20PPI, $\varepsilon=0,68\div0,92$ $l=5,08$ cm	$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \frac{(1-\varepsilon)^2 \eta w}{\varepsilon^3 (1/a_v)^2} + \beta \frac{(1-\varepsilon) \rho w^2}{\varepsilon^3 (1/a_v)}$ $a_v^{10PPI} = 349,15 \ln(1-\varepsilon) + 1667,99$ $a_v^{20PPI} = 442,20 \ln(1-\varepsilon) + 2378,62$ $a_v^{40PPI} = 694,57 \ln(1-\varepsilon) + 3579,99$ α i β - stałe empiryczne	(4.33)
[66]	Przepływ poziomy w rurze ($d_w=0,1$ m), $w=0\div9$ m/s; piany ceramiczne: 10÷45PPI, $\varepsilon=0,75\div0,85$, $l=0,05$ m	$\frac{\Delta P}{L} = 110 \frac{\eta w}{\varepsilon d_h^2} + 1,45 \frac{\rho w^2}{\varepsilon^2 d_h}$ d_h wg równania (3.7) a_v wg równania (3.6)	(4.34)
[125]	Przepływ pionowy opadający w kanale o przekroju kołowym ($d_w=30$ mm), $w=0\div5,5$ m/s piana metalowa: 3,5, 4 i 6 CPI, $\varepsilon=0,799\div0,871$, $l=0,007$ m	$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \frac{a_v^2 (1-\varepsilon)^2 \eta w}{\varepsilon^3} + \beta \frac{a_v (1-\varepsilon) \rho w^2}{\varepsilon^3}$ a_v wg równania (3.5) $\alpha = \left[\left(\frac{1-0,971(1-\varepsilon)^{0,5}}{0,6164(1-\varepsilon)^{0,5}} \right) \varepsilon \right]^{-1}$ $\beta = \left[\left(\frac{1-0,971(1-\varepsilon)^{0,5}}{0,6164(1-\varepsilon)^{0,5}} \right) (1-\varepsilon) \right]$	(4.35)

Spośród metod obliczania oporów przepływu gazu przez piany metalowe zestaw równań (4.34) wyróżnia się najszerszym zakresem stosowalności, gdyż brak w nim parametrów empirycznych, a zależność oporów przepływu jest określana jedynie na podstawie dwóch łatwych do zmierzenia parametrów piany oraz typowych właściwości płynącego gazu.

W literaturze przedmiotu dostępne są również takie prace, których autorzy proponują obliczać opory przepływu gazu przez piany metalowe według różnych adaptacji równania

$$\frac{\Delta P}{L} = f \frac{w^2 \rho}{2\varepsilon^2 r_h} = \lambda \frac{w^2 \rho}{2\varepsilon^2 d_h} \quad (4.36)$$

W tabeli 4.5. zawarto równania wyrażające współczynnik tarcia bądź liczbę oporu przepływu oraz wymiar charakterystyczny wskazywane przez autorów prac [124,126,130,137] oraz [127].

Tabela 4.5.

Definicje parametrów równania (4.36)

Źródło	Zakres badań	Model obliczeniowy	Nr równ.
[137]	Przepływ poziomy w kanale prostokątnym 0,09x0,009 m piana aluminiowa: 10, 20 i 40 PPI, $\varepsilon=0,92$, $L=0,188$ m	$f = \frac{1}{ReDa} + \frac{C_E}{Da^{0,5}}$, $Re = \frac{wH\rho}{\eta}$, $Da = \frac{K}{H^2}$, $r_h = H$, H – wysokość piany = wysokość kanału	(4.37)
[124]	Przepływ poziomy w kanale prostokątnym 0,3x0,2 m piana aluminiowa: 5÷40PPI, $\varepsilon=0,903\div 0,956$, $L=0,1$ m	$f = \frac{1,765 Re^{-0,1014} \varepsilon^2}{PPI^{0,6}}$, $Re = \frac{w d_h \rho}{\eta \varepsilon}$, $d_h = \frac{2[(0,0254 / PPI) - t]l}{[(0,0254 / PPI) - t + l]}$, t, l – średnica i długość włókna	(4.38)
[126]	Przepływ poziomy w rurze o średnicy 0,1 m, $w=0\div 9$ m/s; piany ceramiczne i metalowe: 10÷40PPI, $\varepsilon=0,75\div 0,85$, $L=0,05$ m	$\frac{\Delta P}{L} = Hg \frac{\eta^2}{d_h^3 \rho}$ $Hg = 110 Re + 1,45 Re^2$, $Re = \frac{w d_h \rho}{\eta \varepsilon}$, d_h wg równania (3.7)	(4.39)
[130]	Przepływ poziomy w rurze o średnicy 0,1 m; piany metalowe: 10, 30 i 70PPI, $\varepsilon=0,93$, $L=0,40$ m	$f = \frac{1}{Re_k} + 0,024$, $Re_k = \frac{w \rho \sqrt{K}}{\eta}$, $d_h = \sqrt{K}$	(4.40)
[127]	Przepływ poziomy w rurze o średnicy 0,2 m; $w_g=0,028\div 2,39$ m/s; $w_c=0,006\div 0,061$ m/s; piany aluminiowe: 20PPI, 30PPI, 40PPI, $\varepsilon \approx 0,93$	$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_c = \lambda \frac{w_c^2}{2\varepsilon^2} \rho_c \frac{1}{d_h}$ $\left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{\Delta L}\right)_G = \lambda \frac{G_g^2}{A^2 \varepsilon^2} RT \frac{1}{d_h}$ $d_h = \frac{\varepsilon d_{pm}}{1 - \varepsilon}$, $\lambda = f(Re_f, \varepsilon, d_p, d_{pm})$	(4.41)

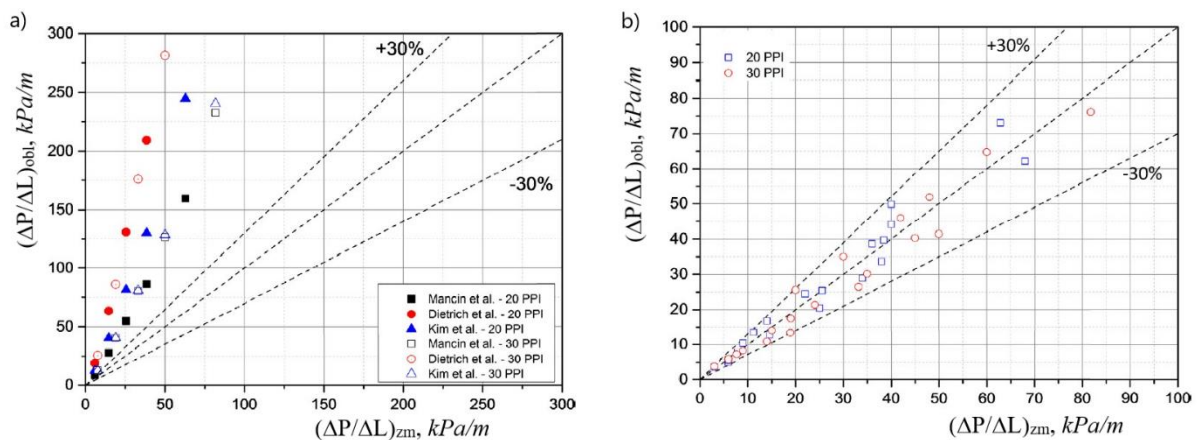
Niezależnie od autorów zestawu równań (4.38) ich metoda została zweryfikowana w pracy [138] ze skutkiem pozytywnym.

Autorzy pracy [93] przeprowadzili badania eksperymentalne dotyczące wymiany ciepła i oporów przepływu czynnika chłodniczego R245fa płynącego przez wypełniony pianą metalową mini-kanal o średnicy 4 mm. Do badań zastosowano dwie piany miedziane (20 PPI, 30 PPI, $\varepsilon=0,90$). W rezultacie otrzymali znacznie niższe wartości oporów przepływu, niż można było przewidywać na podstawie istniejących wcześniej korelacji, co zobrazowano na rys. 4.11a. Na podstawie otrzymanych wyników opracowali nową metodę obliczania oporów przepływu, modyfikując metodę proponowaną przez autorów pracy [124] i opisaną równaniem (4.38). Nie zmieniono definicji liczby Reynoldsa, natomiast przyjęto definiować średnicę hydrauliczną za autorami pracy [66], czyli jako

$$d_h = 0,028 \cdot PPI^{-0,721} . \quad (4.42)$$

Z kolei współczynnik tarcia zdefiniowano równaniem

$$f = \frac{4,5 Re^{-0,11} \varepsilon^2}{PPI^{0,7}} . \quad (4.43)$$



Rys. 4.11. Prognozowane straty ciśnienia, wg [93]:

- a) wg wcześniej istniejących korelacji,
 b) wg metody opracowanej dla przepływu w mini-kanalach

Jak wynika z wykresu pokazanego na rys. 4.11b., większość wartości oporów przepływu obliczonych zgodnie z metodą opracowaną dla przepływu cieczy przez piany metalowe w mini-kanalach odpowiadała danym eksperymentalnym. Na tej podstawie autorzy pracy [93] uznali, że zaproponowany model jest poprawny.

W literaturze przedmiotu można również napotkać prace poświęcone przepływowi cieczy przez wypełnienie strukturalne, czego przykładem może być praca

[142], czy też przez złożę usypane losowo, jak w pracy [143]. Tego rodzaju opracowania najczęściej dotyczą przeciwwądnego przepływu w kanałach pionowych, co jednak nie jest zagadnieniem związanym z niniejszą pracą.

4.3.2. Przepływ dwufazowy

Wśród publikacji poświęconych przepływowi układów wielofazowych przez piany metalowe zdecydowana większość dotyczy układu gaz-ciecz i była rozpatrywana zarówno w warunkach przepływu w kanałach poziomych [68], [75], [92], [97], [127], [144–146], jak i pionowych [60], [61], [147–149].

Autorzy pracy [75] badali hydrodynamikę przepływu jednofazowego wody i powietrza oraz jednoczesnego ich przepływu przez kilkanaście próbek piany metalowej o różnych parametrach (gęstość upakowania porów od 10 do 100 PPI; porowatość od 0,88 do 0,95) wykonanych z miedzi i różnych stopów niklu. W rezultacie wykazali, że włóknista struktura piany ma znaczący wpływ na hydrodynamikę przepływu, co bezpośrednio rzutuje na zjawiska ruchu ciepła. W dodatku stwierdzili, iż pożądane byłoby uwzględnienie właściwości materiału, z którego wykonana jest piana na zjawiska przepływowe.

Badania opisane w [144] prowadzono w celu lepszego poznania wpływu struktury piany na hydrodynamikę przepływu płynów. Analizowano względną przepuszczalność oraz współczynnik bezwładności podczas przepływu jednofazowego wody i powietrza oraz ich przepływu dwufazowego przez trzy rodzaje pian niklowych ($\varepsilon=0,93\div 0,97$) o grubości warstwy równej 1,6 mm oraz sprasowane do grubości 1,3 mm. Przedstawiono metodykę pomiaru współczynników przepuszczalności i bezwładności. Ich wartości zwykle są przybliżane metodami statystycznymi, podczas gdy ocena empiryczna pozwala dokładniej opisać opory przepływu płynu przez dany materiał porowaty. Analiza wyników wykazała, że mimo tego, iż sprasowanie piany skutkuje zmniejszeniem jej porowatości, to przepuszczalność i współczynnik bezwładności wzrastają. Autorzy podkreślili, że pomiar wartości wspomnianych współczynników podczas przepływu dwufazowego jest trudny do wykonania w pełnym zakresie nasycenia piany wodą¹.

W pracach [53,127] opisano wyniki badań przepływu jedno- i dwufazowego przez piany aluminiowe (20, 30 i 40 PPI, $\varepsilon\approx 0,93\div 0,94$). Przepływ odbywał się w rurze

¹ stosunek różnicy między objętością wody wprowadzonej do przestrzeni wypełnionej pianą a jej ilością odebraną po jej wypłynięciu do objętości niezajętej przez materiał stanowiący pianę

poziomej. Ustalono, że opory przepływu płynu przez piany metalowe są zależne od geometrii szkieletu piany, a w szczególności rozmiarów jej porów i kształtu struktury. Podczas eksperymentów nie zaobserwowano rozproszenia faz układu dwufazowego spowodowanego obecnością piany w rurze. Wskazano jednak na większy poślizg międzyfazowy w stosunku do przepływu przez pusty kanał. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano metodę wyznaczania oporów przepływu dwufazowego gaz-ciecz, a jej równanie ogólne zapisano jako

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{2F} = \left[\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_g + \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_c\right] \Phi_{\Delta P}, \quad (4.44)$$

w którym jednostkowe opory przepływu gazu $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_g$ i cieczy $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_c$ oblicza się zgodnie z zależnościami podanymi w zestawie równań (4.41). Z kolei parametr $\Phi_{\Delta P}$ zdefiniowano jako

$$\Phi_{\Delta P} = 1 + C \operatorname{Re}_c^{c_1} \operatorname{Re}_g^n \left[\left(\frac{\eta_c}{\eta_w} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_c} \right)^2 \right]^{c_2}, \quad (4.45)$$

gdzie wykładnik n wyznacza się zgodnie z zależnością

$$n = D \left(1 - \frac{1}{\lambda_c} \right)^{-1} \log \left[\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_c}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{GL}} \right]^{b_1} + B D a_c^{b_2}. \quad (4.46)$$

Stałe C , c_1 , i c_2 równania (4.45) oraz B , b_1 i b_2 równania (4.46) zależą od struktury przepływu, a ich wartości podano w pracy [127].

Autorzy pracy [145] badali hydrodynamikę przepływu jedno- i dwufazowego przez piany miedziane (30, 60 i 90 PPI, $\varepsilon=0,88$). Przepływ odbywał się w kanale o prostokątnym przekroju poprzecznym. Podobnie, jak w pracach dotyczących przepływu jednofazowego, m.in. [120,128], badacze zauważyli, iż w warunkach przepływu laminarnego współczynnik tarcia jest zależny głównie od liczby Reynoldsa oraz średniej średnicy porów piany. Natomiast wraz z dalszym wzrostem wartości Re współczynnik tarcia maleje. Osobliwość ta w największym stopniu ujawniła się w odniesieniu do piany o małej gęstości upakowania porów. W wyniku przeprowadzonych badań autorzy [145] zaproponowali nową korelację dla oporów przepływu dwufazowego gaz-ciecz w postaci

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{2F} = \frac{1}{x_{out}} \int_0^{x_{out}} \frac{f_c g^2 (1-x)^2 v_c (1-\varepsilon)}{d_h \varepsilon^3} \phi_f^2 dx, \quad (4.47)$$

gdzie f_c oznacza współczynnik tarcia dla jednofazowego przepływu cieczy przez pianę metalową i wyznacza się go zgodnie z równaniem

$$f_c = 5,598 \cdot 10^4 \frac{1-\varepsilon}{\text{Re}^{1,19}} d_{pm,sr}^{0,94} + 0,22, \quad (4.48)$$

w którym

$$\text{Re} = \frac{w d_h \rho}{\eta} (1-\varepsilon). \quad (4.49)$$

Z kolei poprawkę ϕ^2 zdefiniowano jako

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}, \quad (4.50)$$

gdzie stała C wyznaczana jest według równania

$$C = 0,025 g^{1,801} \exp(8,021x) d_{pm,sr}^{0,455}, \quad (4.51)$$

A parametr X zgodnie z zależnością

$$X = \left(\frac{\eta_c}{\eta_g}\right)^{0,5} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,5} \left(\frac{v_c}{v_g}\right)^{0,5}. \quad (4.52)$$

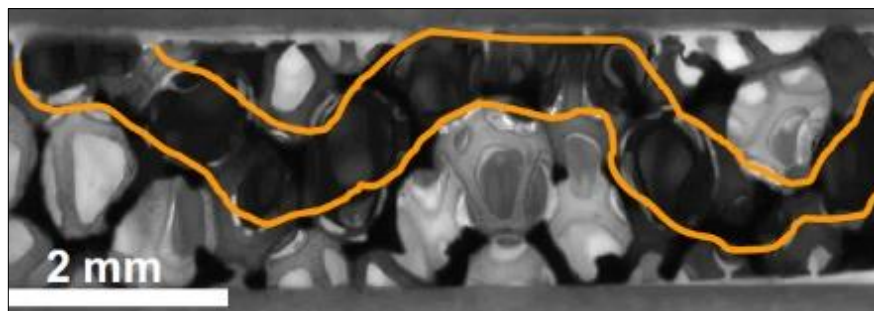
Z kolei średnicę hydrauliczną zdefiniowano jako

$$d_h = \frac{6}{a_v} = \frac{6}{\frac{4\varepsilon}{d_{p,sr}(1-\varepsilon)}}. \quad (4.53)$$

W pracach [145,150] jednoznacznie wykluczono możliwość obliczania oporów przepływu układów dwufazowych przy zastosowaniu zależności powszechnie znanych i uznawanych dla tego typu przepływu w pustej rurze (zarówno dla przepływu pionowego, jak i poziomego). Dodatkowo w pracy [78] wskazano, że korelacja (4.47) opracowana przez autorów [145] na podstawie pomiarów oporów przepływu wody przez piany metalowe nie pozwala na przewidywanie (z odpowiednią dokładnością) oporów przepływu przez te piany układów wielofazowych. Wniosek ten można traktować jako wskazówkę mówiącą o tym, że wybierając sposób obliczania oporów przepływu przez piany metalowe należy zwrócić szczególną uwagę na warunki dla jakich dana metoda została opracowana.

W pracach [68,146] badano hydrodynamikę przepływu układu dwufazowego w prostokątnym mini-kanale wypełnionym pianą niklowo-chromową (35, 45 i 55 PPI;

$\varepsilon=0,89\div 0,90$). Wykazano, że opory przepływu wzrastają liniowo wraz ze wzrostem prędkości przepływu zarówno cieczy, jak i gazu oraz nieliniowo wraz ze wzrostem gęstości upakowania porów w pianie. Rozpatrywano również wpływ lepkości fazy ciekłej na opory przepływu układu dwufazowego przez piany metalowe. W tym celu eksperymenty przeprowadzono stosując etanol i metanol, jako fazę ciekłą. Zgodnie z oczekiwaniami niższe opory przepływu rejestrowano wtedy, gdy fazę ciekłą stanowiła ciecz o niższej lepkości [68]. Podczas badań obserwowano także struktury przepływu dwufazowego. W wyniku analizy fotografii wnętrza kanału zauważono pulsacyjny charakter przepływu mieszaniny dwufazowej. Płynąca faza ciekła wypełniała całą objętość kanału, natomiast gaz płynął kanalikami tworzonymi przez kolejne pory piany (rys. 4.12.) [146]. Z punktu widzenia procesów związanych z wymianą masy lub ciepła jest to zjawisko niekorzystne, gdyż potencjalna powierzchnia wymiany nie jest w pełni wykorzystana.



Rys. 4.12. Wizualizacja struktury przepływu układu gaz-ciecz podczas rzutu gazu, wg [146]

Rezultatem badań opisanych w pracy [68] jest także zależność

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{2F} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_c \phi^2, \quad (4.54)$$

pozwalająca na wyznaczanie oporów przepływu dwufazowego gaz-ciecz przez piany metalowe. Równanie opisujące stałą C w poprawce ϕ^2 zdefiniowanej zgodnie z (4.50) przyjmuje postać

$$C = 121g^{0,54} \exp(9,90x)d_{pm,sr}^{0,68}, \quad (4.55)$$

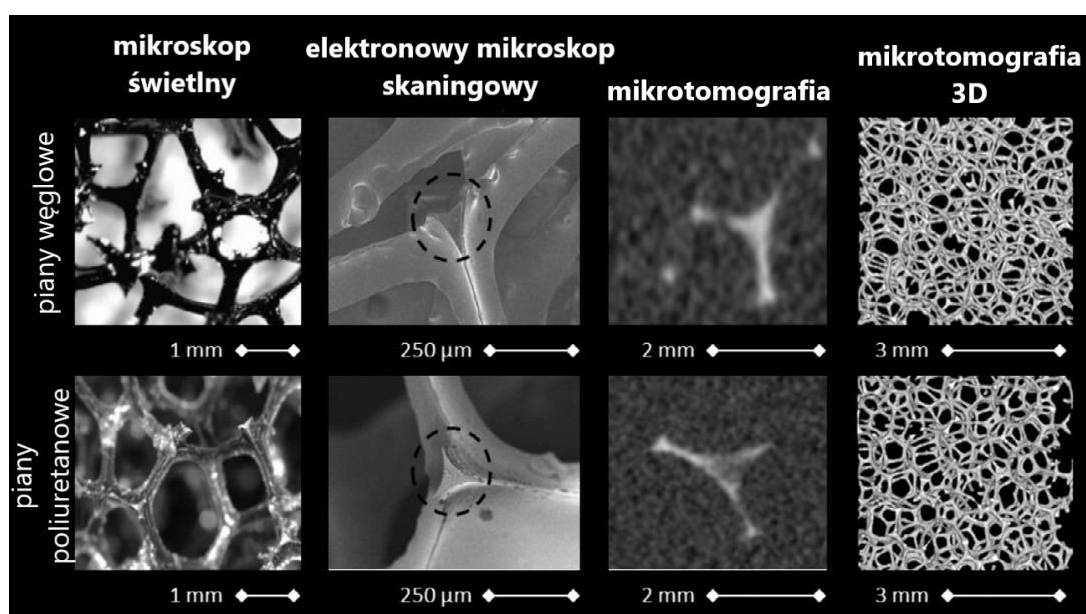
natomiast parametr X w poprawce ϕ^2 wyrażany jest zgodnie z zależnością (4.52).

W pracy [97] badano wpływ właściwości piany metalowej na opory przepływu powietrza wilgotnego. Do badań wykorzystano piany miedziane o gęstości upakowania porów 20 PPI i różnych porowatościach (85%, 90% i 95%). Część pian o takich samych cechach strukturalnych powleczono warstwą hydrofobową. W wyniku badań wykazano,

że piany hydrofobowe wywołują wyższe o od 3% do 163% opory przepływu niż piany niepowleczone o dokładnie takich samych parametrach. Rezultat ten tłumaczony jest większą ilością oraz większym rozmiarem kropeł kondensatu akumulowanego w pianie hydrofobowej. Badania pozwoliły również ustalić, że zmiana porowatości piany z 95% do 85% wywołuje wzrost oporów przepływu wilgotnego powietrza o 56÷162%.

Autorzy prac [61,147,150] prowadzili badania dotyczące zatrzymania cieczy (ang. *liquid holdup*) podczas pionowego przeciwnadciężkowego przepływu dwufazowego gaz-ciecz. W pracy [147] jako wypełnienie kolumny stanowiącej wymiennik masy, przez który przepływał układ woda-powietrze, wykorzystano piany aluminiowe (5÷40PPI). Analiza otrzymanych wyników wykazała, że w przeciwieństwie do innych wypełnień kolumny powierzchnia kontaktu faz ze wzrostem stopnia zatrzymania cieczy. Fakt ten stanowi znaczny atut dla stosowania tego rodzaju ośrodków porowatych.

Z kolei autorzy pracy [61], zgodnie z sugestią autorów [149], zastosowali w swoich badaniach (jako wypełnienie kolumny pionowej) piany poliuretanowe (10 i 20 PPI), imitujące piany węglowe (rys. 4.13.).



Rys. 4.13. Porównanie struktury piany węglowej i poliuretanowej, wg [61]

Wyniki badań pozwoliły wskazać na znaczący wpływ różnic strukturalnych pian poliuretanowych (a więc i węglowych) oraz aluminiowych i ceramicznych na wartość parametru *liquid holdup*. Rozmiar porów piany poliuretanowej jest bowiem większy, a grubość jej włókien mniejsza, w porównaniu do pian aluminiowych i ceramicznych

o tej samej wartości PPI. Różnica tych wymiarów sprawia, że mniejsza liczba kropelek wody jest zatrzymywana w pianie poliuretanowej. W wyniku tego piany poliuretanowe i węglowe cechuje mniejsze zatrzymanie cieczy. Autorzy pracy [61] analizowali także wpływ gęstości upakowania porów piany poliuretanowej na opory przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz. Analiza wyników wykazała znaczny wzrost tych oporów w przypadku piany o gęstości upakowania porów 20 PPI względem 10 PPI, przy wzroście prędkości przepływu gazu. Fakt ten tłumaczono tym, że piana 20 PPI ma mniejsze pory wypełnione cieczą, a jej wyparcie jest utrudnione ze względu na działanie sił kapilarnych. Dodatkowo, w pracy [61] zaproponowano korelację do obliczania oporów przepływu dwufazowego przez piany poliuretanowe, którą można zapisać jako

$$\frac{\Delta P}{\Delta L \rho_c \bar{g}} = a_1 \text{Re}_c^{b_1} \text{Re}_g^{c_1} \left(a_v d_{pm} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right)^{d_1}, \quad (4.56)$$

gdzie stałe a_1 , b_1 , c_1 i d_1 wyznacza się eksperymentalnie.

Pracę [150] poświęcono przepływowi wznoszącemu układu dwufazowego przez piany metalowe. Do badań wykorzystano piany Al-Si-Mg (20, 30 i 45 PPI), a układ dwufazowy tworzyły woda i powietrze. Wyniki badań okazały się dość osobliwe – opory przepływu układu dwufazowego malały wraz ze wzrostem natężenia przepływu gazu. Jako najbardziej prawdopodobny powód wystąpienia tego efektu podano porywanie kropelek wody przez coraz szybciej płynący gaz. Wskazano także na 30%-owy wzrost oporów przepływu przez pianę o 45 PPI względem piany o 30 PPI. Zaznaczono również, że nadal brak jest modelu pozwalającego na obliczanie z zadowalającą skutecznością oporów przepływu wznoszącego układu dwufazowego gaz-ciecz.

Autorzy pracy [60] na podstawie badań przeprowadzonych dla współprądowego przepływu w dół układu woda-powietrze w kolumnie wypełnionej pianą wykazali, że przy wysokich strumieniach przepływu wody i powietrza ujawniają się efekty wynikające ze ściśliwości gazu.

W pracach [78,151] rozpatrywano diabatyyczny przepływ czynnika chłodniczego zanieczyszczonego olejem w rurze wypełnionej pianą metalową. Podczas jego przepływu następuje częściowe odparowanie, jednak olej nie ulega żadnej przemianie fazowej. Wówczas przez kanał przepływowy płyną jednocześnie trzy fazy. Dla uproszczenia modelowania układ taki może być traktowany jako pseudodwufazowy, jednak trudność w opisie matematycznym hydrodynamiki przepływu stanowią wtedy zmienne w czasie udziały objętościowe poszczególnych faz.

Autorzy [78] wskazują, że olej obecny w płynącym układzie wielofazowym częściowo osadza się na włóknach piany, co powoduje dodatkowy wzrost oporów przepływu, zwiększających się wraz ze wzrostem gęstości upakowania porów. Natomiast wzrost stężenia pary czynnika chłodniczego (co jest równoznaczne ze zmniejszeniem udziału objętości i masy jego fazy ciekłej) obniża ten efekt. Badacze wskazują, że przyczyną tego jest wzrost turbulencji przepływu pary wraz ze wzrostem jej strumienia, co prowadzi do uformowania przepływu pierścieniowego. W tych warunkach może dochodzić do ponownego zmieszania osadzonych na włóknach piany kropelek oleju z ciekłą fazą czynnika chłodniczego.

W pracy [151] rozpatrywano wpływ średnicy rurki na opory jednoczesnego przepływu wrzącego czynnika chłodniczego i oleju. Zauważono, że podobnie jak w pracy [152] opory przepływu są mniejsze w rurce o mniejszej średnicy. Jednocześnie zasugerowano, że powodem tego może być fakt, iż przy ścianie kanału struktura piany jest uszkodzona: komórki nie są kompletne i może brakować niektórych włókien.

Nieco inne podejście zaprezentowano w pracy [92] opisującej wyniki badań wymiany ciepła i oporów przepływu w rurce poziomej wypełnionej pianą metalową w sposób pierścieniowy. Zaproponowano zależność

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_{2F} = \frac{1 - 1,6819 G_g^{1,0787} \cdot \exp(-0,0146x) \cdot d_{pm}^{1,7645} X + X^2}{X^2} \cdot \Delta p_{r,c}, \quad (4.57)$$

wyrażającą opory przepływu dwufazowego gaz-ciecz, gdzie parametr X zdefiniowany jest zgodnie z równaniem (4.52), natomiast wielkość $\Delta p_{r,c}$ opisano równaniem

$$\frac{\Delta p_{r,c}}{L} = a \frac{a_v^2 (1-\varepsilon)^2 \eta_c V}{\varepsilon^3} + b \frac{a_v (1-\varepsilon) \rho_c V^2}{\varepsilon^3}, \quad (4.58)$$

w którym stałe a i b wyznaczane są empirycznie.

Mimo podejmowania wielu prób matematycznego opisu hydrodynamiki przepływu płynów i układów wielofazowych przez piany metalowe, nadal brak jest jego jednoznacznego ujęcia matematycznego. Co więcej, jak dotąd brak jest jakichkolwiek prac odnoszących się do przepływu układu ciecz-ciecz przez piany. Zatem celowym wydaje się prowadzenie dalszych badań w tym zakresie, zarówno eksperymentalnych, jak i numerycznych.

5. Badania eksperymentalne

5.1. Stanowisko badawcze

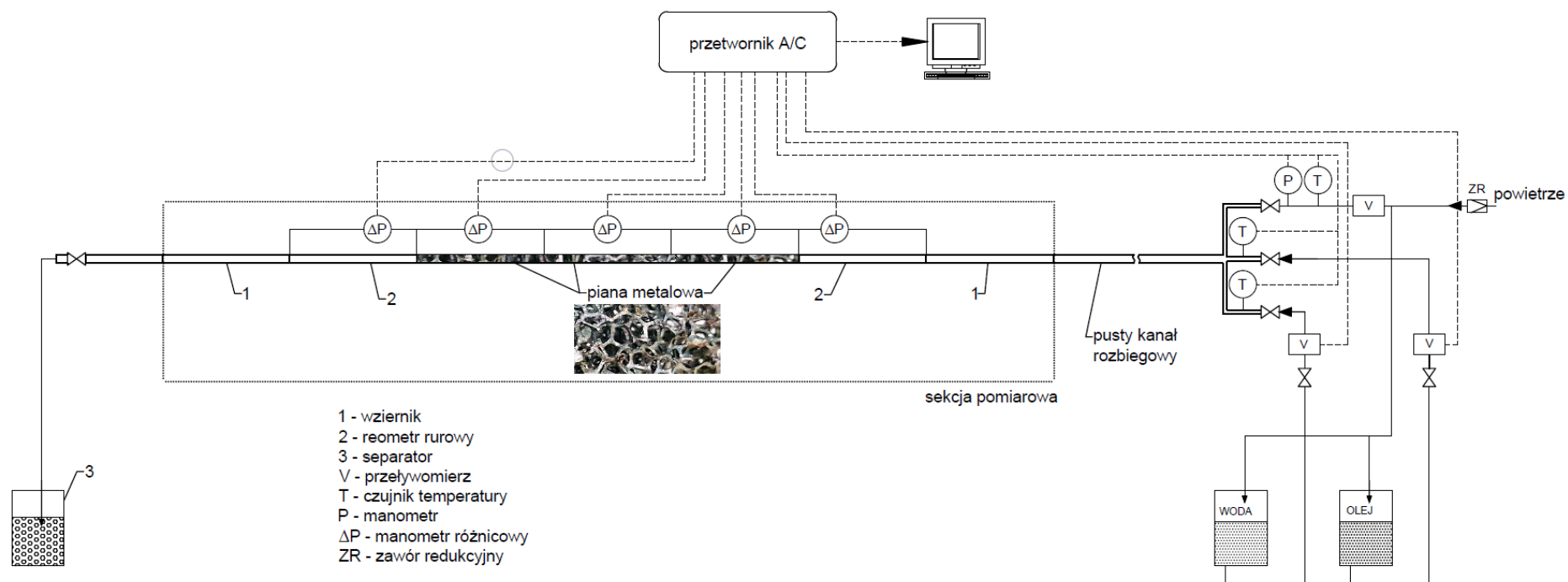
Prowadzenie eksperymentalnych badań laboratoryjnych wymagało zbudowania instalacji przepływowo-pomiarowej, która pozwoliłaby uzyskać zarówno pożądane dane ilościowe, jak też informacje jakościowe. Planując część eksperymentalną pracy założono, że konstrukcja i oprzyrządowanie pomiarowe instalacji przepływowej powinno zapewnić:

- stabilne wartości strumieni faz wprowadzanych do rury przepływowej,
- możliwość oceny właściwości reologicznych płynącej mieszaniny dwufazowej, a szczególnie jej lepkości,
- możliwość oceny wpływu obecności piany na zmiany rodzaju dwufazowej struktury przepływu, a szczególnie potencjalnego ewentualnego efektu trwałej emulgacji układu ciecz-ciecz,
- pomiar oporów przepływu przez umieszczone w rurze piany o różnych parametrach oraz przez odcinki o jej różnej długości,
- możliwie małe zużycie czynników roboczych (zwłaszcza czystego oleju) oraz łatwe zagospodarowanie mieszanin wytworzonych w trakcie badań (głównie wodno-olejowych),
- bieżącą akwizycję z powtarzalną dokładnością znacznej liczby wartości wielkości mierzonych.

Fotografia pokazana na rys. 5.1. ilustruje widok ogólny zbudowanej instalacji laboratoryjnej. Z kolei na rys. 5.2. przedstawiono schematycznie istotę jej konstrukcji i najważniejsze elementy składowe.

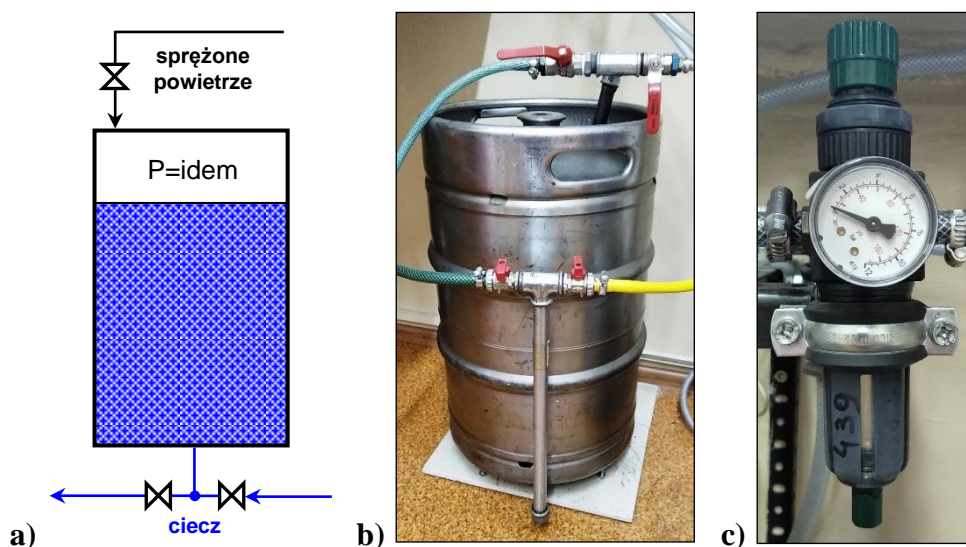


Rys. 5.1. Widok ogólny stanowiska wykorzystanego do prowadzenia badań eksperymentalnych



Rys. 5.2. Schemat stanowiska do badań oporów przepływu układów wielofazowych w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową

Ze względu na pulsacyjny charakter pracy pomp wyporowych oraz silną zależność wydajności pomp wirowych od ciśnienia panującego w ich króćcu tłocznym, w układzie zasilania instalacji wodą i olejem nie wykorzystano tego typu maszyn. W ich miejsce zdecydowano się zastosować napełniane okresowo zbiorniki, z których ciecze były wytłaczane sprężonym powietrzem o regulowanym ciśnieniu. Jego pożądaną, stałą wartość zapewniał zawór redukcyjny zabudowany w miejscu poboru sprężonego powietrza z sieci. Schemat ilustrujący istotę działania układu zasilania instalacji jedną z cieczy, rzeczywisty widok zbiornika oraz reduktora ciśnienia powietrza przedstawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Elementy układu tłoczenia wody do instalacji
a) schemat ideowy układu, b) widok rzeczywisty zbiornika, c) zawór redukcyjny zapewniający stałe ciśnienie powietrza zasilającego zbiornik

Olej wprowadzano do jego zbiornika okresowo, za pomocą pompy zębatej pobierającej tą ciecz bezpośrednio z opakowania handlowego (beczki). Z kolei zbiornik wody napełniany był z sieci wodociągowej. Jednak w celu odgazowania wody (co jest istotne w warunkach badania przepływów wielofazowych) była ona wcześniej przechowywana przez okres minimum kilku godzin w otwartym zbiorniku buforowym. Część badań eksperymentalnych dotyczyła przepływu dwufazowego typu gaz-ciecz. W tym przypadku fazę gazową stanowiło powietrze pobierane z sieci. Jego ciśnienie odpowiadało temu, które panowało w zbiornikach do tłoczenia obu cieczy. Zastosowane rozwiązanie pozwoliło uzyskać stałe i identyczne ciśnienie zasilania instalacji płynami roboczymi, a to z kolei wyeliminować pulsacje ciśnienia (będącego jedną z wielkości mierzonych) oraz ułatwić regulację ich strumieni, realizowaną za pośrednictwem ręcznie ustawianych zaworów iglicowych.

Do pomiaru wielkości strumieni płynów wprowadzanych do rury przepływowej wykorzystano różne przyrządy pomiarowe. W przypadku wody był to wirnikowy przepływomierz objętościowy do małych strumieni serii DPL firmy KOBOLD®, rys. 5.4.

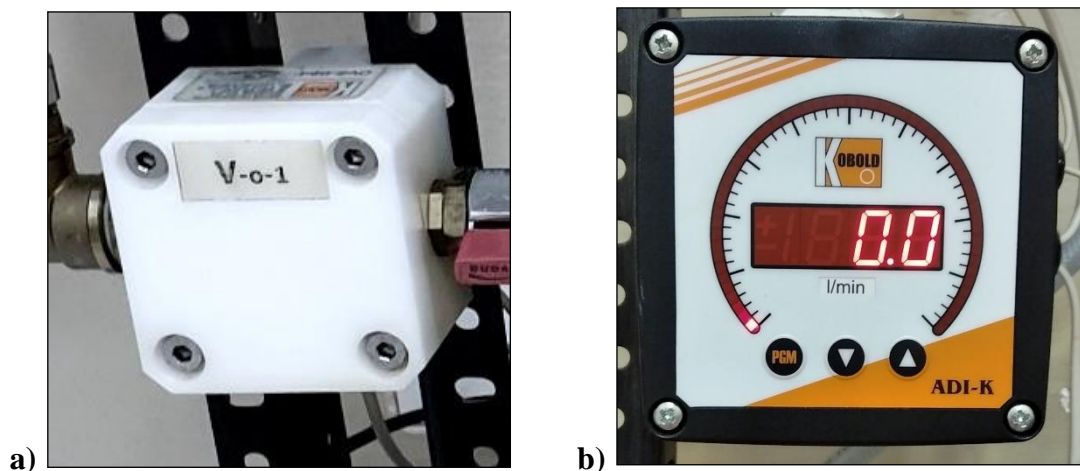


Rys. 5.4. Widok wykorzystanego przepływomierza wody

Jego zakres pomiarowy dla wody (wg danych producenta) mieścił się w przedziale od 0,05 do 1,8 dm³/min. Oprócz zintegrowanego wyświetlacza wartości mierzonej przyrząd ten generował proporcjonalny do strumienia analogowy sygnał elektryczny, co pozwalało na jego współpracę z przetwornikiem analogowo-cyfrowym, a w konsekwencji z opisanym w dalszej części pracy komputerowym systemem zbierania danych. Niezależnie od gwarancji producenta dotyczącej dokładności oraz liniowości charakterystyki przetwarzania przepływomierza (na poziomie $\pm 1\%$) wykonano w tym zakresie własne badania testowe. Do pomiaru strumienia wody rzeczywiście płynącej przez przepływomierz wykorzystano powszechnie znaną metodę wagową. Uzyskane dane pozwoliły opracować zależność funkcyjną wyrażającą związek pomiędzy mierzonym strumieniem cieczy a wartością sygnału elektrycznego generowanego przez przepływomierz (niezależnie od wskazań wyświetlacza). Rys. Z.1. przedstawiony w załączniku ilustruje wyniki przeprowadzonych testów. Okazało się też, że średni rozrzut punktów pomiarowych względem opracowanej funkcji mieści się w przedziale $\pm 2\%$.

Pomiar wielkości strumienia oleju realizowano przy wykorzystaniu przepływomierza owalno-kołowego typu OVZ, który współpracował z przetwornikiem sygnału impulsowego serii ADI. Producentem obu elementów tego zestawu

pomiarowego również była firma KOBOLD®, a ich rzeczywisty widok ilustrują fotografie pokazane na rys. 5.5.



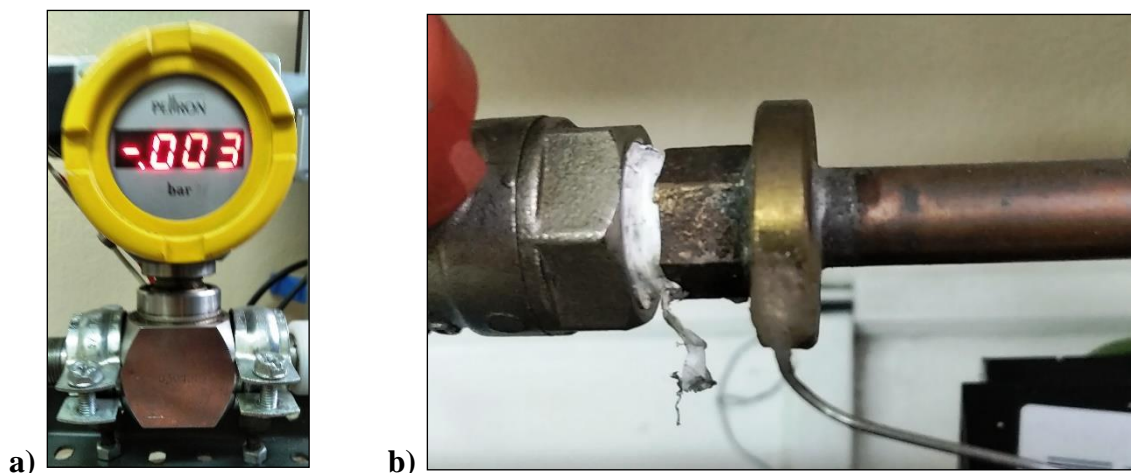
Rys. 5.5. Widok: a) przepływomierza owalno-kołowego oleju; b) przetwornika impulsowego sygnału pomiarowego

Przepływomierze owalno-kołowe są przyrządami dedykowanymi do pomiaru strumienia objętości cieczy o znacznej lepkości, m.in. olejów. W ich przypadku liczba impulsów odpowiadająca w danym czasie obrotom krzywek ograniczających objętość przestrzeni przepływowej wewnątrz przepływomierza może być łatwo zamieniona na ciągły analogowy sygnał elektryczny. Takie właśnie zadanie realizował przetwornik ADI, pełniąc jednocześnie funkcję wyświetlacza wartości mierzonego strumienia oraz generując standardowy sygnał napięciowy przekazywany do komputerowej karty pomiarowej. Deklarowany przez producenta zakres pomiarowy wykorzystanego przepływomierza mieścił się w przedziale $0,3 - 8 \text{ dm}^3/\text{min}$, a jego klasa dokładności wynosiła 2,5. Jednak niezależnie od tych informacji również w odniesieniu do tego przepływomierza wykonano odpowiednie pomiary testowe. Powtórnie wykorzystano metodę wagową i użyto oleju przewidzianego do prowadzenia zasadniczej części badań. Wykres ilustrujący charakterystykę przetwarzania zestawu do pomiaru strumienia oleju przedstawiono w załączniku, jako rys. Z.2. Wykonane pomiary i analiza ich wyników pozwoliły ustalić, że średni rozrzut punktów pomiarowych względem wartości wynikających z opracowanej funkcji wynosi $\pm 2\%$.

Trudności techniczne oraz ograniczenia natury finansowej sprawiły, że do pomiaru strumienia powietrza wprowadzanego do rury przepływowej w miejsce przetworników elektrycznych wykorzystano zestaw typowych rotametrów szklanych. Po uwzględnieniu warunków ich wzorcowania (100 kPa , 20°C), odczytywane wskazania przeliczano zgodnie z zależnością

$$V_p = 18,47 \sqrt{\frac{T_p}{P_p}} \cdot V_{p,R}, \quad (5.1)$$

w której: $V_{p,R}$ – wartość wskazywana przez rotametr, T_p i P_p – temperatura i ciśnienie powietrza płynącego przez rotametr. Ustawiane ręcznie wskazania rotametrów były zgodne z przyjętym planem badań i dlatego nie wymagały bieżącej, automatycznej akwizycji przez komputerowy system zbierania danych. Jednak wartość nadciśnienia powietrza i jego temperaturę mierzono równolegle z innymi parametrami dotyczącymi warunków pracy całej instalacji. Do pomiaru ciśnienia wykorzystano piezoelektryczny przetwornik firmy Peltron® o zakresie pomiarowym do 50 kP (0,5 bar) i klasie dokładności 0,5, rys. 5.6.a). Z kolei do pomiaru temperatury stosowano przetwornik wyposażony w termoparę typu K. Oba przyrządy na bieżąco współpracowały z komputerowym systemem zbierania danych.



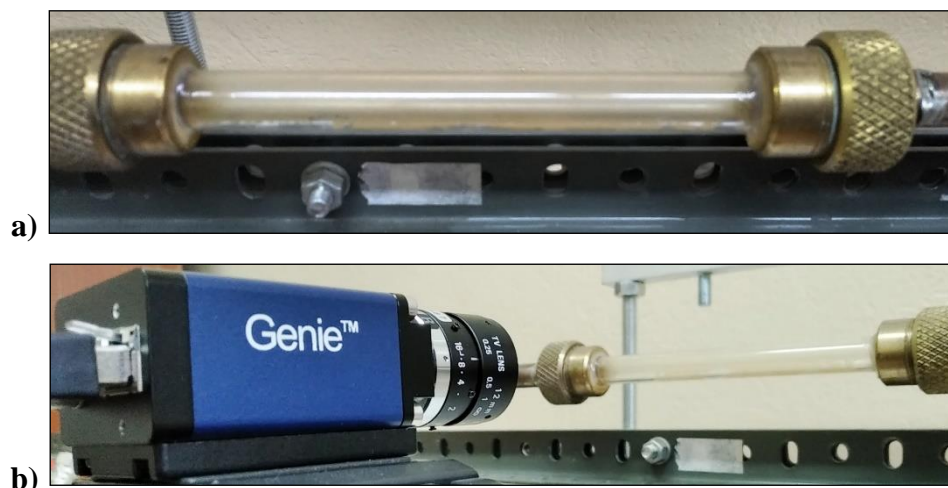
Rys. 5.6. Widok: a) piezoelektrycznego przetwornika ciśnienia powietrza; b) sposobu zabudowy termopary w ścianie rury

Charakterystyka przetwarzania przetwornika ciśnienia została ustalona eksperymentalnie. Wyniki testów ilustruje wykres pokazany w załączniku na rys. Z.3. Ponieważ okazało się, że opracowana funkcja matematyczna niemal idealnie odwzorowuje analizowany układ punktów, to jako niepewność pomiaru ciśnienia przyjęto wartość ± 250 Pa, wynikającą z klasy dokładności przetwornika i jego zakresu pomiarowego. Z kolei pomiar temperatury odbywał się z dokładnością $\pm 0,5^\circ\text{C}$, przy czym wartość ta dotyczyła zarówno powietrza, jak i obu cieczy. Ich temperaturę również mierzono z wykorzystaniem niezależnych przetworników oraz indywidualnych termopar, których sposób wprowadzenia do rury przepływowej był identyczny jak ten, który ilustruje rys. 5.6.b).

Zasadniczą częścią instalacji badawczej była pozioma rura miedziana o średnicy wewnętrznej 10 mm, do której kierowano określone (zgodnie z planem badań) strumienie płynów. Dobór średnicy rury nie był przypadkowy. Z jednej strony pozwalał ograniczyć zapotrzebowanie na ilość substancji koniecznej do uzyskania dużych prędkości (burzliwości) jej przepływu w pustej rurze. Natomiast z drugiej, średnica taka jest typowa dla rurek stosowanych w wysokowydajnych wymiennikach ciepła, np. parowniki urządzeń chłodniczych lub powietrzne pompy ciepła.

Mieszanie faz w rurze instalacji przepływowej następowało w sposób spontaniczny. W celu ustabilizowania przepływu, a zwłaszcza zapewnienia możliwości ukształtowania się charakterystycznej dla danych warunków struktury dwufazowej, początkowa część rury przepływowej stanowiła tzw. odcinek rozbiegowy instalacji. Jego względna długość odpowiadała relacji $L/d=50$, co uznano za warunek wystarczający.

Jednym z założonych celów planu badań była ocena wpływu obecności piany w rurze na zaburzenia struktur przepływu dwufazowego. Z tego względu za odcinkiem rozbiegowym rury oraz za odcinkiem rury wypełnionej pianą zamontowano wzierniki umożliwiające obserwację struktur. Wykonano je z przezroczystej rurki o średnicy wewnętrznej 10 mm i długości ok. 10 cm, przy czym przyjęty sposób ich połączenia z rurą przepływową nie wywoływał zaburzenia struktur. Rzeczywisty widok jednego z tych wzierników ilustruje rys. 5.7.a).

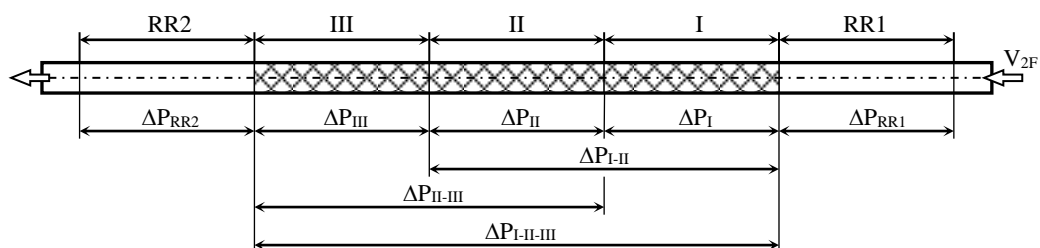


Rys. 5.7. Widok: a) wziernika do obserwacji dwufazowych struktur przepływu oraz b) tzw. „szybkiej kamery” do ich rejestracji

Ze względu na stosunkowo małą długość wzierników oraz często znaczną prędkość przepływu mieszaniny dwufazowej, do wspomaganie prowadzonych obserwacji

struktur wykorzystano „szybką kamerę” Genie™ HM1024 firmy DALSA, rys. 5.7.b). Na jej wyposażeniu znajdował się zestaw dedykowanych obiektywów PENTAX. Analiza uzyskanych fotografii ułatwiała jakościową ocenę zmiany stopnia rozproszenia faz w układzie dwufazowym, który przepłynął przez warstwę piany. Poza tym, możliwość szczegółowej analizy obrazów zarejestrowanych dla mieszanin wody i oleju pozwalała również identyfikować układy emulsyjne. W ich przypadku zanikają bowiem wyraźne, duże formy fazy rozproszonej (krople lub korki), a cała mieszanina staje się nieprzeźroczystą przyjmując mlecznobiałą barwę.

Kolejnym elementem instalacji przepływowej były sekcje do pomiaru oporów przepływu. Wykonano je z jednego odcinka rury, na którym wydzielono pięć fragmentów o takiej samej relacji $L/d=15$. Przyjęte oznaczenia kolejnych sekcji (zgodne z kierunkiem przepływu) ilustruje schemat pokazany na rys. 5.8.



Rys. 5.8. Oznaczenia sekcji rury, na których mierzono opory przepływu

Niewypełnione pianą, skrajne sekcje (RR1 i RR2) pełniły rolę przepływowych reometrów rurowych. Jak wskazano w pracy [153], jedynie wykorzystanie tego rodzaju przyrządów pomiarowych daje bowiem realną możliwość eksperymentalnej oceny właściwości reologicznych niestabilnej mieszaniny dwufazowej płynącej w rurze. Szczególnie istotna jest ich lepkość, rozumiana w tym przypadku jako tzw. lepkość przy ścianie i ustalana wg zależności

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} = \frac{\Delta P \cdot d}{\frac{4L}{8w} \cdot \frac{\pi \cdot d^4}{128L} \frac{\Delta P}{V}} \quad (5.2)$$

Jej szczegółową postać, obowiązującą dla rozważanej instalacji, można było zapisać jako

$$\eta = 1,636 \cdot 10^{-9} \frac{\Delta P_{RR}}{V_{2F}}, \quad (5.3)$$

gdzie symbolem ΔP_{RR} oznaczono opór przepływu substancji przez rurę reometru, a V_{2F} to strumień objętości mieszaniny dwufazowej. Wykorzystanie dwóch reometrów (dwie

sekcje skrajne) dawało potencjalną możliwość oceny zmian lepkości mieszaniny dwufazowej, wywołaną jej przepływem przez warstwę piany.

Trzy środkowe sekcje rury (oznaczone na rys. 5.8. zgodnie z kierunkiem przepływu jako I, II i III) zostały wypełnione pianą metalową. Z uwagi na brak możliwości zakupu piany w postaci gotowego wyrobu o ściśle określonych wymiarach, jej warstwę tworzyło kilka walcowych elementów. Wycięto je z płaskiej płyty (rys. 5.9.), stosując precyzyjną metodę obróbki elektrodrażeniowej z wykorzystaniem elektrody drutowej.



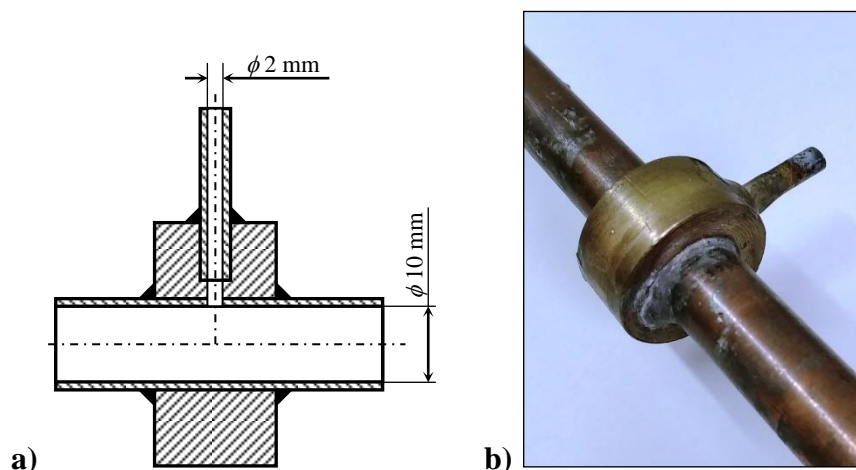
Rys. 5.9. Postać wyrobu handlowego jednej z wykorzystanych pian metalowych

Uzyskane w ten sposób walcowe elementy piany o średnicy 10 mm zostały kolejno wsunięte do wnętrza rury na odpowiednią głębokość, rys. 5.10.



Rys. 5.10. Walcove elementy przygotowanej do montażu piany metalowej a) oraz poglądowy widok piany wypełniającej rurę b)

Pomiar oporów przepływu wymagał zabudowania w ścianie rury odpowiednio rozmieszczonych króćców impulsowych pomiaru ciśnienia. Ze względu na jej stosunkowo niewielką grubość (rzędu 1 mm) zadanie to zrealizowano wykorzystując dodatkowy pierścień wzmacniający, co ilustruje rys. 5.11.

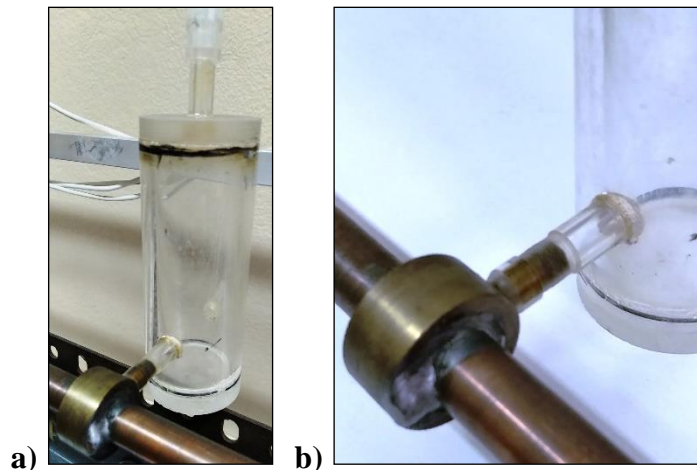


Rys. 5.11. Schemat a) oraz widok rzeczywisty b) sposobu wykonania jednego z króćców impulsowych pomiaru ciśnienia

Sam króciec stanowiła krótka rurka o średnicy wewnętrznej 2 mm. Taka też była średnica otworu, który po połączeniu pierścienia i rurki impulsowej z rurą przepływową ostatecznie wywiercono w jej ścianie. Warto przypomnieć, że średnica wewnętrzna rury przepływowej wynosiła jedynie 10 mm. Pierścienie oraz rurki impulsowe króćca wykonano z mosiądzu, co pozwoliło na drodze lutowania miękkiego trwale połączyć wszystkie elementy z miedzianą rurą. Sekcja pomiaru oporów przepływu była elementem wymiennym instalacji. Wykonano ją w identyczny sposób dla każdej piany przewidzianej do wykorzystania w trakcie badań eksperymentalnych.

Z kolei zestaw elektrycznych przetworników mierzonej różnicy ciśnień był stałym elementem wyposażenia instalacji. Do rury podłączono je za pomocą elastycznych przewodów impulsowych. Jednak mając na uwadze podawane w literaturze zalecenia dotyczące sposobu realizacji pomiaru oporów przepływu mieszanin wielofazowych, połączenia króćców impulsowych z przetwornikami ciśnienia wykonano za pośrednictwem indywidualnych separatorów faz, rys. 5.12. Korzyści wynikające z takiego rozwiązania szczegółowo opisuje autor pracy [153]. Głównym celem stosowania separatorów jest eliminacja efektu wypełniania się przewodów impulsowych płynącą w rurze pomiarowej mieszaniną dwufazową. Jej skład jest w tym miejscu układ pomiarowy wielkością zupełnie nieznaną, co jest źródłem błędów pomiaru ciśnienia rejestrowanego przez przyrząd pomiarowy. Przy zastosowaniu separatora przewód impulsowy jest w całości wypełniony gazem, co dodatkowo zabezpiecza sam przetwornik ciśnienia przed kontaktem z cieczą. Warto zauważyć, że większość precyzyjnych elektronicznych przetworników ciśnienia

o stosunkowo niewielkim zakresie pomiarowym (a właśnie takie wykorzystano podczas własnych eksperymentów) to przyrządy, które mogą być stosowane tylko w odniesieniu do gazów. Kontakt ich czujnika z cieczą może prowadzić do niepoprawnych wskazań, a nawet trwałego uszkodzenia całego miernika.



Rys. 5.12. Widok a) separatora impulsowego oraz b) sposobu jego podłączenie do rury przepływowej

Do pomiaru spadków ciśnienia w kolejnych sekcjach rury przepływowej (rys. 5.8.) wykorzystano pięć niezależnych elektronicznych przetworników różnicy ciśnień o symbolu DPC7000-D. Są one oferowane przez polską firmę HotCold s.c. jako precyzyjne przyrządy dedykowane dla nieagresywnych gazów i charakteryzujące się regulowanym (ustawialnym) zakresem pomiarowym. Rzeczywisty widok jednego z przetworników ilustruje fotografia pokazana na rys. 5.13.



Rys. 5.13. Widok jednego z przetworników różnicy ciśnień wchodzącego w skład układu do pomiaru oporów przepływu

Według danych producenta, maksymalny zakres pomiarowy każdego przetwornika zawierał się w przedziale 0-7000 Pa, a klasa jego dokładności wynosiła 0,25. Tym samym należało oczekiwać niepewności wskazań na poziomie $\pm 17,5$ Pa,

niezależnie od wybranego rzeczywistego zakresu. Równocześnie każdy z przetworników generował analogowy, proporcjonalny do wartości mierzonej wielkości, sygnał elektryczny o standardowym napięciu 0-10 V. Niezależnie od tych informacji, każdy z przetworników poddano jednak własnym badaniom testowym. Jako wzorzec ciśnienia wykorzystano U-rurkę wypełnioną wodą, podłączoną wraz ze źródłem sprężonego powietrza do odpowiedniego króćca przetwornika różnicy ciśnień. Drugi króciec pozostawał otwarty do otoczenia. Wyniki wykonanych pomiarów pozwoliły opracować charakterystyki przetwarzania wszystkich przyrządów i połączonych elektrycznie z rzeczywistym torem pomiarowym. Wykresy ilustrujące wyniki testowania przetworników (oznaczonych zgodnie z symbolami na rys. 5.8.) przedstawiono w załączniku, jako rys. Z.4-Z.8. Zestawienie równań reprezentujących charakterystyki przetwarzania wszystkich mierników ciśnienia, a także opisanych wcześniej przepływomierzy cieczy oraz manometru powietrza, zawarto w tabeli 5.1. Podano w niej także zakres generowanego napięcia oraz średni rozrzut wartości zmierzonych względem obliczanych wg kolejnych równań.

Tabela 5.1.

Opracowane charakterystyki przetwarzania przyrządów pomiarowych

Przetwornik	Równanie	Zakres napięcia	Rozrzut
ΔP_{RR1}	$\Delta P_{RR1} = 391,56 \cdot U + 0,9573$ [Pa]	$U = 0 - 10$ V	$\pm 2\%$
ΔP_I	$\Delta P_I = 697,04 \cdot U$ [Pa]	$U = 0 - 10$ V	$\pm 2\%$
ΔP_{II}	$\Delta P_I = 691,20 \cdot U$ [Pa]	$U = 0 - 10$ V	$\pm 2\%$
ΔP_{III}	$\Delta P_I = 684,61 \cdot U$ [Pa]	$U = 0 - 10$ V	$\pm 2\%$
ΔP_{RR2}	$\Delta P_{RR2} = 390,29 \cdot U - 7,1471$ [Pa]	$U = 0 - 10$ V	$\pm 2\%$
V_w	$V_w = 0,2549 \cdot U - 0,3548$ [dm ³ /min]	$U = 0 - 5$ V	$\pm 2\%$
V_{ol}	$V_{ol} = 0,5710 \cdot U$ [dm ³ /min]	$U = 0 - 10$ V	$\pm 1\%$
P_p	$P_p = 5000,6 \cdot U + 256,2$ [Pa]	$U = 0 - 10$ V	$\pm 0,5\%$

Ostatecznie, opracowane równania zostały wprowadzone do komputerowego systemu zbierania danych. Tym samym stanowiły elementy procedury, która w czasie rzeczywistym przeliczała na wartości wielkości mierzonej elektryczne sygnały analogowe generowane przez przetworniki. Dzięki wykorzystaniu ściśle dedykowanych dla termopar typu K przetworników temperatury firmy CZAKI® Thermo-Product, jako ich charakterystyki przetwarzania wykorzystano wprost informacje podane przez producenta. Poprawność pomiarów temperatury na poziomie $\pm 0,5^\circ\text{C}$ potwierdzono w trakcie testów instalacji.

Sygnaly ze wszystkich przetworników wielkości mierzonych były zbierane, przetwarzane i archiwizowane w komputerowym systemie pomiarowym. Jednym z jego elementów był zestaw dwóch kart pomiarowych, czyli przetworników analogowo-cyfrowych zabudowanych w dedykowanym i odpowiednio oprogramowanym komputerze klasy PC. Wykorzystano karty 12 bitowe, co oznaczało, że wybrany zakres dopuszczalnych zmian analogowego sygnału wejściowego danego kanału pomiarowego był dzielony na $2^{12}=4096$ poziomów. Zatem dla zakresu 0-10 V było to odpowiednio 2,44 mV, natomiast 1,22 mV dla zakresu 0-5 V, przy którym pracował jeden z przetworników (przepływomierz wody). Wskazane wartości poziomów napięcia wraz z charakterystykami przetwarzania podanymi w tabeli 5.1. pozwalają ustalić rozdzielczość pomiaru poszczególnych wielkości. W tym celu wykorzystano metodę różniczki zupełnej, a uzyskane wartości zestawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2.

Ocena niepewności wartości uzyskiwanych danych pomiarowych

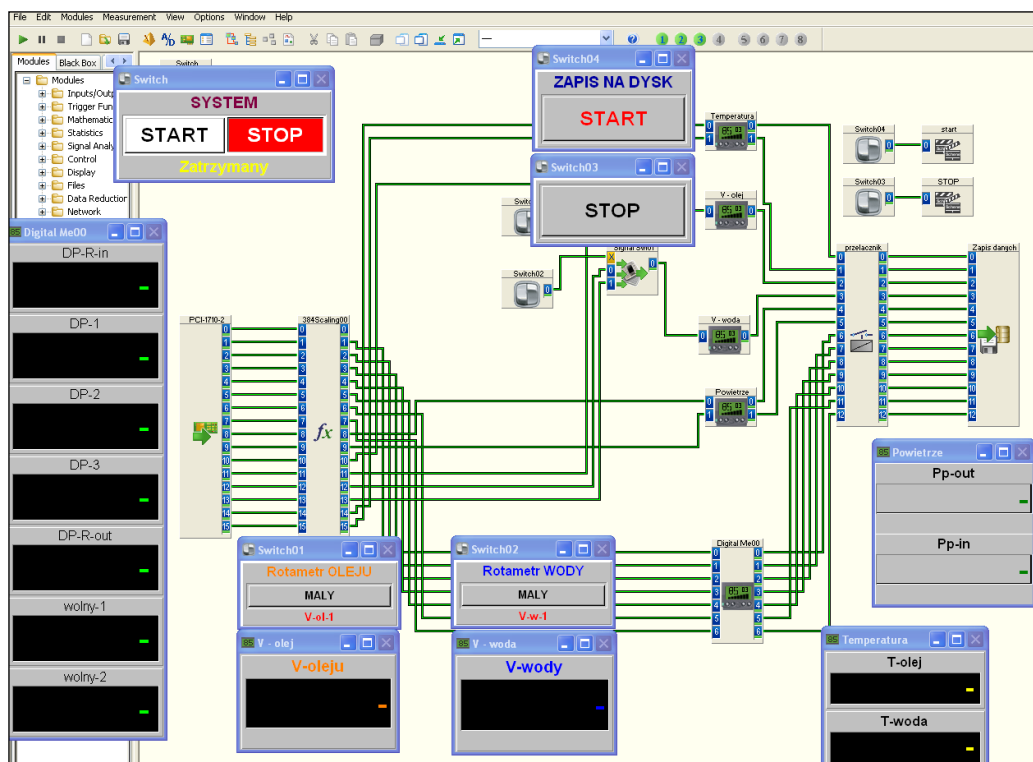
Przetwornik	Rozdzielczość pomiaru	GZP	KD	RP
ΔP_{RR1}	$\pm 0,95$ [Pa]	4000 [Pa]	0,25	$\pm 2\%$
ΔP_I	$\pm 1,70$ [Pa]	7000 [Pa]	0,25	$\pm 2\%$
ΔP_{II}	$\pm 1,68$ [Pa]	7000 [Pa]	0,25	$\pm 2\%$
ΔP_{III}	$\pm 1,67$ [Pa]	7000 [Pa]	0,25	$\pm 2\%$
ΔP_{RR2}	$\pm 0,96$ [Pa]	4000 [Pa]	0,25	$\pm 2\%$
V_w	$\pm 0,31 \cdot 10^{-3}$ [dm ³ /min]	1,8 [dm ³ /min]	2,5	$\pm 2\%$
V_{ol}	$\pm 1,39 \cdot 10^{-3}$ [dm ³ /min]	8,0 [dm ³ /min]	2,5	$\pm 1\%$
P_p	$\pm 12,2$ [Pa]	50 000 [Pa]	0,5	$\pm 0,5\%$

Uwzględniając podane w niej górne zakresy pomiarowe (GZP), klasy dokładności (KD) poszczególnych mierników oraz średni rozrzut ich charakterystyk przetwarzania (RP) należy uznać, że tor elektryczny nie wnosił istotnych niepewności do wartości mierzonych. Zatem jako dokładność pomiaru poszczególnych wielkości przyjęto wartości odpowiadające średniemu rozrzutowi punktów dla ustalonych eksperymentalnie charakterystyk przetwarzania odpowiednich mierników.

Warto jednak zauważyć, że ze względu na sposób realizacji pomiaru oporów przepływu przez sekcje rury wypełnionej pianą (patrz rys. 5.8), niepewność wartości ΔP_{I-II} , ΔP_{II-III} oraz $\Delta P_{I-II-III}$ należy odpowiednio zsumować z uwzględnieniem cech metrologicznych kolejnych przetworników różnicy ciśnień.

Do bieżącej wizualizacji i archiwizacji danych pomiarowych wykorzystano autorską procedurę komputerową. Napisano ją w programie *DASYLab*[®], dedykowanym przez firmę *measX GmbH & Co. KG* do tworzenia aplikacji pomiarowych.

Zrzut ekranu ilustrujący widok okna dialogowego stworzonej aplikacji przedstawiono na rys. 5.14.



Rys. 5.14. Widok okna oprogramowania pomiarowego

Jak z niego wynika, procedura pozwalała na bieżąco śledzić wartości poszczególnych parametrów, a po ich ustabilizowaniu archiwizować dane na dysku komputera. Dane były zbierane i zapisywane równoległe ze wszystkich kanałów pomiarowych przez okres 10 s z częstotliwością co 0,5 s. Jako wartość końcową danej wielkości przyjmowano jej średnią arytmetyczną (z 20 punktów) dla danej serii pomiarów.

Ostatnim elementem rury przepływowej (zgodnie ze schematem na rys. 5.2.) był jej krótki odcinek wylotowy zakończony zaworem dławiącym. Jego zadaniem było zapewnienie ciśnieniowego charakteru przepływu mieszaniny dwufazowej w rurze poziomej, zwłaszcza w odniesieniu do układów typu gaz-ciecz. Poza tym, na etapie testowania instalacji zawór ten pełnił również funkcję elementu odcinającego połączenie z otoczeniem, co wykorzystano podczas prób szczelności i wzorcowania przyrządów do pomiaru ciśnienia.

Mieszaninę dwufazową opuszczającą instalację przepływową kierowano do otwartego grawitacyjnego separatora zbiornikowego. W przypadku układów typu gaz-ciecz, oddzielona w nim woda ostatecznie trafiała do kanalizacji. Z kolei czysty olej był

pobierany do buforowego zbiornika magazynowego, przetrzymywany w nim w celu ewentualnego odgazowania, a następnie powtórnie wykorzystywany do prowadzenia badań. Nieco większą trudność sprawiało zagospodarowanie mieszanin wodno-olejowych. W ich przypadku po okresie kilkudniowego przebywania w separatorze niemal cała warstwa wody była z niego usuwana do kanalizacji, natomiast olej wraz z pozostałą częścią nieoddzielonej wody zlecano do utylizacji specjalistycznej firmy zewnętrznej.

5.2. Charakterystyka pian metalowych wykorzystanych

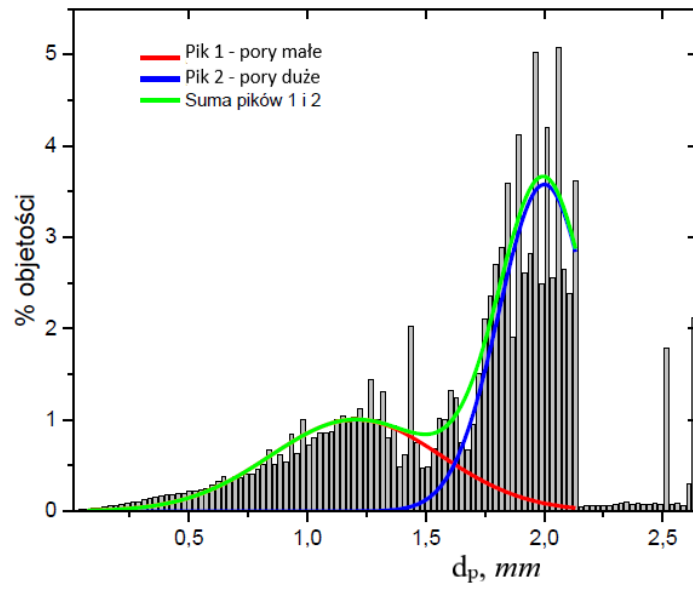
Do prowadzenia badań eksperymentalnych wykorzystano dwa rodzaje pian aluminiowych ze stopu Al 6101 oraz pianę wykonaną z niklu. Charakteryzowały się one strukturą o komórkach otwartych. Piany aluminiowe różniły się między sobą rozmiarem i gęstością upakowania porów, która zgodnie z zapewnieniami producentów była równa 20 PPI i 40 PPI, natomiast średnia gęstość upakowania porów piany niklowej wynosiła 20 PPI. Dla ułatwienia organizacji i zapewnienia przejrzystości dokumentacji badawczej przyjęto następujące oznaczenia:

- **Al40** – piana aluminiowa o średniej gęstości upakowania porów 40 PPI;
- **Al20** – piana aluminiowa o średniej gęstości upakowania porów 20 PPI;
- **Ni20** – piana niklowa o średniej gęstości upakowania porów 20 PPI.

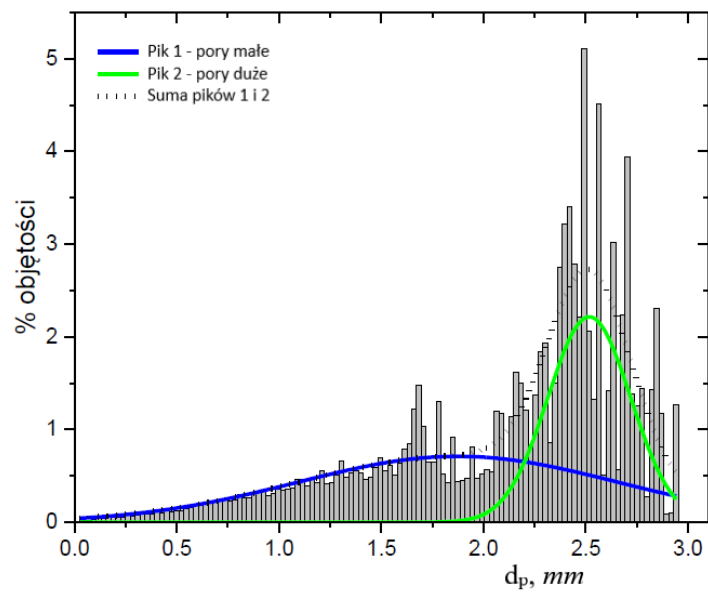
Dokonując wyboru pian kierowano się powszechnością ich praktycznego stosowania oraz możliwością dokonania oceny jakościowej i ilościowej wpływu parametrów struktury piany oraz rodzaju materiału z jakiego jest ona wykonana na zjawiska, jakie towarzyszą przepływowi płynów przez piany metalowe. Szczególny nacisk położono przy tym na opory przepływu.

Na potrzeby właściwej interpretacji wyników badań zlecono firmie zewnętrznej wykonanie analizy tomograficznej struktury każdej z pian.

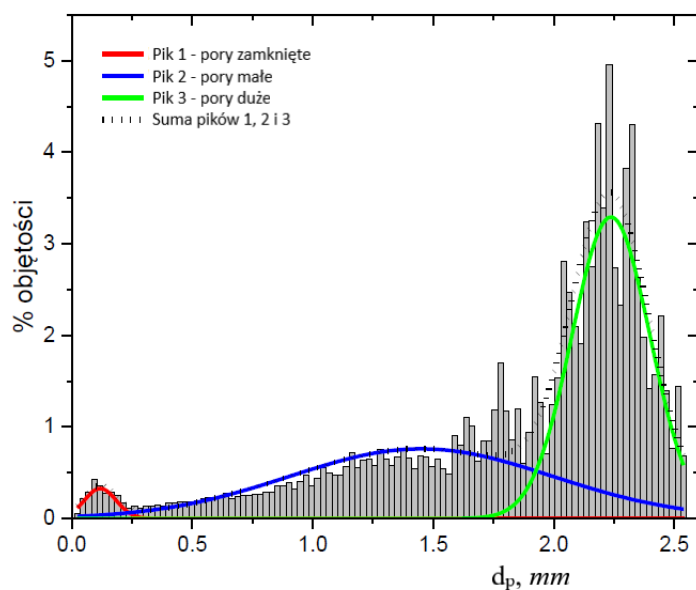
Rozkład średnic porów w każdej z pian przedstawiono w postaci histogramu na rys. 5.15.÷5.17.



Rys. 5.15. Rozkład średnic porów w strukturze piany Al40.



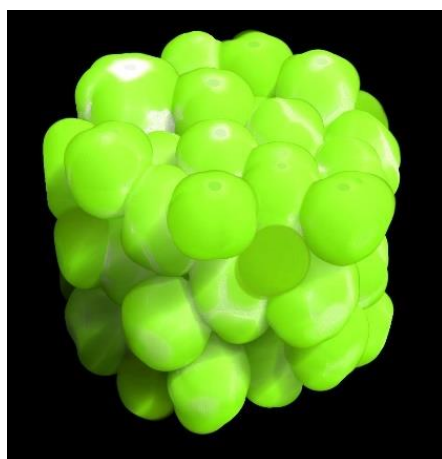
Rys. 5.16. Rozkład średnic porów w strukturze piany Al20.



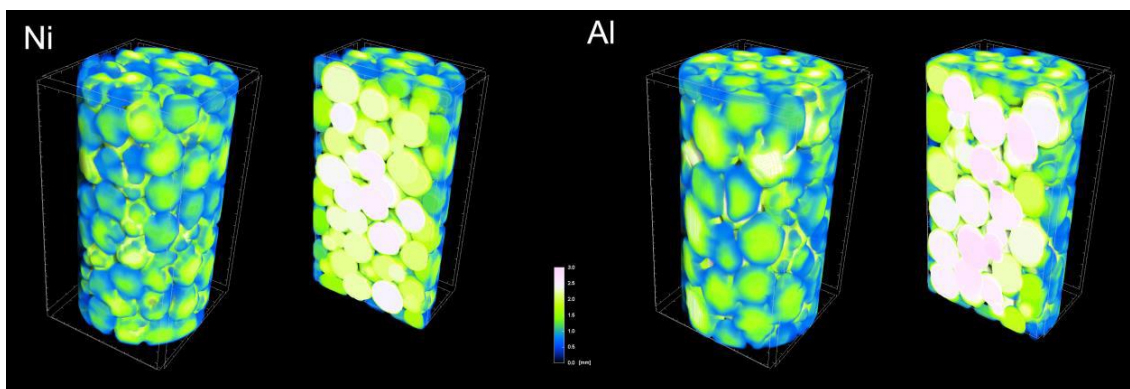
Rys. 5.17. Rozkład średnic porów w strukturze piany Ni20.

Jak wynika z rysunków 5.15.-5.17., rozkład średnic porów we wszystkich pianach jest bimodalny. W przypadku pian aluminiowych pik 1 odnosi się do porów małych, czyli połączeń między porami dużymi (właściwymi), których rozkład wyraża pik 2. Rozkład średnic porów małych i dużych struktury piany niklowej jest opisany odpowiednio przez pik 2 i 3. Natomiast pik 1 odnosi się do porów zamkniętych, których w pianach aluminiowych nie zaobserwowano.

Na rys. 5.18. przedstawiono wizualizację 3D porów piany Al40, a na rys. 5.19. pian Al20 i Ni20. Wizualizacje wykonano techniką rekonstrukcji objętościowej (ang. *Volume Rendering*) w aplikacji CTvox (Bruker).



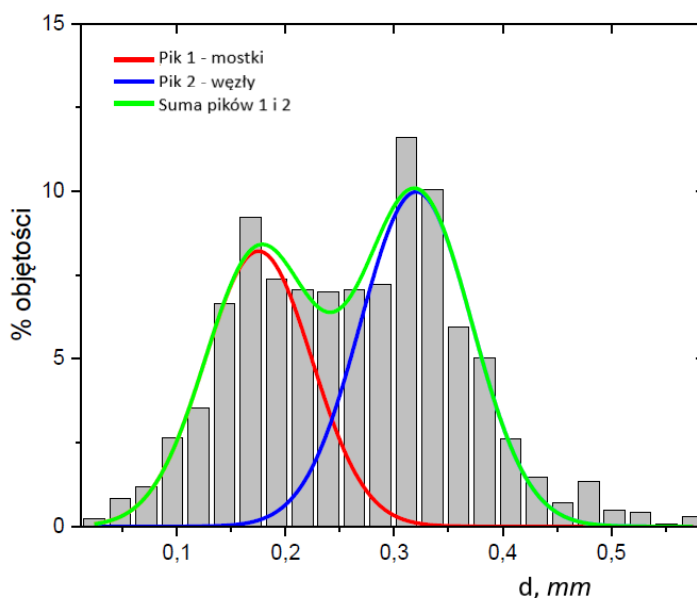
Rys. 5.18. Wizualizacja 3D porów piany Al40



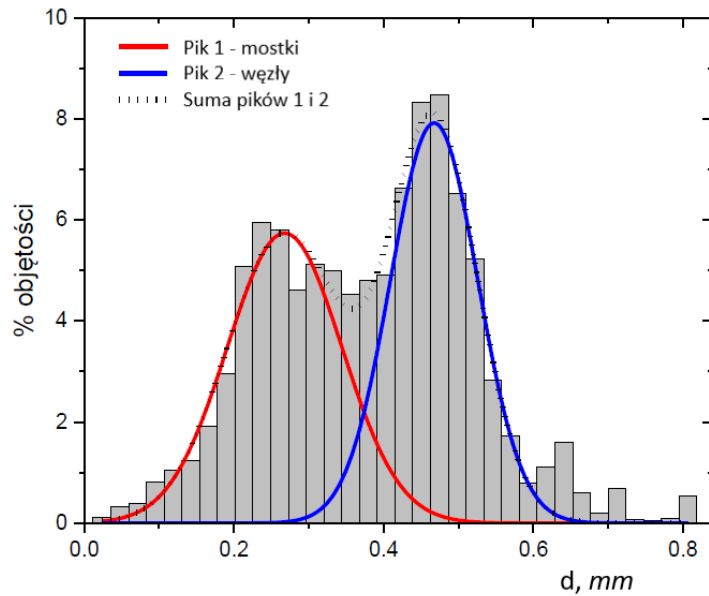
Rys. 5.19. Wizualizacja 3D porów pian Al20 i Ni20

Jak wynika z rys. 5.18. struktura piany Al40 jest stosunkowo jednorodna. Z kolei z ilustracji przedstawionej na rys. 5.19. wynika, że rozmiary porów pian Al20 i Ni20 są do siebie zbliżone, przy czym struktura piany Ni20 nie jest tak regularna, jak struktura piany aluminiowej.

Wyniki pomiarów średnic mostków i węzłów zaprezentowano na rys. 5.20.÷5.22., a otrzymane rozkłady ich wielkości opisano funkcją rozkładu normalnego Gaussa. Aproksymacja danych funkcją Gaussa pozwoliła równocześnie na ustalenie średniej wartości średnicy mostków i węzłów w próbkach pian wykorzystanych do badań przepływowych.

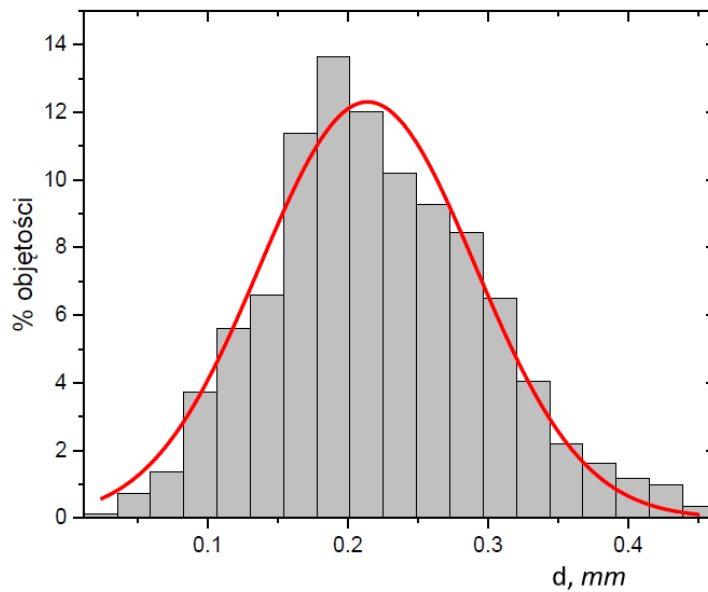


Rys. 5.20. Rozkład średnic mostków i węzłów w strukturze pian Al40



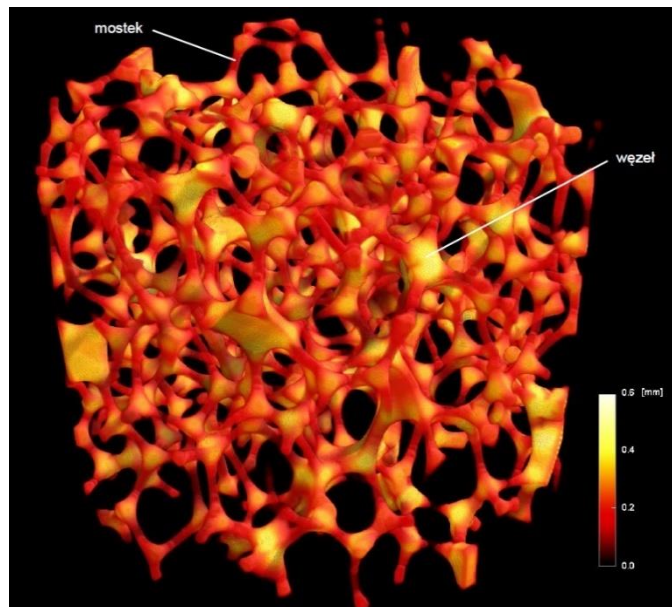
Rys. 5.21. Rozkład średnic mostków i węzłów w strukturze pian Al20

Rozkład średnic mostków pian aluminiowych pokazuje wyraźne istnienie dwóch frakcji średnic. Pik 1 odnoszący się do niższych wartości średnic (linia czerwona) na wykresach rys. 5.20. i 5.21. odpowiada mostkom pomiędzy węzłami. Natomiast pik 2 (linia niebieska) odpowiada średnicy węzłów, czyli zgrubień struktury piany, w których łączą się mostki. Z kolei, rozkład średnic mostków piany niklowej (rys. 5.22.) nie wykazuje rozróżnienia włókien jej struktury na mostki i węzły. Oznacza to, że ich średnie rozmiary są równe.



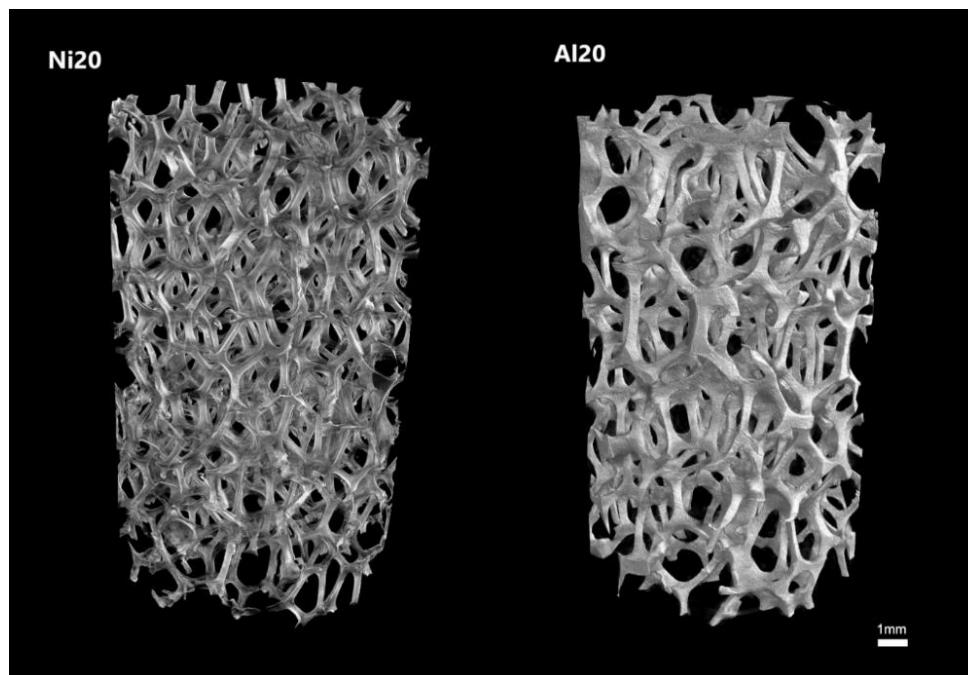
Rys. 5.22. Rozkład średnic mostków i węzłów w strukturze pian Ni20

Podział węzłów struktury piany metalowej na mostki i węzły jest jeszcze bardziej widoczny na trójwymiarowym modelu osnowy piany z kodowanym na nim kolorem średnic struktury, co przedstawia rys. 5.23. Mostki zwizualizowano kolorem czerwonym, natomiast łączące je węzły kolorem żółtym.



Rys. 5.23. Wizualizacja 3D osnowy piany Al20

Na rys. 5.24. zamieszczono wizualizację 3D struktur pian Ni20 i Al20.



Rys. 5.24. Wizualizacja 3D pian Ni20 i Al20

Analizując przedstawioną ilustrację można zauważyć wyraźne różnice w strukturze pian wykonanych z różnych materiałów. Piana aluminiowa złożona jest z wcześniej wspomnianych mostków i węzłów, a ich krawędzie wyglądają na gładkie. Tymczasem, struktura piany niklowej odznacza się włóknami o ostro zakończonych krawędziach oraz brakiem wyraźnych różnic w grubości mostków oraz miejsc ich łączenia się. Przyczyną różnic w strukturze mogą być odmienne cechy materiału, z którego piany są wykonane oraz warunków związanych z procesem ich produkcji. Ważne staje się zatem, aby w próbach opisu matematycznego wpływu piany metalowej na zjawiska cieplne lub przepływowe posługiwać się jej szczegółowymi parametrami, jak np. średnica porów i włókien. Jest to zresztą zgodne z sugestią autorów pracy [88]. Z kolei parametr PPI może być pomocny głównie w klasyfikacji pian pod względem zagęszczenia komórek i to jedynie dla celów orientacyjnych.

Ostatecznie, w tabeli 5.3. zestawiono parametry wszystkich pian wykorzystanych w trakcie badań własnych, których wartości ustalono z wykorzystaniem mikrotomografii komputerowej w sposób opisany w niniejszym punkcie pracy. Obliczeń wartości tych parametrów dokonano na podstawie binaryzacji obrazu skanowanych rzeczywistych próbek pian i metody progowania Otsu [154].

Tabela 5.3.

Parametry morfologii pian wyznaczone przy pomocy mikrotomografii komputerowej

Parametr	Al40	Al20	Ni20
Gęstość upakowania porów [ppi]	40	20	20
Porowatość całkowita [%]	92,97	93,3	91,95
Średnia średnica pora dużego [mm]	1,20	1,88	1,45
Średnia średnica pora małego [mm]	2,00	2,52	2,24
Średnia średnica mostka [mm]	0,18	0,27	0,27
Średnia średnica węzła [mm]	0,32	0,47	0,27
Powierzchnia właściwa [m ² /m ³]	1182	805	1340

Na podstawie zestawionych w niej wartości łatwo zauważyć, że piany Al20 i Ni20 różnią się pod względem rozmiarów porów i węzłów, chociaż odznaczają się taką samą wartością parametru PPI. Można również spostrzec, iż gęstość upakowania porów w żaden sposób nie determinuje porowatości piany. Piana Al40 odznacza się najmniejszym rozmiarem porów (ze względu na ich największą liczbę), natomiast pory w strukturze piany Al20 mają rozmiary największe. Co istotne, struktura piany Ni20

odznacza się największą powierzchnią właściwą, mimo że większość jej parametrów strukturalnych plasuje się pomiędzy parametrami pian Al20 i Al40. Wpływ na to mogą mieć cechy materiału, z którego wykonana jest piana Ni20, warunkujące jej „kanciastą” strukturę, a być może też zwiększoną chropowatość powierzchni.

5.3. Metodyka prowadzenia eksperymentów

Jako zadanie badawcze postawiono sobie wykonanie pomiarów oporów przepływu jednofazowego gazu i cieczy oraz układów dwufazowych gaz-ciecz i ciecz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej trzema różnymi pianami metalowymi. Dodatkowo zdecydowano się na obserwację i identyfikację struktur dwufazowych, co miało na celu uzyskanie informacji mogących wspomóc interpretację wyników badań.

Eksperymenty prowadzono z wykorzystaniem powietrza, wody oraz oleju maszynowego. Mieszanki powietrza i każdej z tych cieczy tworzyły układy dwufazowe gaz-ciecz, a obu cieczy układ ciecz-ciecz. Badania realizowano w temperaturze otoczenia. Przy wyborze oleju kierowano się informacjami zawartymi w pracy [127]. Podobnie jak jej autor zdecydowano się wykorzystać olej o niskiej lepkości, która w temperaturze otoczenia była jedynie około dziesięciokrotnie większa od lepkości wody. Tym samym należało oczekiwać stosunkowo niskich oporów przepływu podczas badań realizowanych z jego udziałem. Właściwości faz w temperaturze 20°C i ich relacje zestawiono w tabeli 5.4. Natomiast charakterystyki właściwości oleju w funkcji temperatury w zakresie obejmującym warunki badań znajdują się w załączniku (rys. Z.9.÷rys. Z.11).

Tabela 5.4.
Właściwości stosowanych płynów i ich relacje w temperaturze 20°C

Płyn f		gęstość ρ_f , kg/m ³	lepkość η_f , Pa·s	nap. pow. σ_f , N/m	
powietrze		1,16	$0,018 \cdot 10^{-3}$	-	
woda		998,20	$1,000 \cdot 10^{-3}$	0,073	
olej		846,56	$8,153 \cdot 10^{-3}$	0,024	
ρ_p / ρ_w , -	ρ_p / ρ_{ol} , -	ρ_{ol} / ρ_w , -	η_p / η_w , -	η_p / η_{ol} , -	η_{ol} / η_w , -
0,0012	0,0014	0,8480	0,0180	0,0022	0,3288

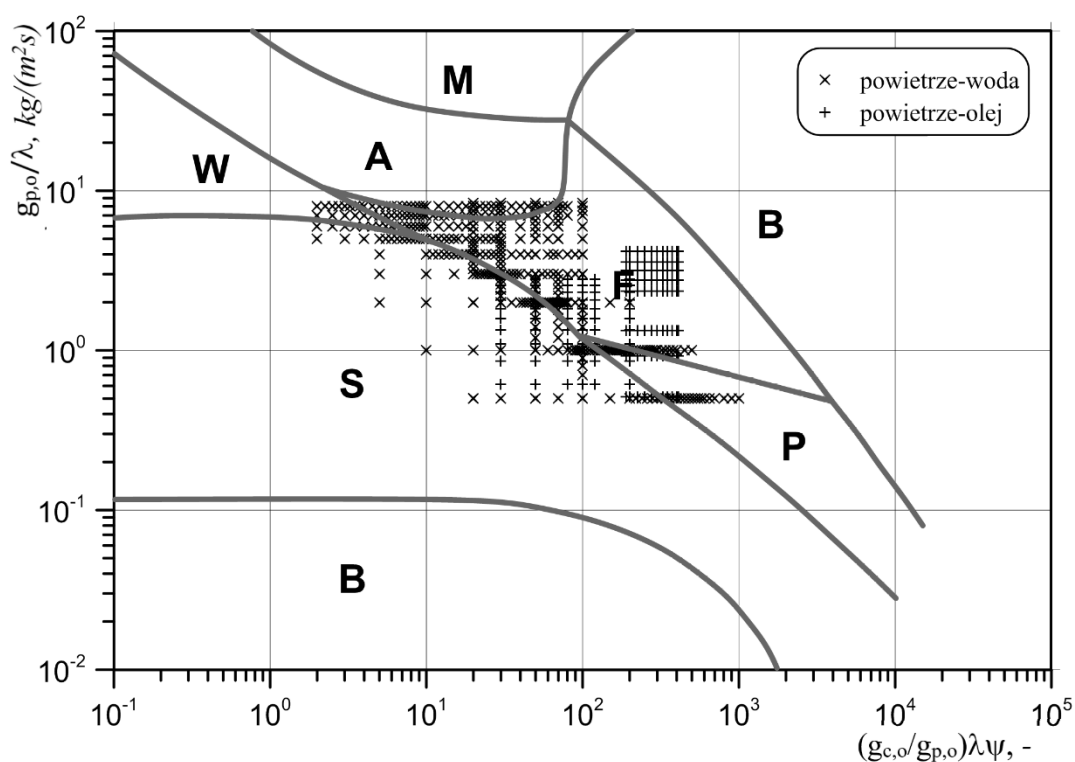
Badania z udziałem substancji jednofazowych przeprowadzono w możliwie szerokim zakresie zmian ich strumieni. Planując pomiary dobrano taki ich zakres, aby

możliwe było otrzymanie zarówno laminarnego, jak i turbulentnego charakteru przepływu. Przedziały wartości wybranych wielkości ilustruje tabela 5.5.

Tabela 5.5.
Zakres zrealizowanych badań eksperymentalnych przepływu jednofazowego

Płyn <i>f</i>	$V_f, \text{dm}^3/\text{min}$	$g_f, \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Re_f
powietrze	2,02–34,04	0,5–9,8	278–5444
woda	0,08–1,51	16,9–318,8	169–3188
olej	0,07–1,58	12,6–285,3	15–350

Do zaplanowania zakresu badań dotyczących przepływu układów dwufazowych posłużono się mapami struktur opracowanymi dla przepływu w pustej rurze. Plan badań dla układu gaz-ciecz przygotowano w oparciu o mapę Troniewskiego i Ulbricha [106] w taki sposób, aby prowadzić pomiary w obszarze najczęściej spotykanych w praktyce struktur dwufazowych. Na mapie przedstawionej na rys. 5.25. zaznaczono obszar i punkty, dla których zaplanowano wykonanie pomiarów.



Rys. 5.25. Planowany zakres badań dla układu gaz-ciecz

Prowadzenie pomiarów w warunkach przepływu rozwarstwowanego było o tyle istotne, że wówczas stosunkowo łatwo i jednoznacznie można obserwować wpływ obecności piany metalowej w rurze na zaburzenie struktur przepływu. Za uzasadnione uznano też zagęszczenie punktów pomiarowych w obszarach mapy przewidujących

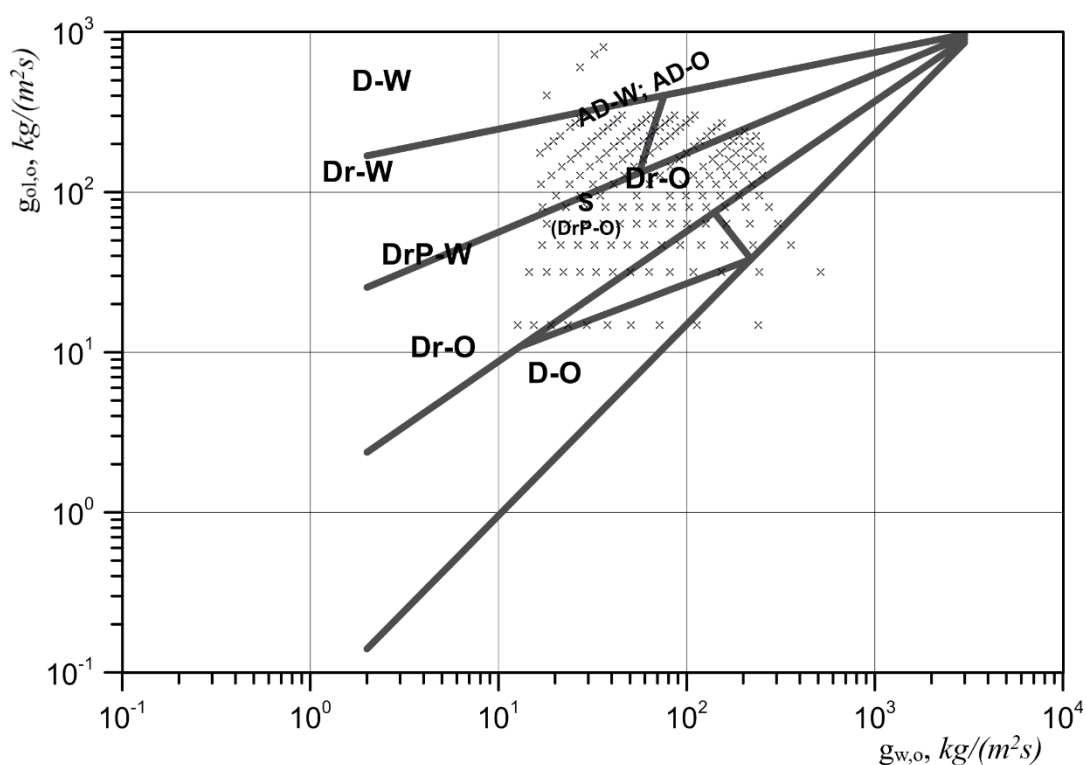
zmianę struktury przepływu. Objętościowe strumienie płynów, ich gęstości strumienia masy oraz udziały objętościowe dla mieszanin typu gaz-ciecz zestawiono w tabeli 5.6.

Tabela 5.6.

Zakresy zmian strumieni faz dla układów gaz-ciecz

Płyn f	$\dot{V}_f, dm^3/min$	$g_f, kg/(m^2 \cdot s)$	$\zeta_f, -$
powietrze	2,02–32,44	0,5–10,0	0,652–0,998
woda	0,08–1,08	5,1–227,9	0,002–0,348
olej	0,07–0,77	11,8–139,6	0,004–0,252

Z kolei zakres pomiarów planowanych dla układu ciecz-ciecz przygotowano na podstawie mapy przepływu opracowanej przez autora pracy [109]. Przedstawiono ją na rys. 5.26. z zaznaczeniem zakresu strumieni obu cieczy przewidzianych do prowadzenia eksperymentów. Podobnie, jak w przypadku układu gaz-ciecz, pomiary oporów przepływu układu ciecz-ciecz przewidziano w warunkach tworzenia się typowych struktur przepływu. Pobór strumieni obu cieczy pozwalał na prowadzenie eksperymentów także w obszarze potencjalnej inwersji faz układu ciecz-ciecz.



Rys. 5.26. Planowany zakres badań dla układu ciecz-ciecz

Badania przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz realizowano zarówno przy stałym nastawie strumienia objętościowego gazu, zmieniając przy tym strumień objętości cieczy, jak i przy stałym udziale faz, manipulując odpowiednio strumieniem

gazu i cieczy. Podobną metodykę wykorzystano przy pomiarach oporów przepływu układu dwufazowego ciecz-ciecz, w odniesieniu do fazy wodnej i olejowej. Warunki realizacji badań oporów przepływu układów dwufazowego ciecz-ciecz zestawiono w tabeli 5.7.

Tabela 5.7.

Zakresy zmian strumieni faz układu ciecz-ciecz

Płyn <i>f</i>	$V_f, dm^3/min$	$g_f, kg/(m^2 \cdot s)$	$\zeta_f, -$
woda	0,08–0,62	16,9–131,7	0,104–0,899
olej	0,07–1,13	12,6–203,6	0,101–0,896

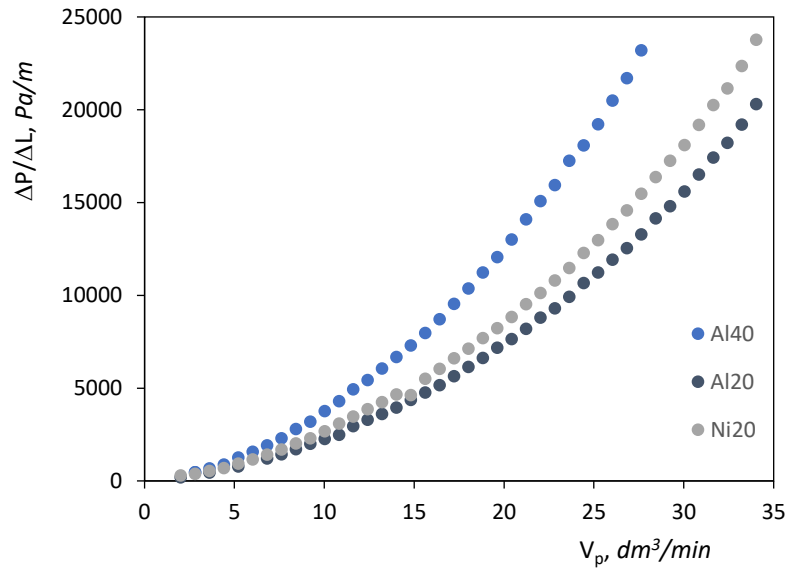
Tak przygotowany plan badań zrealizowano dla kolejno trzech rur poziomych, z których każda wypełniona była inną pianą. Eksperymenty prowadzono w temperaturze otoczenia, która zmieniała się nieznacznie w zakresie 18÷28°C.

W wyniku badań oporów przepływu jednofazowego przez wszystkie użyte piany łącznie uzyskano ok. 3 400 punktów pomiarowych. Z kolei dla układu dwufazowego gaz-ciecz było to odpowiednio ok. 5 000 danych. W przypadku układu ciecz-ciecz pomiary zrealizowano tylko dla pian Al20 i Ni20, co w efekcie pozwoliło na uzyskanie ponad 600 punktów pomiarowych. Przepływ układu woda-olej przez pianę Al40 generował zbyt duże spadki ciśnienia wykraczające poza zakres pomiarowy czujników współpracujących z komputerowym systemem akwizycji danych. Sumarycznie udało się jednak stworzyć bazę danych składającą się z ok. 9 000 rekordów, co wydaje się wystarczającą podstawą do interpretacji i podjęcia próby opisu matematycznego zjawisk hydrodynamicznych występujących podczas przepływu płynów przez piany metalowe. Dane eksperymentalne zestawiono w formie tabel w załączniku do niniejszej pracy. Obejmują one łącznie 9150 punktów eksperymentalnych.

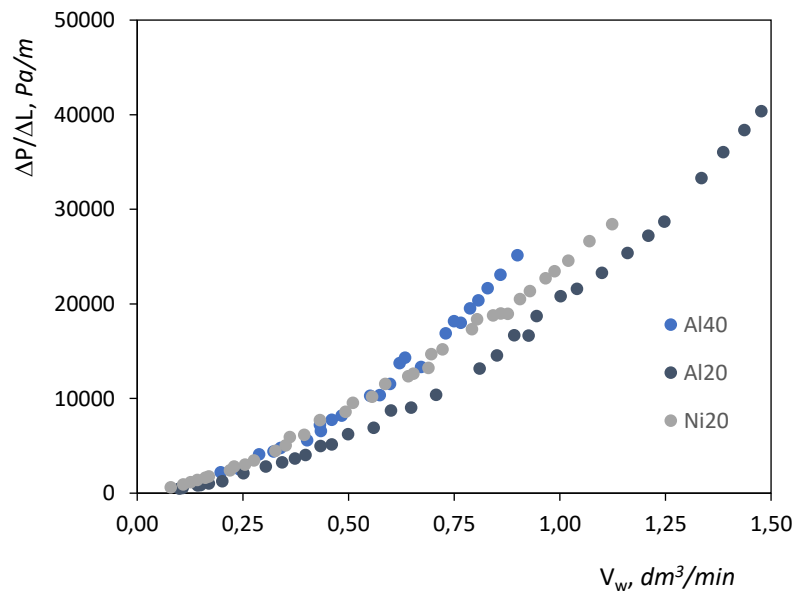
5.4. Wyniki badań i ich analiza

5.4.1. Przepływ jednofazowy

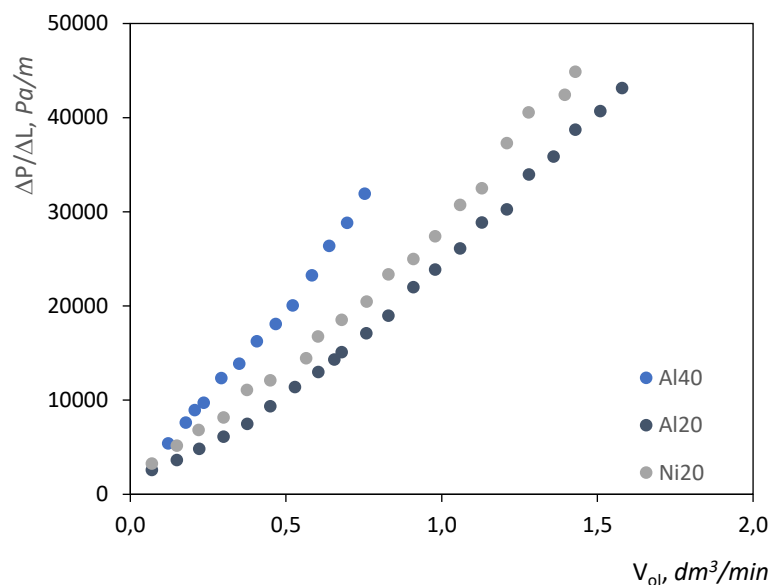
Przeprowadzone badania przepływu jednofazowego powietrza, wody i oleju przez piany aluminiowe Al40 i Al20 oraz pianę niklową Ni20 pozwoliły na ocenę wpływu rozmiarów porów oraz różnic strukturalnych tych pian na opory przepływu. Na rys. 5.27.÷5.29. przedstawiono wyniki zmierzonych jednostkowych oporów przepływu powietrza i każdej z cieczy w poszczególnych pianach.



Rys. 5.27. Zmierzone jednostkowe opory przepływu powietrza przez piany



Rys. 5.28. Zmierzone jednostkowe opory przepływu wody przez piany



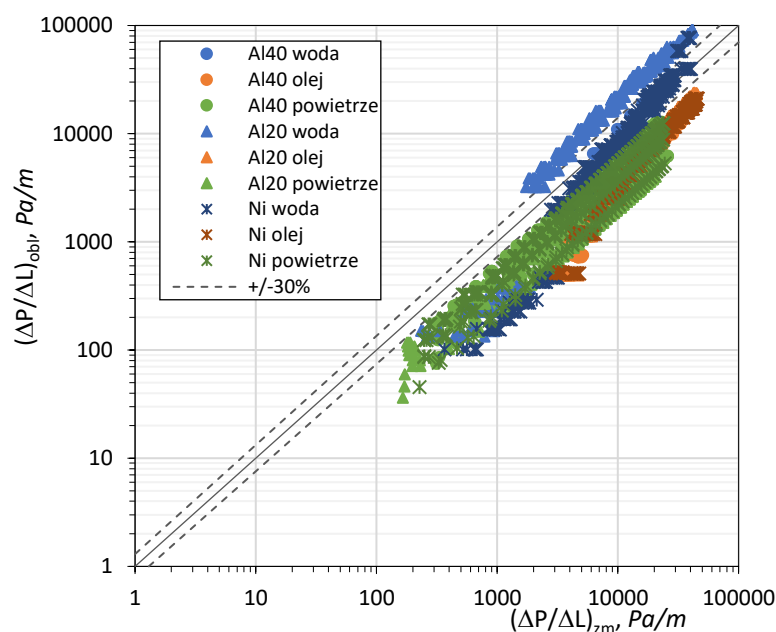
Rys. 5.29. Zmierzone jednostkowe opory przepływu oleju przez piany

Jak wynika z analizy przedstawionych wykresów, podczas przepływu jednofazowego najmniejsze wartości oporów przepływu odnotowano dla piany Al20. Z kolei największe opory towarzyszyły przepływowi powietrza oraz oleju przez pianę Al40. Dla wody największe opory przepływu zarejestrowano zarówno dla piany Al40, jak i Ni20. Warto zauważyć, że w przypadku każdego z płynów obserwowano wyższe opory w przypadku przepływu przez pianę Ni20 niż Al20. Takie wyniki nie są zaskakujące – struktura piany Al20 charakteryzowała się największym rozmiarem porów oraz największą porowatością. Zatem w jej przypadku należało spodziewać się najniższych wartości oporów przepływu. Z kolei pianę Al40 cechowały pory o najmniejszym rozmiarze, co skutkowało większym oporem hydraulicznym. Jednak bardziej skomplikowane do interpretacji pozostają wyniki dotyczące przepływu przez pianę Ni20. Jak wynika z informacji podanych w rozdziale 5.2. rozmiary porów piany Ni20 są nieregularne i mimo to, że piana ta cechuje się średnią gęstością upakowania porów zbliżoną do wartości tego parametru dla piany Al20, to jednak ma w swojej strukturze większe i mniejsze od niej pory. Dodatkowo, wyraźnie większa powierzchnia właściwa piany Ni20, w porównaniu do pozostałych pian, może świadczyć o większej chropowatości piany Ni20. Zatem przyczyn większych oporów przepływu płynów przez pianę Ni20, w porównaniu do przepływu przez pianę Al20, można upatrywać w różnicach strukturalnych tych pian, głównie w rozkładzie średnic ich porów oraz chropowatości powierzchni włókien. Różnice te są związane z właściwościami materiałów, z których zostały one wykonane oraz ze sposobu ich wytwarzania.

Wartości zmierzonych oporów przepływu jednofazowego cieczy i gazu przez wszystkie piany rosną wraz ze wzrostem strumienia płynu. Tendencja wzrostu oporów przepływu powietrza przez piany metalowe ma charakter wyraźnie potęgowy, typowy dla przepływu przez ośrodki porowate. Z kolei charakter zmian oporów przepływu wody i oleju jest zbliżony do liniowego, co jest charakterystyczne dla przepływu laminarnego. Mimo odmiennych kształtów przebiegu funkcji obrazujących zależność oporów przepływu płynu od jego strumienia (a pośrednio prędkości), dla każdego z tych przypadków spełnione jest równanie Forchheimer'a (4.21).

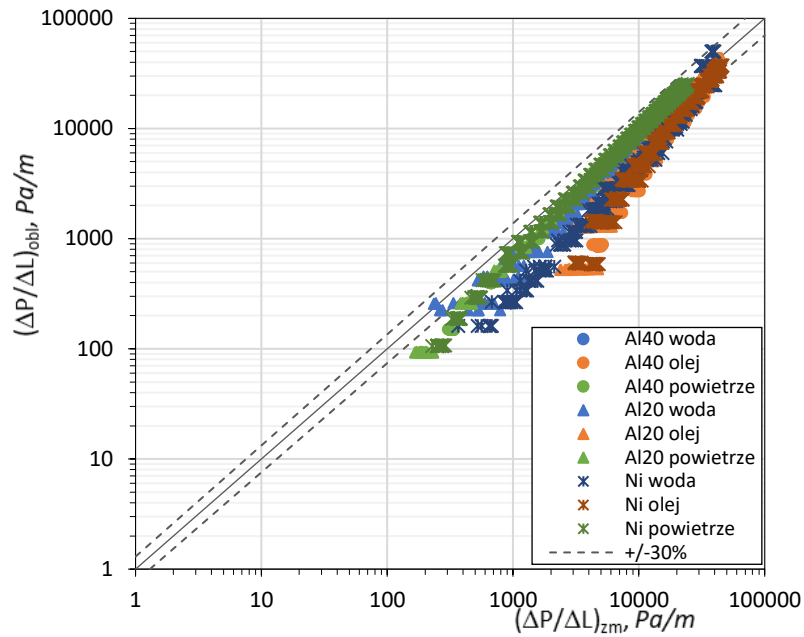
W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów dokonano próby wykorzystania i ewentualnej adaptacji wybranych metod obliczania oporów przepływu jednofazowego. W literaturze nadal dostępnych jest niewiele prac dotyczących przepływu jednofazowego w wypełnionym pianą metalową poziomym kanale o przekroju kołowym, np. [126,127,130]. Z tego względu wykorzystano metody opracowane dla pian ceramicznych [66], [139–141], przepływu pionowego [64,125,137,141], czy też przepływu przez wypełniony pianą metalową kanał o przekroju niekołowym [124,137].

Ocenę dokładności metod obliczeniowych przeprowadzono dla 5 metod bazujących na równaniu Forcheirmer'a (4.21) oraz 5 opartych na równaniu Darcy'ego-Weisbacha (4.36). Z uwagi na ich dużą liczbę wyniki porównania wartości zmierzonych z obliczonymi zaprezentowano graficznie jedynie dla kilku z nich. I tak, rys. 5.30. odnosi się do metody wyrażonej równaniem (4.41), opracowanej dla przepływu gazu i cieczy w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową.



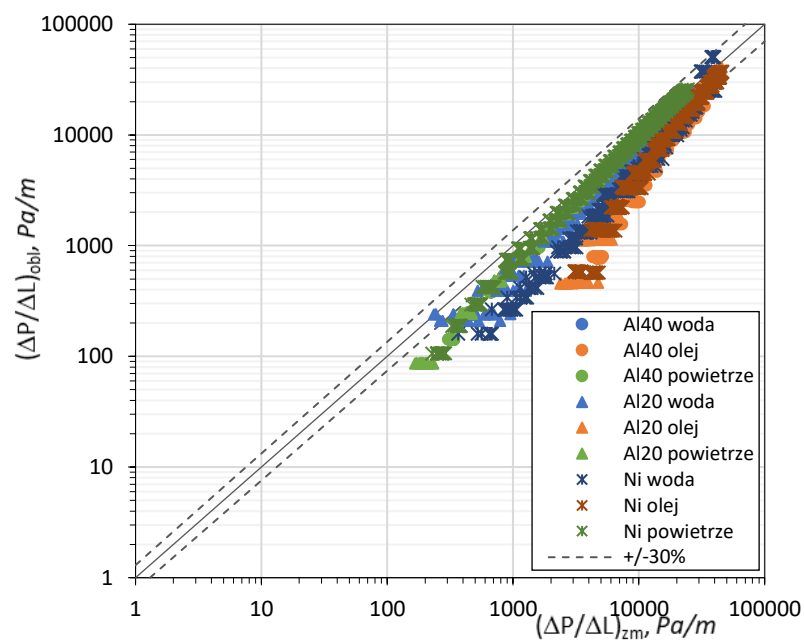
Rys. 5.30. Porównanie zmierzonych wartości oporów przepływu dla wody, oleju i powietrza z wartościami obliczonymi według (4.41)

Metoda opisana równaniem (4.34) (rys. 5.31.) została opracowana dla przepływu w rurze wypełnionej pianą ceramiczną.



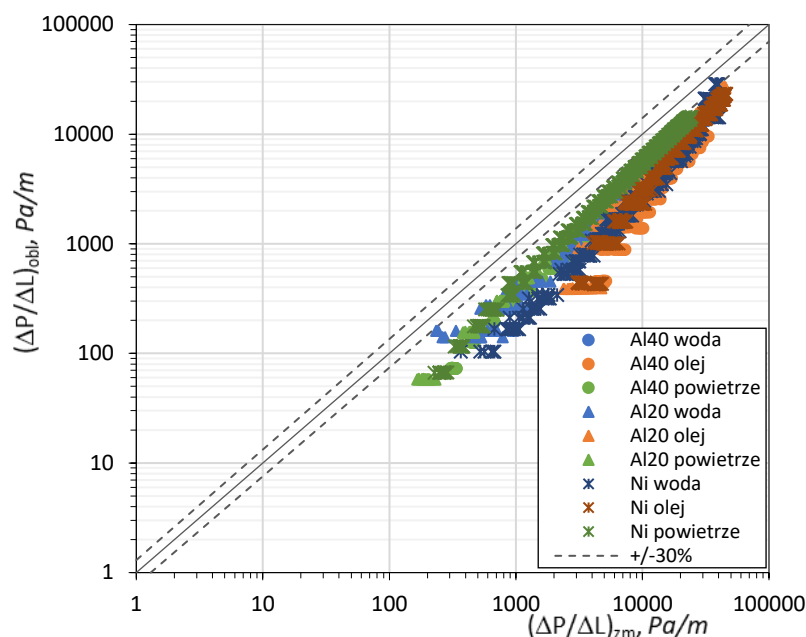
Rys. 5.31. Porównanie zmierzonych wartości oporów przepływu dla wody, oleju i powietrza z wartościami obliczonymi według (4.34)

Z kolei sposób obliczania oporów przepływu według równania (4.32), którego skuteczność zaprezentowano na rys. 5.32., obowiązuje również dla pian ceramicznych, ale w warunkach przepływu pionowego.



Rys. 5.32. Porównanie zmierzonych wartości oporów przepływu dla wody, oleju i powietrza z wartościami obliczonymi według (4.32)

Rys. 5.33. ilustruje efekty wykorzystania metody opisanej równaniem (4.37), opracowanej dla przepływu pionowego przez kanał prostokątny wypełniony pianą metalową.



Rys. 5.33. Porównanie zmierzonych wartości oporów przepływu dla wody, oleju i powietrza z wartościami obliczonymi według (4.37)

Jak wynika z przedstawionych wykresów, istniejące metody obliczania oporów przepływu jednofazowego gazu i cieczy przez piany sprawdzają się jedynie dla części punktów pomiarowych, głównie przy warunkach przepływu odpowiadających najwyższym wartościom oporów. Metody wyrażone równaniami (4.32) i (4.34) czyli opracowane dla pian ceramicznych są skuteczne dla szerszego zakresu warunków przepływu powietrza. Jednak dla cieczy, podobnie jak pozostałe metody, dają wyniki obarczone znacznym błędem.

Porównanie skuteczności metod obliczeniowych z wynikami badań własnych dotyczących przepływu wody, oleju i powietrza polegało na ustaleniu i ocenie wartości:

- średniej wartości błędu względnego

$$\overline{\delta\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{1F}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{1F,i}, \quad (5.4)$$

gdzie:

$$\delta\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{1F,i} = \frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{1F,i,obl} - \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{1F,i,zm}}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{1F,i,zm}}, \quad (5.5)$$

- średniej bezwzględnej wartości błędu względnego (tzw. rozrzutu)

$$\overline{\left| \delta \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{1F} \right|} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \delta \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{1F,i} \right|, \quad (5.6)$$

- odchylenia standardowego od wartości średniej

$$s = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{1F,i} - \overline{\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{1F}} \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (5.7)$$

Obliczone wartości przytoczonych powyżej wielkości statystycznych dla każdej z porównywanych metod obliczeniowych zestawiono w tabeli 5.8.

Tabela 5.8.

Parametry oceny statystycznej metod obliczania oporów przepływu jednofazowego przez piany metalowe

Nr równania	Wartość w [%]		
	$\overline{\left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{1F}}$	$\overline{\left \delta \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{1F} \right }$	s
(4.30)	145	145	187
(4.31)	-13	37	44
(4.32)	-27	31	26
(4.34)	-25	29	26
(4.35)	-54	58	31
(4.37)	-56	60	30
(4.38)	-65	69	37
(4.39)	-24	29	27
(4.40)	-82	86	51
(4.41)	-35	61	54

Z przeprowadzonej analizy porównawczej skuteczności kolejnych metod wynika, że wykazują one bardzo zróżnicowaną dokładność. Najlepsze rezultaty dają równania (4.34) i (4.39). Oba zostały opracowane dla przepływu jednofazowego w rurze poziomej wypełnionej pianami ceramicznymi [66] oraz pianami metalowymi i ceramicznymi [126]. Mniej skuteczne okazały się metody wyrażone równaniami (4.41), (4.31) i (4.32). Warto przy tym zauważyć, iż podane w pracy [141] równanie (4.32) odnosi się do przepływu pionowego. Również metody odpowiadające równaniom (4.37), (4.38) oraz (4.40) proponowane w pracach [64,124,130,137], a w szczególności równanie (4.30) autorstwa [139], nie dały oczekiwanych rezultatów.

Dla statystycznej oceny skuteczności wybranych metod obliczania oporów przepływu jednofazowego przez piany metalowe oszacowano również udział liczby punktów mieszczących się w rozrzucie rzędu $\pm 30\%$. W najlepszym przypadku (równania (4.34) i (4.39)) udział ten był na poziomie 60%, co uznano za wynik niezadowalający.

W związku z powyższym podjęto działania mające na celu opracowanie dokładniejszej metody obliczania oporów przepływu układu jednofazowego w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową. Działanie to było uzasadnione m.in. dużą liczbą punktów pomiarowych uzyskanych w ramach badań własnych.

Ustalając propozycję nowej metody przyjęto, iż model matematyczny nie powinien być nadmiernie rozbudowany oraz nie powinien zawierać w sobie parametrów trudnych do wyznaczenia, co miało na celu ułatwić jej stosowanie w praktyce.

Mając na uwadze wnioski autora pracy [127], mówiące o tym, że przepuszczalność i współczynnik inercji stanowiące parametry równania Forchheimera (4.21) ct. „są wielkościami zmiennymi, wymagającymi doświadczalnego wyznaczenia, i to niezależnie dla każdego płynu” zdecydowano, że podstawę nowej metody stanowić będzie przedstawione wcześniej, powszechnie znane i stosowane, równanie Darcy’ego-Weisbacha (4.36). Sam autor [127] sugeruje bowiem, że ct. „bardziej uniwersalną wielkością charakteryzującą opór przepływu przez piany metalowe może być odpowiednio zdefiniowana liczba oporu”.

Definiując średnicę hydrauliczną piany za autorami prac [66,126], czyli

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{a_v}, \quad (5.8)$$

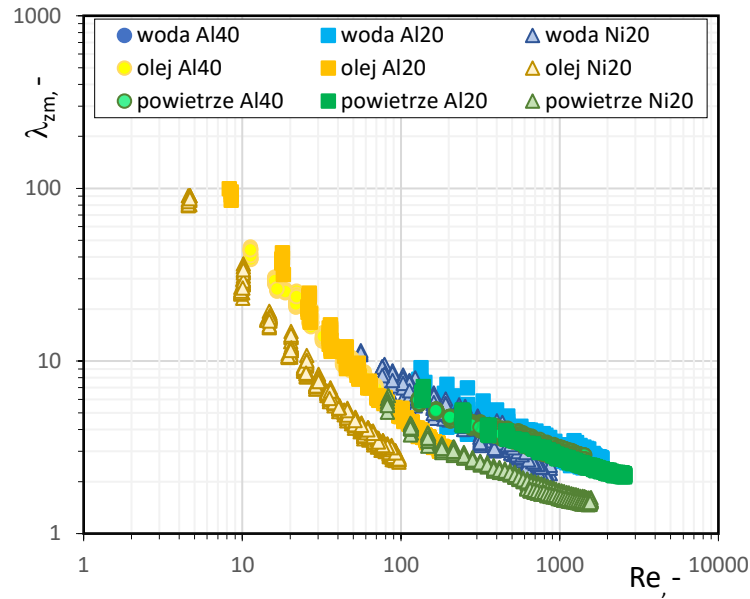
oraz przekształcając równanie (4.36) liczba oporu przepływu to

$$\lambda = \frac{8\varepsilon^3 \Delta P \rho_{sr}}{g^2 L a_v}. \quad (5.9)$$

Zatem jej wartość można było ustalić na podstawie danych eksperymentalnych.

Na rys. 5.34. zaprezentowano przebieg zmian liczby oporu dla wody, oleju i powietrza oraz wszystkich użytych w badaniach rodzajów pian metalowych w funkcji liczby Reynoldsa. Zdefiniowano ją tak, jak w pracy [126], czyli

$$\text{Re} = \frac{w d_h \rho}{\eta \varepsilon} = \frac{4w \rho}{\eta a_v}. \quad (5.10)$$



Rys. 5.34. Zmierzona liczba oporu dla badanych płynów i pian w funkcji liczby Reynoldsa

Z rys. 5.34. wynika, że liczba oporu może zależeć również od właściwości fizycznych płynu, a także rodzaju zastosowanej piany. Z tego względu dokonano próby opisu liczby oporu równaniem

$$\lambda = C \operatorname{Re}^a \left(\frac{d_{pm} \varepsilon}{d_p - d_{pm}} \right)^b. \quad (5.11)$$

Ze względu na pomiary oporów przepływu m. in. dla gazu, a więc płynu ściśliwego, zdecydowano się operować natężeniem strumienia płynu oraz jego średnią gęstością odpowiadającą panującym w warstwie piany warunkom termodynamicznym, co po podstawieniu równania (5.11) do (4.36) prowadzi do zależności

$$\frac{\Delta P}{L} = C \operatorname{Re}^a \left(\frac{\varepsilon}{\frac{d_{pw} - d_{pm}}{d_{pm}}} \right)^b \frac{g^2}{2\varepsilon^2 \rho_{sr} d_h}. \quad (5.12)$$

Równanie (5.11) stanowi model matematyczny składający się ze stałej C i dwóch modułów skorelowanych za pomocą wykładników a i b , przy czym rozrózono dwa różne zakresy liczby Reynoldsa $\operatorname{Re} < 150$ oraz $\operatorname{Re} > 150$, dla których przyjmują one odmienne wartości. Pierwszym modułem modelu (5.11) jest liczba Reynoldsa zdefiniowana wg równania (5.10). Parametr ten definiuje charakter przepływu i ma zasadniczy wpływ na wartość liczby oporu, o czym można również wnioskować z analizy rys. 5.34. Drugi moduł w (5.11) wyraża stosunek porowatości piany do względnej różnicy pomiędzy średnicą porów właściwych i małych. Zastosowanie tej

relacji cech geometrycznych piany zostało uzasadnione tym, że lepiej charakteryzuje ona jej cechy, jako ośrodka porowatego.

Wartości stałych C , a i b dla obu zakresów liczby Reynoldsa wraz z analizą wariancji dla równania (5.11) zestawiono w tabeli 5.9.

Tabela 5.9.

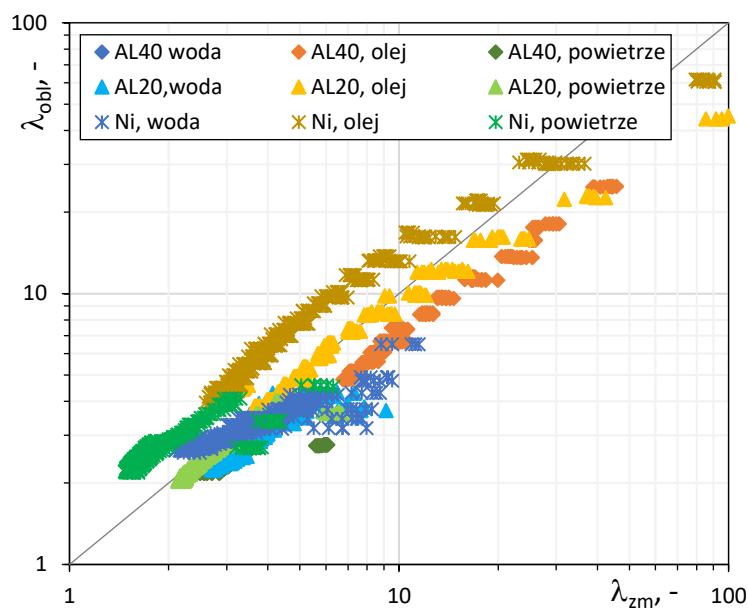
Wyniki analizy wariancji dla modelu (5.11)

Zakres Re	Wartości stałych					
	C		a		b	
$Re < 150$	186		-0,90		0,49	
$Re > 150$	17		-0,29		0,15	
$Re < 150$	Analiza wariancji					
		<i>Liczba stopni swobody</i>	<i>Suma kwadratów</i>	<i>Średni kwadrat</i>	<i>Statystyka F</i>	<i>Istotność F</i>
	<i>Regresja</i>	2	392,1097	196,0549	1377,804	$1,4 \cdot 10^{-284}$
	<i>Reszkowy</i>	973	135,4533	0,1423		
	<i>Razem</i>	975	530,5630			
$Re < 150$	Analiza wariancji					
		<i>Liczba stopni swobody</i>	<i>Suma kwadratów</i>	<i>Średni kwadrat</i>	<i>Statystyka F</i>	<i>Istotność F</i>
	<i>Regresja</i>	2	95,9044	47,9522	1064,610	0
	<i>Reszkowy</i>	2454	110,5332	0,0450		
	<i>Razem</i>	2456	206,4376			

Na podstawie zawartych w niej informacji uznano, że analiza wariancji jest zadowalająca, liczba oporu w znacznym stopniu jest uzależniona od parametrów kontrolowanych, uwzględnionych w równaniu (5.11), które jest statystycznie istotne.

Z kolei, ocena statystyczna skuteczności równania (5.11) wskazała na bardzo dobrą jego zgodność z danymi pomiarowymi. Średni błąd względny równy 5% oraz średnia wartość rozrzutu wyników na poziomie $\pm 25\%$, przy odchyleniu standardowym równym 31% są wartościami akceptowalnymi i jednocześnie zadowalającymi w odniesieniu do przepływu jednofazowego gazu i cieczy przez różne piany metalowe.

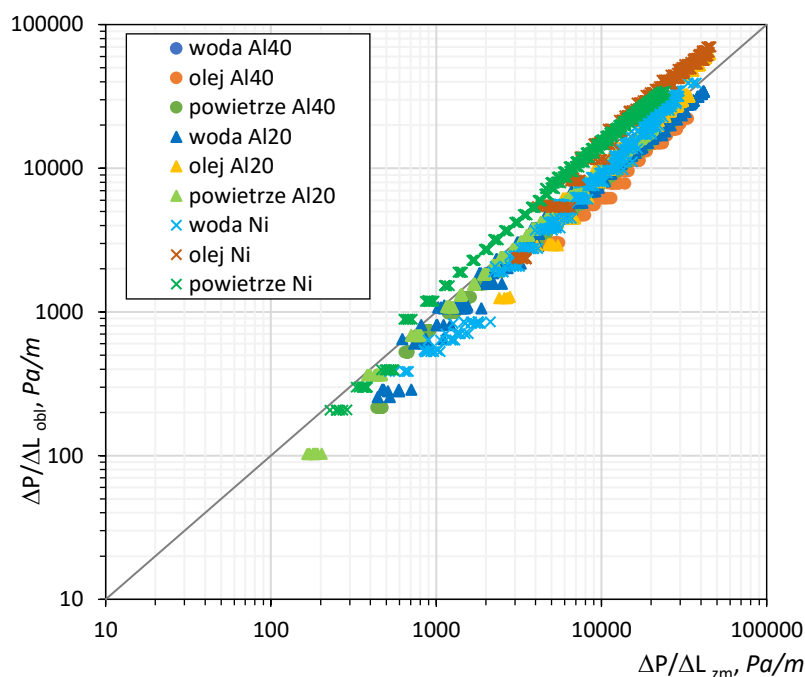
Na wykresie pokazanym na rys. 5.35. przedstawiono porównanie wartości liczby oporu obliczonych zgodnie z równaniem (5.11) z wartościami wynikającymi z pomiarów oporów przepływu jednofazowego płynów przez piany metalowe.



Rys. 5.35. Porównanie wartości liczby oporu obliczonej wg równania (5.11) z wartościami wynikającymi z pomiarów

Z wykresu rys. 5.35. wynika, że równanie (5.11) jest skuteczne w całym zakresie punktów pomiarowych. Jednocześnie można spostrzec, iż nowa propozycja wyznaczania liczby oporu dla przepływu jednofazowego przez piany metalowe dała najlepsze wyniki dla piany Al20. Największe odchylenia od wartości wynikających z pomiarów dotyczą natomiast powietrza i częściowo oleju płynących przez pianę Ni20 oraz oleju płynącego przez pianę Al40.

Wykorzystując zaproponowany sposób wyznaczania liczby oporu porównano opory przepływu jednofazowego obliczone zgodnie z równaniem (5.12) ze zmierzonymi. Graficzny obraz tego porównania przedstawiono na rys. 5.36, natomiast w tabeli 5.10. zestawiono ocenę statystyczną skuteczności równania (5.12). Na wykresie (rys. 5.36) można zauważyć bardzo dobrą zgodność zaproponowanej metody obliczania oporów przepływu jednofazowego w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową z wartościami pomiarowymi. Do podobnego wniosku może prowadzić analiza parametrów oceny statystycznej zaproponowanego sposobu obliczania oporów. Średni błąd względny równy +3% oraz średnia wartość rozrzutu wyników na poziomie $\pm 22\%$, przy odchyleniu standardowym równym 28% są wartościami akceptowalnymi. Dodatkowo oszacowano udział punktów pomiarowych, dla których zaproponowana metoda obliczania oporów przepływu jednofazowego jest zadowalająca. W wyniku tego ustalono, że proponowany sposób obliczania oporów przepływu jednofazowego w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową wykazał błąd mniejszy niż $\pm 30\%$ dla blisko 75% punktów pomiarowych, co można uznać za wynik satysfakcjonujący.



Rys. 5.36. Porównanie obliczonych oporów przepływu jednofazowego z wartościami pomiarowymi

Tabela 5.10.

Ocena skuteczności równania (5.12)

$\overline{\delta\lambda}$	$ \overline{\delta\lambda} $	s	R^2
+3%	±22%	28%	0,8828

Łatwo zauważyć, że równanie (5.11) zawiera zmienne odnoszące się zarówno do warunków przepływu i właściwości płynów, jak i parametrów geometrycznych samej piany metalowej. Dysponowanie tymi ostatnimi nie zawsze jest możliwe, co oznaczać będzie brak możliwości stosowania równania (5.11). W związku z tym postanowiono również zaproponować i ocenić pewne uproszczenie równania (5.11), pozwalające na prowadzenie obliczeń bez konieczności dysponowania trudnymi do wyznaczenia parametrami. Polegało ono na przyjęciu wykładnika $b=0$, czyli zrezygnowano z uwzględnienia wpływu parametrów geometrycznych piany. Wtedy równanie (5.11) przyjęło postać

$$\lambda = C \operatorname{Re}^a \left(\frac{d_{pm} \varepsilon}{d_p - d_{pm}} \right)^{b=0} = C \operatorname{Re}^a. \quad (5.13)$$

Wartości stałych ustalonych dla równania (5.13) zestawiono w tabeli 5.11.

Tabela 5.11.

Wartości stałych równania (5.13)

Zakres Re	Wartości stałych	
	C	a
$Re < 150$	203	-0,85
$Re > 150$	18	-0,28

Ocena statystyczna skuteczności równania (5.13) dała następujące rezultaty: średni błąd względny równy +4% i średni rozrzut na poziomie $\pm 27\%$, przy odchyleniu standardowym równym 33%. Prowadzi to do wniosku, iż równanie (5.13) jest wystarczająco dokładne do wyznaczania liczby oporu dla szacunków inżynierskich i to bez konieczności dysponowania szczegółowymi parametrami strukturalnymi piany zawartymi w modelu (5.11). Na potwierdzenie tego w tabeli 5.12. zestawiono również parametry oceny statystycznej oporów przepływu jednofazowego obliczonych z wykorzystaniem równania (5.13).

Tabela 5.12.

Ocena statystyczna skuteczności obliczeniowej równania (5.12) przy wykorzystaniu uproszczonego równania (5.13)

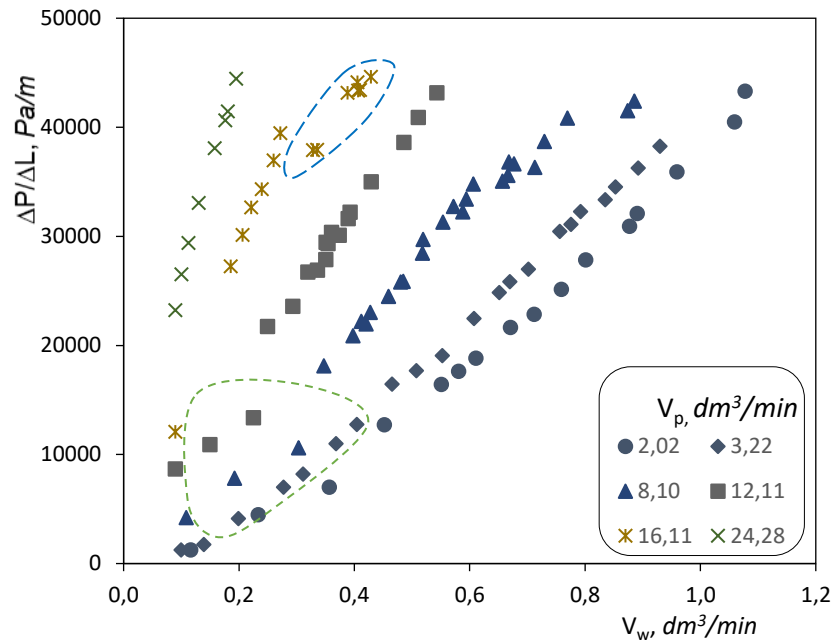
Parametry oceny statystycznej			
$\overline{\delta\lambda}$	$ \overline{\delta\lambda} $	s	R^2
4%	23%	30%	0,8693

Analiza parametrów oceny statystycznej dokładności obliczania oporów przepływu jednofazowego w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową przy wykorzystaniu równania (5.13), stanowiącego uproszczenie modelu (5.11) prowadzi do wniosku, iż jest ono wystarczająco dokładne dla potrzeb inżynierskich.

Porównując skuteczność opracowanej i wskazanej w niniejszej pracy metody obliczania oporów przepływu jednofazowego przez piany metalowe z metodami dostępnymi w literaturze łatwo zauważyć, iż nawet jej uproszczenie cechuje się znacznie większą skutecznością i dokładnością obliczeń. Należy przy tym nadmienić, iż proponowana metoda została opracowana na podstawie wyników badań prowadzonych w szerokim zakresie parametrów przepływu gazu i cieczy, przy zastosowaniu pian o różnych parametrach geometrycznych, a także różniących się materiałem, z którego zostały wykonane.

5.4.2. Przepływ układu gaz-ciecz

Charakter zmian oporów przepływu układu dwufazowego powietrze-woda przez piany metalowe, na przykładzie przepływu przez pianę A120, przedstawiono w formie wykresu na rys. 5.37. Dla pozostałych pian charakter ten był analogiczny.






Rys. 5.37. Opory przepływu układu powietrze-woda w funkcji strumieni faz

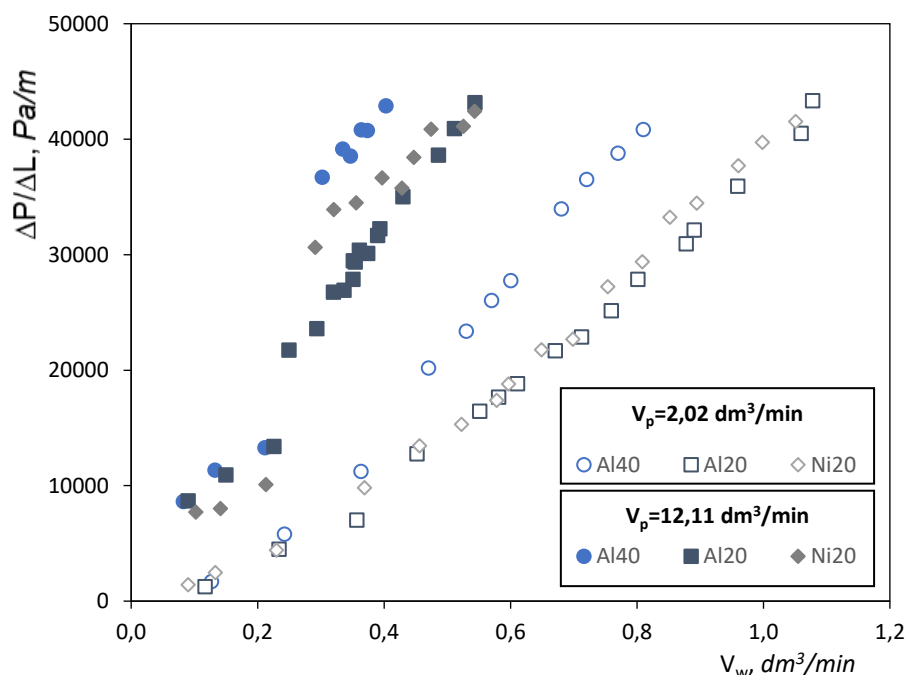
Opory przepływu układu gaz-ciecz okazały się być zdeterminowane głównie natężeniem strumieni faz, a w szczególności cieczy. Również podczas przepływu jednofazowego wywołuje ona znacznie wyższe opory niż faza gazowa. W trakcie badań własnych zaobserwowano, że opory przepływu dwufazowego zmieniają się rosnąco w sposób niemalże liniowy, co widać na rys. 5.37.

Zaburzenia struktur przepływu układu powietrze-woda wywołane obecnością w rurze piany metalowej opisano w tabeli 5.13., wykorzystując obserwacje zebrane w odcinku pustej rury przed i za częścią wypełnioną pianą. Zaburzenia te są o tyle istotne, że to właśnie nimi można tłumaczyć nieciągłości zmian oporów przepływu. Obszar zaznaczony na rys. 5.37. zieloną linią przerywaną dotyczy zmiany struktury rozwarstwionej lub rozwarstwiono-falowej w rzutową. Natomiast obszar wskazany niebieską linią przerywaną odnosi się do przejścia struktury pierścieniowej w rzutową. Takie zmiany struktur zaobserwowano również w przypadku pozostałych pian przy podobnych warunkach przepływu, co na wybranym przykładzie zilustrowano na rys. 5.38.

Tabela 5.13.

Obserwacje struktur przepływu układu powietrze-woda w pustej rurze przed i za odcinkiem rury wypełnionym pianą metalową

Struktura przepływu przed pianą metalową	Struktura przepływu za pianą metalową
rozwarstwiona	 <p>Zafalowana powierzchnia międzyfazowa, co nasilało się wraz ze wzrostem prędkości przepływu faz. Typowa struktura falowa kształtowała się przy niższym strumieniu gazu, niż wynika to z mapy przepływu (rys. 4.3.)</p>
rzutowo-pierścieniowa	 <p>Przy wyższym strumieniu powietrza przepływowi rzutowemu towarzyszyło powstawanie struktury pierścieniowej, co można by określić periodycznym (rzutowym) przepływem pierścieniowym</p>
korkowo-pęcherzykowa	 <p>Przepływająca faza ciekła zawierała jednocześnie pęcherze i korki gazu o zróżnicowanych rozmiarach w warunkach przepływu odpowiadających typowej strukturze korkowej</p>

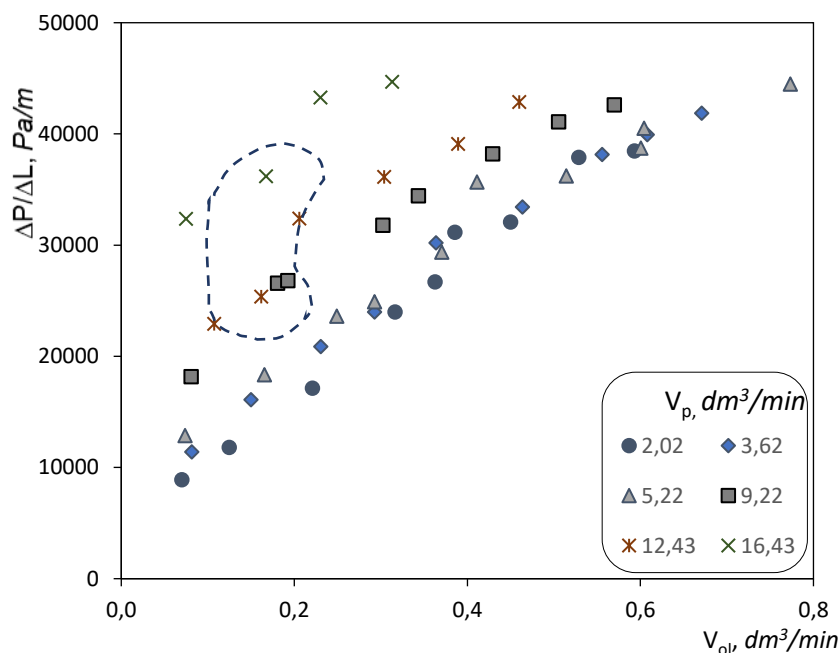


Rys. 5.38. Wpływ rodzaju piany na opory przepływu układu powietrze-woda w funkcji strumieni faz

Na rys. 5.38 widoczny jest nagły wzrost oporów przepływu dla każdej piany ujawniający się po przekroczeniu strumienia wody na poziomie ok. $0,25 \text{ dm}^3/\text{min}$, przy stałym strumieniu powietrza. Łatwo zauważyć, że opory zmierzone dla układu

powietrze-olej odznaczają się wyższymi wartościami niż dla mieszaniny powietrza i wody oraz inny jest charakter przebiegu ich zmian w funkcji strumieni faz. Wyższa wartość oporów wynika najprawdopodobniej z właściwości fizycznych oleju, czyli głównie większej lepkości tej cieczy.

Na rys. 5.39. pokazano wykres przedstawiający przebieg zmian oporów przepływu układu powietrze-olej w funkcji strumienia oleju dla różnych stałych strumieni powietrza. Wykres ten dotyczy przepływu przez pianę A120. Jak widać, charakter zmian oporów przepływu tej mieszaniny również jest mniej liniowy, gdyż przyrosty oporów przy większych wartościach strumienia oleju są coraz mniejsze. Zauważalny jest także znacznie mniejszy wpływ strumienia powietrza na te opory niż dla układu powietrze-woda. Różnice te mogą wynikać z innego napięcia powierzchniowego wody i oleju. Płynące porcje cieczy po napotkaniu przeszkody, jaką jest szkielet piany metalowej, ulegają rozdrobnieniu, zmienia się tym samym wcześniej uformowana struktura przepływu. Jednak ponowne odbudowywanie powierzchni międzyfazowej wymaga „spożytkowania” większej ilości energii w przypadku wody, gdyż to ona charakteryzuje się większym napięciem powierzchniowym. Zatem analogicznie, odbudowywanie powierzchni międzyfazowej form olejowych wymaga mniejszej ilości energii.

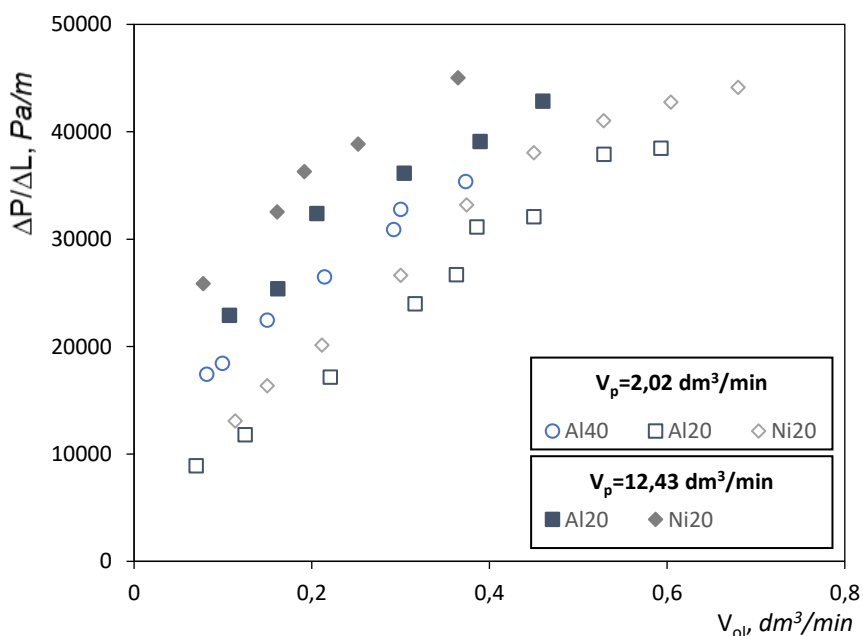


Rys. 5.39. Opory przepływu układu powietrze-olej w funkcji strumieni faz

Podobnie, jak w przypadku układu powietrze-woda, również wśród wyników pomiarów odnoszących się do układu powietrze-olej występują obszary nagłego

wzrostu wartości oporów. One również wynikają ze zmiany struktury przepływu, co zaznaczono niebieską linią przerywaną na rys. 5.39. Jednak zmiany oporów są tutaj mniej intensywnie, niż miało to miejsce dla układu powietrze-woda.

Na rysunku 5.40. zaprezentowano zmiany oporów przepływu układu powietrze-olej w funkcji strumienia oleju dla dwóch wybranych strumieni powietrza i wszystkich wykorzystanych w badaniach pian. Z wykresu tego wynika, że charakter zmian oporów jest taki sam dla każdej z nich, przy czym oczywiście w zależności od zastosowanej piany zróżnicowane są wartości zmierzonych oporów przepływu. Tak, jak dla układu powietrze-woda, w takich samych warunkach przepływu najmniejsze wartości oporów odnotowano dla piany A120, a największe dla piany A140, co bezpośrednio wynika z rozmiarów porów tych pian. To właśnie zbyt duże opory przepływu układu powietrze-olej uniemożliwiły wykonanie pomiarów dla piany A140 przy wyższych strumieniach powietrza. Z tego powodu, na omawianym wykresie brak jest punktów dotyczących strumienia powietrza 12,43 dm³/min oraz piany A140. Opory zmierzone dla układu powietrze-olej podczas przepływu przez pianę Ni20 przy niskich wartościach strumieni obu faz są zbliżone do oporów zarejestrowanych dla piany A120. Jednak przy wyższych strumieniach faz wartości oporów przepływu przez pianę Ni20 były już zbliżone do oporów przepływu przez pianę A140.



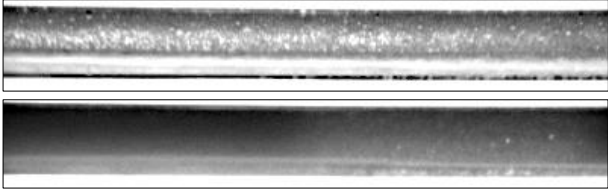

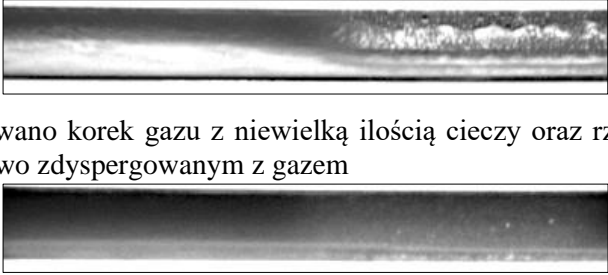
Rys. 5.40. Wpływ rodzaju piany na opory przepływu układu powietrze-olej w funkcji strumieni faz

O ile zwykle obserwowano najniższe opory przepływu dla piany A120, a najwyższe dla A140, o tyle nie sposób jednoznacznie przewidzieć poziomu wartości

oporów przepływu przez pianę Ni20. Przy przepływie jednofazowym wody przez pianę Ni20 osiągnięto wartości zbliżone do oporów zmierzonych dla piany A140. W przypadku przepływu jednofazowego powietrza oraz oleju przez pianę Ni20 odnotowano wartości oporów przepływu niewiele wyższe niż dla piany A120 i jednocześnie znacznie niższe niż dla piany A140. Z kolei podczas przepływu korkowo-pęcherzowego układu powietrze-woda (puste znaczniki \diamond na wykresie na rys. 5.38.) rejestrowano opory przepływu zbliżone do wartości otrzymanych dla piany A120. Natomiast przy przepływie rozwarstwionym tej mieszaniny najniższe opory ujawniły się dla piany Ni20. Tymczasem relacja zmierzonych oporów przepływu dwufazowego powietrze-olej przez pianę Ni20 w stosunku do oporów zmierzonych dla pozostałych pian jest podobna, jak w przypadku przepływu jednofazowego oleju. Wyraźna „wrażliwość” piany Ni20 na przepływ wody i jej mieszanin z powietrzem oraz jednocześnie jej brak na przepływ oleju i układu dwufazowego powietrze-olej może świadczyć o większej chropowatości powierzchni włókien tej piany. Większa chropowatość i nieregularność struktury piany (zawierającej też mniejsze pory) w parze z wysokim napięciem powierzchniowym wody może bowiem prowadzić do zatykania niewielkich okienek porowatej struktury piany. Ich ponowne otwarcie wymaga energii koniecznej nie tylko do przetłoczenia płynów, ale i do przewyciężenia sił kohezji spajających ciecz ze szkieletem piany. W związku z tym można wnioskować, że również materiał, z którego jest wykonana piana wpływa na wartości oporów przepływu w zależności od rodzaju płynącej substancji, warunków jej przepływu oraz kształtujących się struktur, co jednak wymaga prowadzenia dalszych i bardziej szczegółowych badań. Na podstawie obserwacji struktur dwufazowych za odcinkiem testowym oraz oceny wartości oporów przepływu przedstawionych na rys. 5.40. można stwierdzić, że zmiana struktury przepływu wywołana przez pianę A120, jak i Ni20 następuje w zbliżonych warunkach. Zaburzenia struktur odnotowane dla przepływu dwufazowego powietrze-olej przez piany metalowe opisano w tabeli 5.14.

Tabela 5.14.

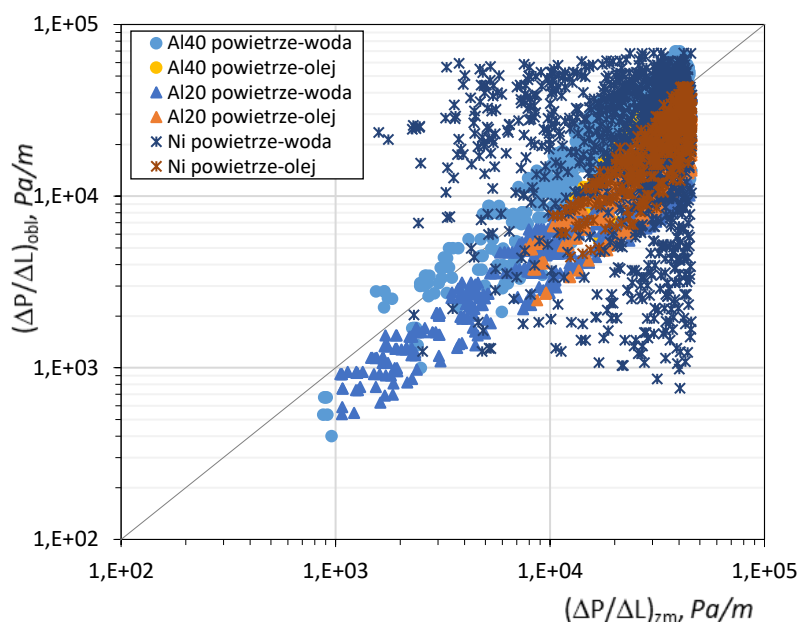
Obserwowane zmiany struktur przepływu układu powietrze-olej w rurze przed i za odcinkiem rury wypełnionym pianą metalową

Struktura przepływu przed pianą metalową	Struktura przepływu za pianą metalową
<ul style="list-style-type: none"> – rozwarstwiona, – falowa, – rzutowa, – korkowa 	 <p>Znacznej większości obserwowanych struktur towarzyszyła częściowa lub niemal całkowita dyspersja jednej z faz; zjawisko nasilało się wraz ze wzrostem strumienia powietrza</p>
rzutowa	 <p>Zwykle obserwowano strukturę falowo-rzutową częściowo zdyspergowanego układu powietrze-olej, a przy wyższych strumieniach powietrza kształtowała się struktura pierścieniowa</p>
korkowa	 <p>Obserwowano korek gazu z niewielką ilością cieczy oraz rzut cieczy z częściowo zdyspergowanym z gazem</p> <p>Obserwowano również klasyczną strukturę korkową zdyspergowanej mieszaniny powietrza i oleju</p>

Wykorzystując wyniki badań przepływu dwufazowego gaz-ciecz przez piany metalowe, dokonano próby adaptacji wybranych metod obliczania jego oporów przepływu. Jak dotąd w literaturze dostępna jest tylko jedna praca dotycząca bezpośrednio takiego przypadku [127]. W związku z tym rozważano próby zaadaptowania innych metod, opracowanych dla nieco innych warunków przepływu [61,68,92,145].

Prace [68,145] odnoszą się do nieustalonego przepływu dwufazowego, będącego wynikiem przemiany fazowej przepływającej cieczy poddawanej ogrzewaniu, gdzie dodatkowo geometria kanału jest inna niż kołowa. Z kolei, w badaniach przedstawionych w pracy [92] zastosowano rurę wypełnianą pianą metalową w sposób pierścieniowy. Natomiast sposób obliczania oporów przepływu dwufazowego przez piany metalowe opracowany przez autorów pracy [61] umożliwia prowadzenie obliczeń jedynie w warunkach przepływu pionowego.

W związku z powyższym, ostatecznie przeprowadzono ocenę skuteczności metody Dygi [127], czyli równania (4.44), co zaprezentowano graficznie na wykresie pokazanym na rys. 5.41. Niemniej jednak dokonano próby wykorzystania metod proponowanych przez autorów prac [68,92,145], czyli odpowiednio równania (4.54), (4.57) i (4.47). W ten sposób uzyskano dodatkowe empiryczne potwierdzenie braku celowości ich stosowania w odniesieniu do przepływu dwufazowego będącego przedmiotem badań własnych.



Rys. 5.41. Porównanie zmierzonych oporów przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz z obliczonymi według (4.44)

Jak widać na rys. 5.41., metoda (4.44) szczególnie sprawdziła się dla przepływu układu powietrze-woda przez pianę Al40. Jednocześnie łatwo zauważyć duży rozrzut wyników w przypadku tego samego układu dwufazowego płynącego przez pianę niklową. Może to wynikać z faktu, że metoda Dygi [127] powstała w oparciu o eksperymenty bazujące jedynie na pianach aluminiowych o różnej gęstości upakowania porów. Specyficzne ułożenie punktów po prawej stronie wykresu wynika stąd, że podczas badań osiągnęto górny zakres pomiarowy czujników różnicy ciśnień. Średni błąd względny dla metody opisanej równaniem (4.44) wyniósł -12%, wartość rozrzutu $\pm 53\%$, a odchylenia standardowego 99%.

Wartości tych parametrów dla metody opisanej równaniem (4.47) wyniosły odpowiednio -63%, $\pm 87\%$ i 125%. Skuteczność równania (4.54) okazała się być znacznie gorsza, o czym świadczy: średni błąd względny równy +115%, rozrzut na poziomie $\pm 200\%$ oraz odchylenie standardowe równe 483%. Zupełnie nieadekwatna

okazała się natomiast metoda wyrażona równaniem (4.57), dla której wartości tych parametrów były na poziomie kilkunastu tysięcy procent.

Spośród rozpatrywanych metod obliczania oporów przepływu dwufazowego gaz-ciecz przez piany metalowe, metoda (4.44) okazała się najbardziej skuteczna. Niemniej, ze względu na duży rozrzut wyników oraz wysoką wartość odchylenia standardowego nie można stwierdzić, że jest ona wystarczająco dokładna. Okazało się bowiem, że tylko nieco ponad 30% obliczonych wartości jest obarczona błędem poniżej $\pm 30\%$.

W związku z powyższym, podjęto działania mające na celu opracowanie własnej, bardziej dokładnej metody obliczania oporów przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową. Założono przy tym, że budowany model matematyczny nie powinien być nadmiernie rozbudowany oraz zawierać w sobie parametrów trudnych do wyznaczenia. Miało to na celu ułatwienie stosowania tej metody w praktycznych obliczeniach projektowych.

Ze względu na fakt, że w trakcie prac eksperymentalnych obserwowano głównie wyraźnie rozdzielony przepływ gazu i cieczy przyjęto, że opory powinny być obliczane w oparciu o model rozdzielonego układu dwufazowego. W wyniku licznych analiz przyjęto następującą postać równania ogólnego

$$\frac{\Delta P_{g-c}}{(\Delta P_g + \Delta P_c)} = 1 + \Phi_{g-c}. \quad (5.14)$$

Opory przepływu fazy ciekłej i gazowej przyjęto liczyć zgodnie z równaniem (5.12). Z kolei parametrem Φ_{g-c} wyrażono poprawkę, której wartość miała uwzględniać czynniki mające kluczowy wpływ na opory przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową.

Dla zdefiniowania parametru Φ_{g-c} ustalono wielkości mające znaczący wpływ na opory przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz przez piany. Po wnikliwej analizie danych ustalono, że są to: charakter przepływu poszczególnych faz, ich właściwości fizyczne, a także parametry opisujące strukturę piany metalowej oraz geometrię kanału przepływowego. Obliczenia korelacyjne pozwoliły ustalić szczegółową postać równania jako

$$\Phi_{g-c} = 402 \text{Re}_c^{-0,11} \text{Re}_g^{0,10} \left(\frac{d_r}{d_h}\right)^{-3,77} \left(\frac{\varepsilon}{\frac{d_{pw} - d_{pm}}{d_{pm}}}\right)^{-2,20} \quad (5.15)$$

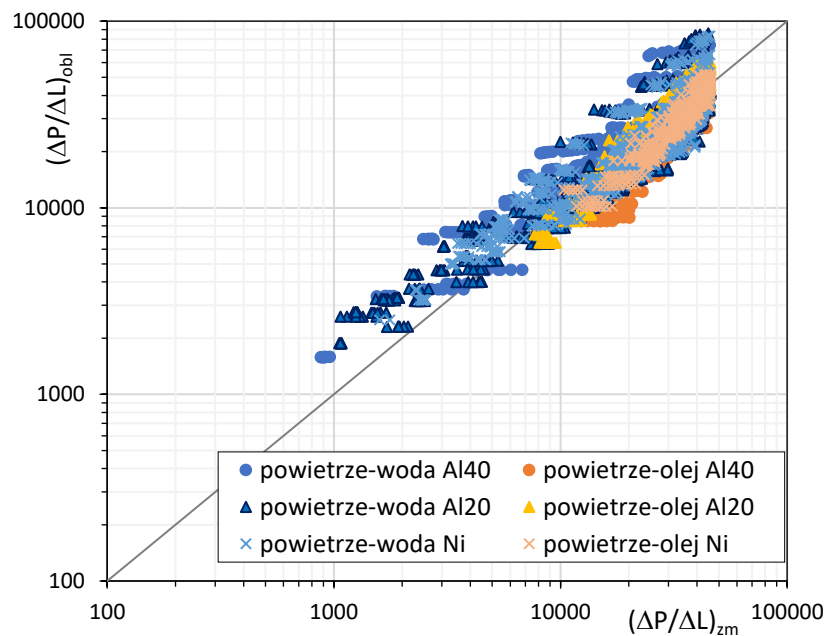
Wartości analizy wariancji dla modelu (5.15) zestawiono w tabeli 5.15. Wynika z niej, że pod względem statystycznym przyjęty model dobrze oddaje badaną zależność.

Tabela 5.15.

Wyniki analizy wariancji dla modelu (5.15)

Analiza wariancji					
	Liczba stopni swobody	Suma kwadratów	Średni kwadrat	Statystyka F	Istotność F
Regresja	4	1020,093	255,0232	1156,285	0
Resztkowy	5016	1106,298	0,2206		
Razem	5020	2126,391			

Obliczone ostatecznie zgodnie z równaniem (5.14), opory przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową porównano z wartościami zmierzonymi, co przedstawiono na wykresie pokazanym na rys. 5.42.



Rys. 5.42. Porównanie obliczonych według (5.14) oporów przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz z wartościami zmierzonymi

Analizując łącznie rys. 5.41. i 5.42. wyraźnie widać, że zaproponowany sposób obliczania oporów przepływu lepiej sprawdził się dla każdej z mieszanin dwufazowych i dla każdej z zastosowanej w badaniach piany. Dokładność opracowanej metody

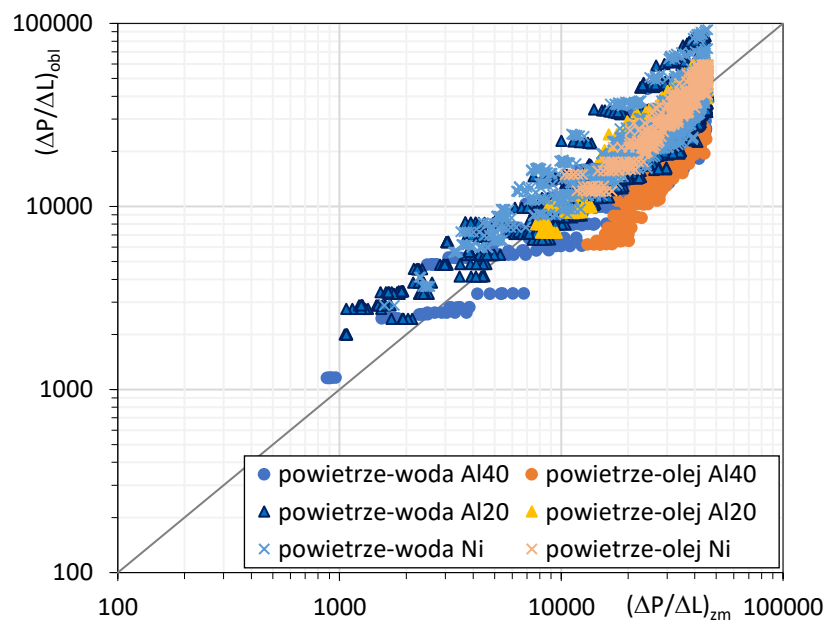
zweryfikowano przeprowadzając jej ocenę statystyczną. W rezultacie ustalono, że jest ona obciążona średnim błędem względnym równym +1%, rozrzutem $\pm 22\%$ i odchyleniem standardowym 31%, przy współczynniku determinacji korelacji 0,6939. Poza tym, ponad 80% punktów jest obciążone błędem mniejszym niż $\pm 30\%$. Mając na uwadze przedmiot badań uznano, że takie wartości wskaźników świadczą o zadowalającej dokładności proponowanej metody obliczeniowej.

O ile wartość większości z zawartych w równaniu (5.15) wielkości jest łatwa do wyznaczenia, o tyle dysponowanie wartościami szczegółowych parametrów piany (poza jej porowatością i powierzchnią właściwą) może okazać się problematyczne. Z tego względu podjęto próbę zdefiniowania parametru Φ_{g-c} również w pewien uproszczony sposób. Powtórne obliczenia korelacyjne doprowadziły do równania

$$\Phi_{g-c} = 10 \text{Re}_c^{-0,13} \text{Re}_g^{0,07} \left(\frac{d_r}{d_h} \right)^{-1,43}, \quad (5.16)$$

które w porównaniu do (5.15) nie zawiera ostatniego członu uwzględniającego zróżnicowanie w rozmiarach porów dużych i małych.

Na rys. 5.43. przedstawiono porównanie obliczonych oporów przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz z wartościami zmierzonymi wg (5.14) i (5.16).



Rys. 5.43. Porównanie obliczonych według (5.14) i (5.16) oporów przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz z wartościami zmierzonymi

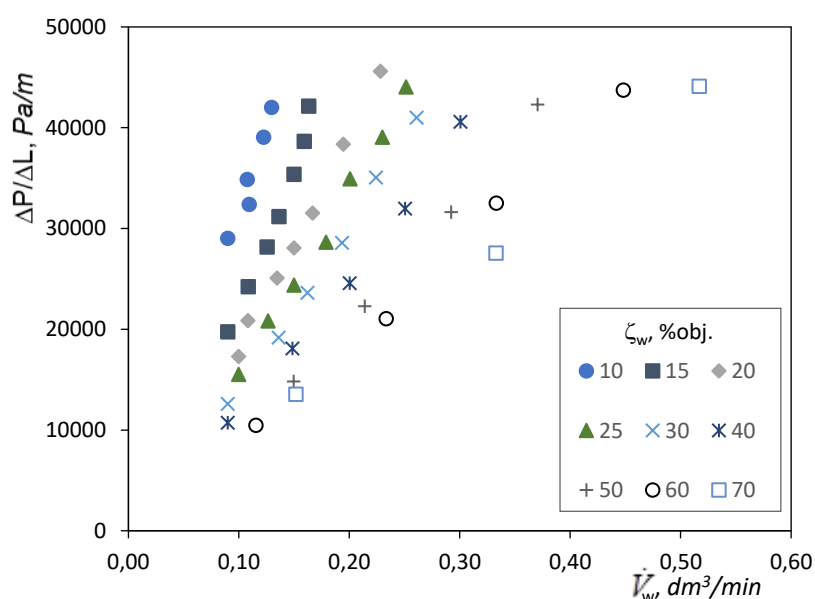
Jak wynika z wykresu, również uproszczony model (5.16) dobrze sprawdza się dla większości punktów pomiarowych. Najmniej korzystne wyniki otrzymano dla

punktów dotyczących przepływu układu powietrze-olej przez pianę A140. Można również zauważyć nieco większy rozrzut punktów w porównaniu do rys. 5.42.

Dokładność metody obliczania oporów przepływu z zastosowaniem uproszczonego modelu (5.16) zweryfikowano również na drodze oceny statystycznej. W rezultacie ustalono, że jest ona obciążona średnim błędem względnym równym 0% i rozrzutem sięgającym $\pm 24\%$. Odchylenie standardowe wyniosło 33%, a współczynnik determinacji korelacji 0,5949. Okazało się również, że ponad 70% punktów jest obciążonych błędem poniżej $\pm 30\%$. Wyniki te wskazują, iż stosowanie uproszczonego modelu (5.16) do obliczania parametru równania (5.14) pozwala uzyskać wyniki nieco mniej dokładne. Jednak należy podkreślić jednoczesny brak konieczności dysponowania w procedurze obliczeniowej trudnymi do wyznaczenia (eksperymentalnego) szczegółowymi parametrami strukturalnymi piany.

5.4.3. Przepływ układu ciecz-ciecz

Charakter zmian zmierzonych oporów przepływu układu dwufazowego woda-olej przez pianę A120 ilustruje wykres na rys. 5.44.



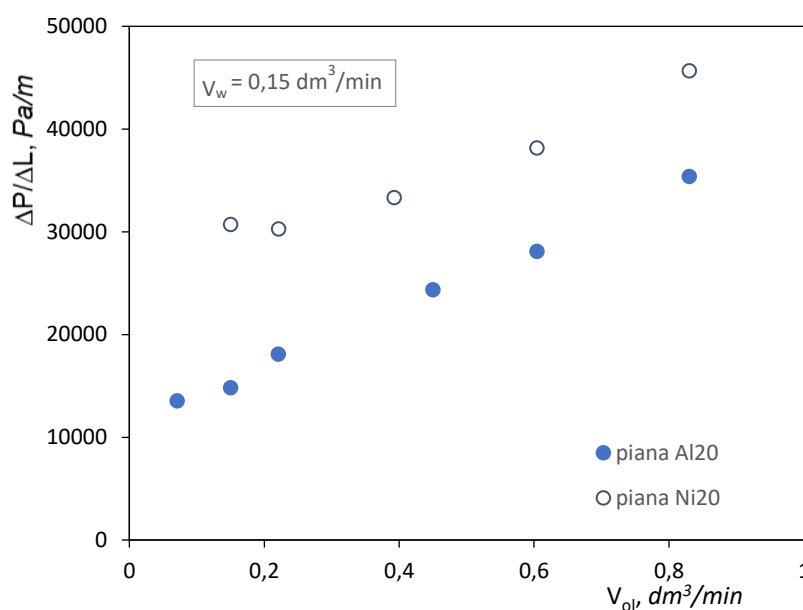
Rys. 5.44. Opory przepływu układu dwufazowego woda-olej o stałym składzie przez pianę A120 w funkcji strumienia wody

Zaznaczone na nim punkty odnoszą się do wlotowego udziału objętości tej substancji w mieszaninie woda-olej, czyli

$$\zeta_w = \frac{V_w}{V_w + V_{ol}} \Big|_{wlot} \quad (5.17)$$

Jak wynika z wykresu, opory przepływu układu ciecz-ciecz o stałym składzie rosną liniowo wraz ze wzrostem strumienia wody. Zgodnie z przewidywaniami, najniższe wartości oporów zarejestrowano dla układu o najwyższym udziale wody, a najwyższe przy najmniejszym udziale tego składnika. Niestety z powodu zbyt wysokich oporów przepływu układu woda-olej przez pianę A140, w odniesieniu do niej nie udało się zrealizować pomiarów eksperymentalnych.

Tendencja zmian oporów przepływu przez pianę Ni20 okazała się inna niż przez A120. W celu zilustrowania wpływu materiału piany na opory przepływu układu ciecz-ciecz, zbudowano wykres pokazany na rys. 5.45. Łatwo można spostrzec, że zależności te mają różny przebieg przy niższych wartościach strumienia oleju, a także, że wartości oporów zmierzonych dla obu pian znacząco się różnią. W przypadku przepływu układu woda-olej przez pianę Ni20 wraz ze wzrostem strumienia oleju początkowo obserwowano niewielki spadek oporów, po którym następował ich wzrost.



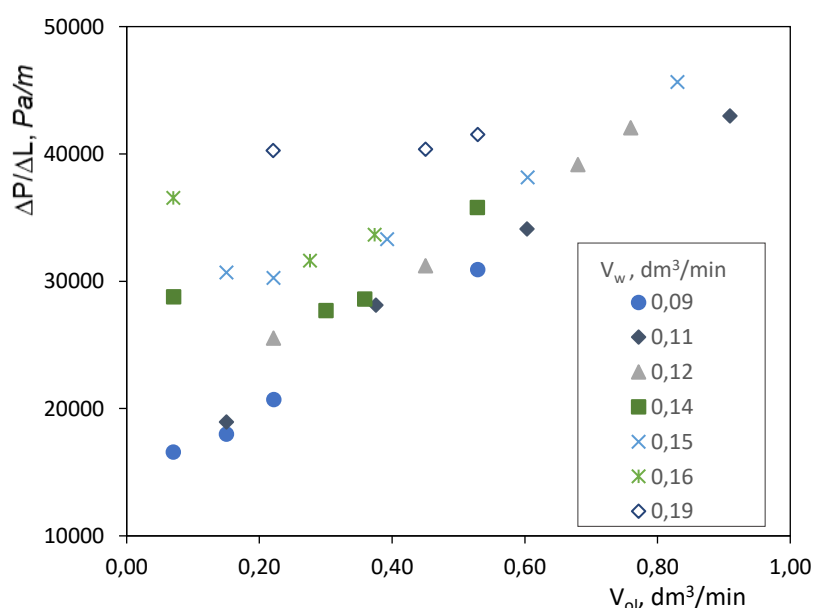
Rys. 5.45. Porównanie oporów przepływu układu woda-olej przez piany A120 i Ni20

Poza tym, zmierzone opory przepływu przez pianę Ni20 okazały się znacznie większe niż dla piany A120. Różnice te wynikają z poziomu obserwowanych zaburzeń struktur przepływu wywołanych obecnością piany i objawiających się wzrostem dyspersji faz, której stopień zależał od warunków przepływu oraz składu mieszaniny dwufazowej. W przypadku piany Ni20 obserwowano silniejszą dyspersję faz. W jej wyniku dochodziło do powstania nietrwałej emulsji, co wyjaśnia wyraźnie większe opory przepływu. Z kolei początkowy spadek oporów przepływu przez pianę Ni20 można wytłumaczyć zmianą fazy ciągłej. Obserwacje wykazały, że przy udziale oleju rzędu

50% obj. fazę ciągłą stanowiła woda, a olej ulegał silnej dyspersji tworząc emulsję. Przy udziale oleju do ok. 60% obj. to już on stanowił fazę ciągłą, a rozproszeniu ulegała woda. Jednak jej duże napięcie powierzchniowe uniemożliwiało trwałą emulsyfikację układu. Woda ulegała jedynie częściowemu rozproszeniu w oleju, a poza tym jego część płynęła górną częścią kanału w postaci czystej warstwy. Mimo wzrostu ilości oleju w mieszaninie dwufazowej odnotowano mniejsze opory jej przepływu, gdyż lepkość częściowo zdyspergowanego układu jest niższa od lepkości emulsji. Dalszy wzrost oporów wynikał ze wzrostu udziału oleju oraz strumienia mieszaniny dwufazowej.

Liniowy charakter zmian oporów przepływu układu dwufazowego woda-olej przez pianę A120 w zależności od składu mieszaniny był zachowany w całym zakresie uwzględnionych podczas badań zmian udziałów faz w układzie ciecz-ciecz.

Również obserwacje poczynione podczas przepływu ciekłych układów dwufazowych przez pianę Ni20 okazały się powtarzalne, o czym świadczą przedstawione na rys. 5.46. zmiany oporów zmierzone przy różnych strumieniach wody.



Rys. 5.46. Opory przepływu układu woda-olej przez pianę Ni20 w funkcji strumienia oleju przy stałych strumieniach wody


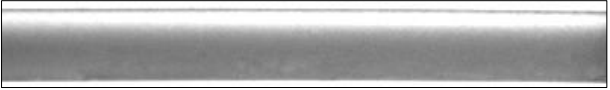


Z układu punktów pokazanych na wykresie można wnioskować, że do spadku oporów dochodzi przy udziale wody równym około 50%, czyli podobnie, jak podczas przepływu w pustej rurze. Wówczas należy się bowiem spodziewać inwersji faz. Zauważyć też można, że im mniejszy jest udział oleju w układzie dwufazowym,

tym większe są opory przepływu. Może to świadczyć o łatwiejszym rozpraszaniu się oleju w fazie wodnej, co prowadzi do emulsyfikacji układu.

W tabeli 5.17. przedstawiono główne zaburzenia struktur przepływu układu ciecz-ciecz przez obie z wykorzystanych pian metalowych. Warto dodać, że w przypadku trwałej emulsyfikacji układu ciecz-ciecz nie jest możliwe odbudowanie się struktury dwufazowej w rurze za odcinkiem wypełnionym pianą. Tymczasem w zaburzonych układach gaz-ciecz jest to możliwe, ale wymaga czasu (drogi przepływu). Tego zagadnienia jednak nie badano.

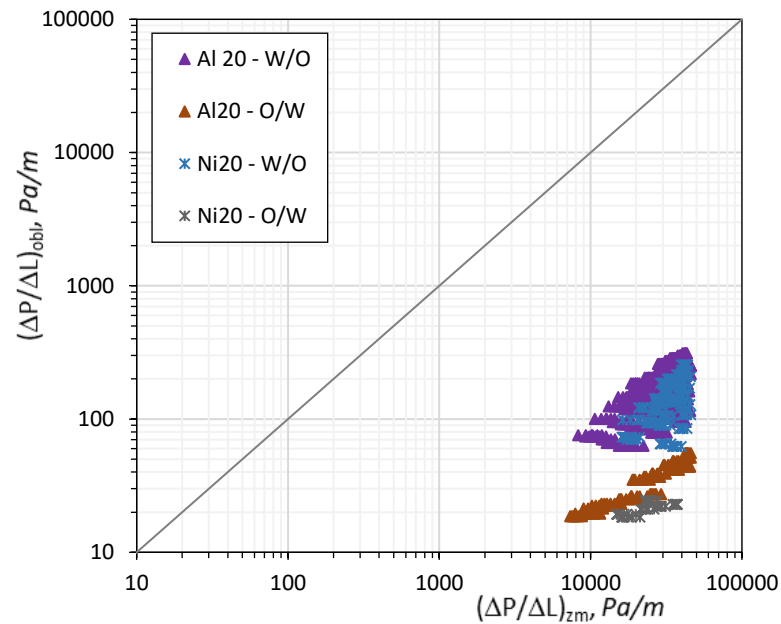
Tabela 5.17.

Zmiany struktur przepływu układu woda-olej wywołane obecnością piany

Piana	Struktura przepływu <u>przed</u> pianą	Struktura przepływu <u>za</u> pianą
Al20	<ul style="list-style-type: none"> - rozwarstwiona, - kropłowa 	 <p>Zaobserwowanym strukturom towarzyszyło częściowe rozproszenie faz, nasilająca się wraz ze wzrostem strumienia układu. Zaburzenie obserwowano w zakresie udziału wody 10-45% obj.</p>
Ni20	<ul style="list-style-type: none"> - rozwarstwiona, - falowa, - kropłowa, 	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> 1)  </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> 2)  </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> 3)  </div> </div> <p>Obecność piany w rurze prowadzi do zwiększenia stopnia rozproszenia faz, którego nasilenie zależy głównie od rodzaju fazy ciągłej oraz udziału składników układu ciecz-ciecz. Gdy fazę ciągłą tworzy faza olejowa, a udział wody wynosi ok. 40%obj. wówczas dochodzi do częściowego rozproszenia faz (1). Gdy udział faz jest jednakowy, obserwuje się rozproszenie faz w całej objętości kanału przepływowego (2), natomiast gdy fazę ciągłą stanowi woda, a udział oleju wynosił ok. 30%obj., to dochodzi do tworzenia się emulsji (3).</p>

Jak dotąd, w literaturze brak jest doniesień dotyczących metod obliczania oporów przepływu dwóch niemieszających się cieczy w rurze wypełnionej pianą metalową. Z kolei istniejące metody obliczania tej wielkości odnoszące się do układu gaz-ciecz nie sprawdzają się w odniesieniu do układu ciecz-ciecz, co podaje autor pracy [109]. Jednak, w pracy tej zaproponowano sposób obliczania oporów dla układu ciecz-

ciecz płynącego w pustej rurze. Sposób ten bazuje na równaniu (4.17). Podjęto więc próbę jej wykorzystania w odniesieniu do przepływu w rurze wypełnionej pianą. Wyniki obliczeń porównawczych przedstawiono na rys. 5.47. Wynika z niego, że metoda zupełnie nie oddaje charakteru zmian oporów przepływu układu ciecz-ciecz w rurze wypełnionej pianą metalową. Jednak uzyskiwane na jej podstawie wartości mogą być traktowane jako parametry odniesienia w koniecznej do opracowania nowej metodzie obliczeniowej, która dotyczy będzie rozważanego przypadku przepływu.



Rys. 5.47. Porównanie zmierzonych oporów przepływu układu ciecz-ciecz przez piany metalowe obliczonymi wg (4.17)

Opracowując nową metodę obliczania oporów dotyczącą rozważanego przypadku przyjęto podobnie, jak wcześniej, iż proponowany model matematyczny nie powinien być nadmiernie rozbudowany oraz nie powinien zawierać w sobie parametrów trudnych do ustalenia.

Postać ogólną równania oparto na metodzie Hapanowicza [109]. Odpowiadające jej równanie (4.17) uwzględnia złożoność zjawisk towarzyszących przepływowi układów ciecz-ciecz. Dzięki temu z powodzeniem jest implementowana przez innych badaczy np. do matematycznego ujęcia oporów przepływu dwóch niemieszających się cieczy w układzie gaz-ciecz-ciecz [155], czy też płynącego w rurze pionowej układu ciecz-ciecz [156].

Proponowane równanie ma postać

$$\Delta P_{c-c} = \Phi_{c-c} \cdot \Delta P_{c-c,r}, \quad (5.18)$$

w którym poprawkę uwzględniającą obecność piany należy obliczać jako

$$\Phi_{c-c} = 0,86 \text{Re}_w^{-1,51} \text{Re}_{ol}^{1,39} \left(\frac{d_r}{d_h} \right)^{-1,03} \zeta_w^{1,25}, \quad (5.19)$$

natomiast opory przepływu w pustej rurze $\Delta P_{c-c,r}$ wg równania (4.17). Z kolei liczby Reynoldsa dla wody i dla oleju definiuje równanie (5.10), średnicę hydrauliczną równanie (5.8), a udział wody równanie (5.17). Taka postać proponowanej zależności pozwala na jednoczesne uwzględnienie zjawisk znamienych dla przepływu układu dwufazowego ciecz-ciecz oraz zaburzeń spowodowanych pianą obecną w rurze.

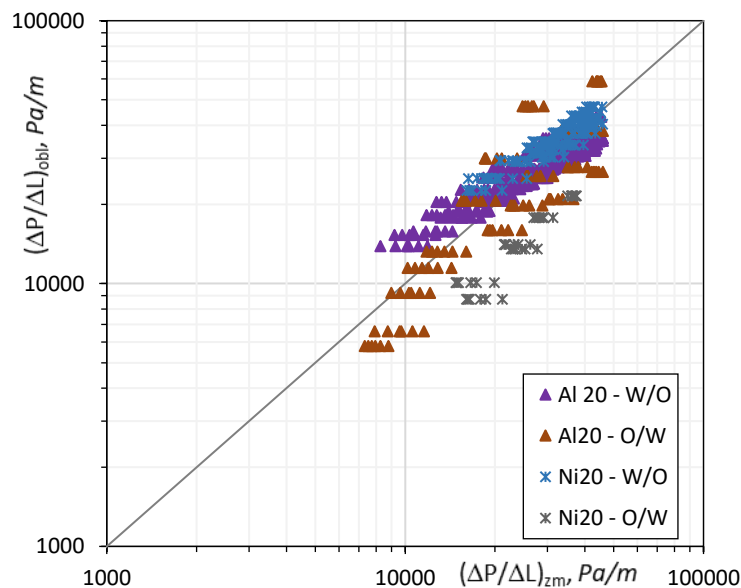
Wyniki analizy wariancji dla równania (5.19) zestawiono w tabeli 5.18. Jak z niej wynika, pod względem statystycznym dobrze oddaje ono badaną zależność.

Tabela 5.18.

Analiza wariancji dla równania (5.19)

Analiza wariancji					
	Liczba stopni swobody	Suma kwadratów	Średni kwadrat	Statystyka F	Istotność F
Regresja	5	242,1569	48,4314	1090,139	$1,5 \cdot 10^{-305}$
Resztkowy	625	34,7084	0,0555		
Razem	630	276,8653			

Porównanie wartości oporów obliczonych zgodnie z opracowaną metodą z wartościami zmierzonymi przedstawiono na rys. 5.48.



Rys. 5.48. Porównanie zmierzonych wartości oporów przepływu układu ciecz-ciecz przez piany metalowe z obliczonymi wg równania (5.19)

Jak na nim widać, zaproponowana metoda szczególnie dobrze sprawdziła się w przypadku układów W/O. Dla układów O/W widoczny jest większy rozrzut wyników, lecz mimo to są one zadowalające.

Dokładność zaproponowanej metody zweryfikowano na podstawie parametrów statystycznych uzyskując: średni błąd względny równy 0%, średni rozrzut $\pm 18\%$, odchylenie standardowe na poziomie 23% oraz współczynnik determinacji równy 0,6563. Ustalono również, że błąd względny mniejszy niż $\pm 30\%$ dotyczy ponad 80% punktów.

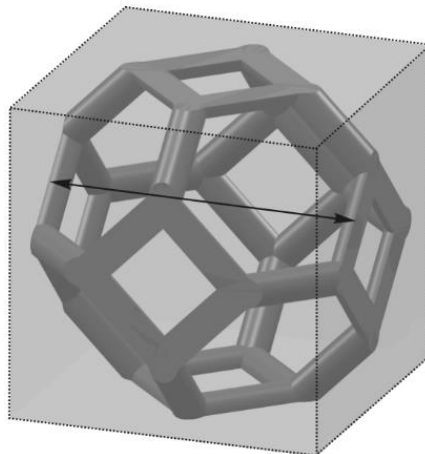
Co ważne, proponowana metoda nie wymaga znajomości szczegółowych parametrów opisujących strukturę piany, co ułatwia jej praktyczne stosowanie i może być traktowane jako istotna zaleta.

6. Badania numeryczne

6.1. Sposób i zakres prowadzenia badań

W ramach pracy podjęto również próbę wykonania badań numerycznych dotyczących wyznaczenia oporów przepływu układu dwufazowego w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową. Ponieważ badania te nie były głównym celem pracy, wykonano je jedynie dla najbardziej typowego układu dwufazowego, czyli powietrze-woda.

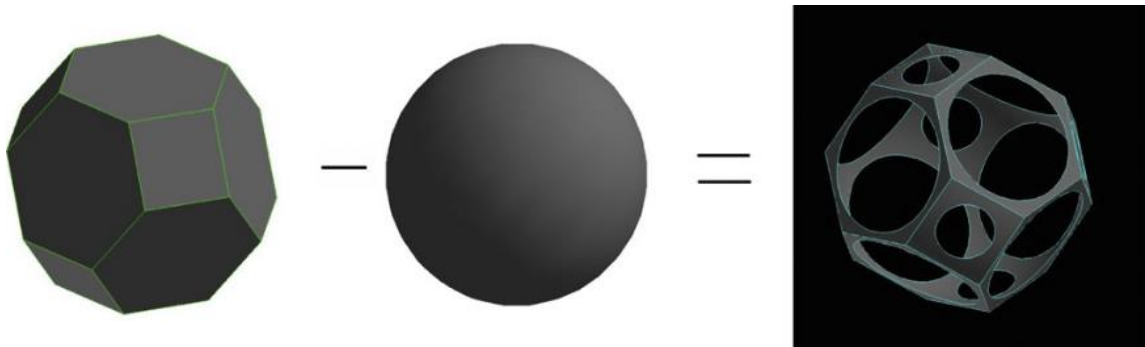
Główną trudnością związaną z prowadzeniem badań numerycznych przepływu płynów przez piany metalowe jest model geometryczny samej piany. W literaturze przedmiotu spotkać można różne podejścia do modelowania geometrii piany, a wśród nich dwie główne grupy: geometrię modelową oraz geometrię rzeczywistą. Autorzy badań reprezentują różne podejścia dotyczące elementarnej komórki wykorzystywanej do modelowania struktury piany metalowej. Jak podano w pracy [157], w celu oceny właściwości transportowych płynów przez piany metalowe obecnie używa się kilku modeli geometrycznych komórki. Jednym z nich jest model proponowany m.in. w pracy [72], czyli czternastościan nazywany również modelem *Kelvina*. Na rys. 6.1. przedstawiono taką komórkę w postaci modelu geometrycznego.



Rys. 6.1. Model geometryczny komórki *Kelvina* wg [87]

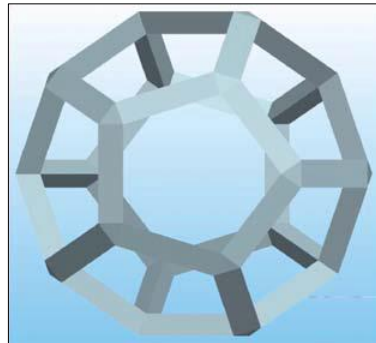
W celu wygenerowania jej geometrii opartej na sferze, konieczne jest w pierwszej kolejności skonstruowanie czternastościanu (o wymiarach odpowiadających rzeczywistej strukturze piany) poprzez odcięcie sześciu rogów ośmiościanu. Kolejnym krokiem jest wygenerowanie sfery w centrum czternastościanu

i odjęcie jej objętości od bryły czternastościanu [158]. Procedurę tą przedstawiono schematycznie na rys. 6.2.



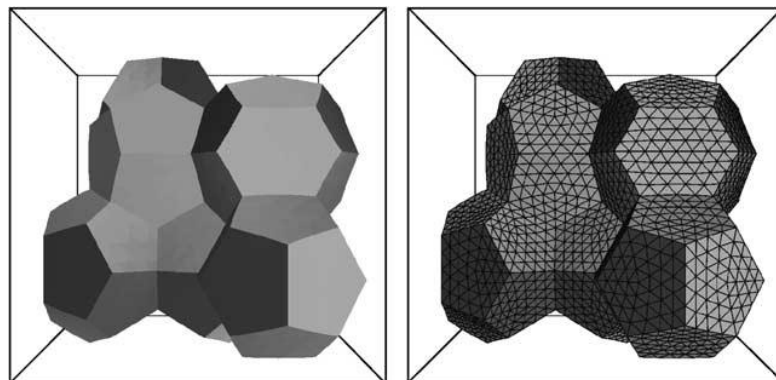
Rys. 6.2. Istota tworzenia geometrii komórki *Kelvina*, wg [158]

Z kolei autorzy pracy [157] jako model elementarnej komórki piany proponują pięciokątny dwunastościan. Na rys. 6.3. zaprezentowano strukturę tego modelu.



Rys. 6.3. Struktura pięciokątnego dwunastościanu, wg [157]

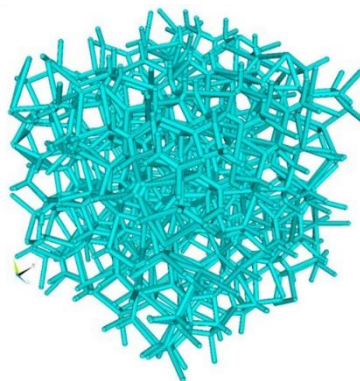
Inną geometrią reprezentującą strukturę piany metalowej jest przedstawiona w pracy [159] ulepszona wersja czternastościanu. Jest to struktura ośmiu komórek o równej objętości składających się z sześciu 14-bocznych wielościanów o dwunastu pięciokątnych i dwóch sześciokątnych ścianach bocznych oraz z dwóch pięciokątnych dwunastościanów. Tak definiowaną jednostkową strukturę modelową piany przedstawiono na rys. 6.4.



Rys. 6.4. Model struktury piany wskazany w pracy [159]

Nieco innym podejściem do modelowania struktury piany jest jej generowanie na drodze tzw. teselacji Laguerre-Voronoi. Cechą charakterystyczną tak skonstruowanego modelu jest losowość ułożenia poszczególnych komórek, podczas gdy wcześniej opisane modele odznaczają się powtarzalnym i uporządkowanym ich ułożeniem [129,160,161].

Autorzy pracy [129] przeprowadzili obliczenia numeryczne przepływu wody przez wygenerowany metodą teselacji Laguerre-Voronoi model piany metalowej (10 PPI, $\varepsilon \approx 0,81 \div 0,84$) oraz strukturę rzeczywistej piany metalowej (10 PPI, $\varepsilon \approx 0,77 \div 0,79$) odwzorowaną na podstawie jej zdjęć tomograficznych i odpowiedniego oprogramowania komputerowego. W efekcie uzyskano nieznacznie niższe wartości oporów przepływu dla sztucznej struktury względem struktur pian rzeczywistych, co tłumaczono nieco wyższą ich porowatością. Następnie w sposób eksperymentalny zmierzono opory przepływu wody przez te struktury metalowe. W tym celu sztucznie wygenerowany model piany metalowej „wyprodukowano” z proszku tytanowego metodą selektywnego spiekania laserowego. Odnotowano, że wyniki eksperymentu są zbieżne z rezultatami obliczeń numerycznych, potwierdzając tym samym słuszność zastosowanych w pracy procedur i algorytmów. Na rys. 6.5. przedstawiono strukturę piany wygenerowaną na drodze teselacji Laguerre-Voronoi. Procedura jej tworzenia jest dobrze opisana m.in. w pracach [129,160,161].



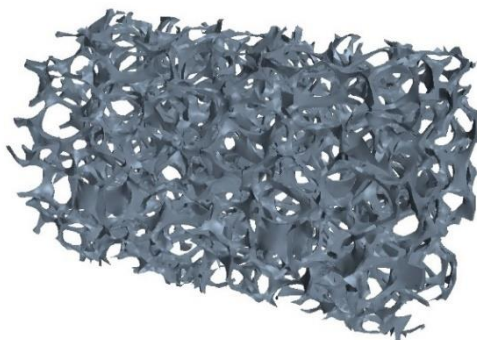
Rys. 6.5. Model struktury piany metalowej wygenerowany na drodze teselacji Laguerre-Voronoi, wg [160]

Z przeglądu doniesień literaturowych wynika, że do numerycznego modelowania przepływu płynów przez piany metalowe stosowany jest głównie model *Kelvina* [162]. Jako jeden z powodów, dla którego opisana na sferze komórka *Kelvina* może najlepiej oddawać rzeczywistą mikrostrukturę piany metalowej jest fakt, że popularna metoda produkcji pian metalowych oparta jest na kształtowaniu ich struktury za pomocą wdmuchiwania gazu do stopionego metalu, co w rezultacie,

po procesie zastygania, daje właśnie strukturę czternastościanu przypominającego kształt sfery. Taką metodę produkcji opisano w pracy [158]. Inną przesłanką za powszechnym stosowaniem modelu komórki *Kelvina* (spośród innych geometrii) jest łatwość jej konstruowania oraz mało problematyczna procedura numeryczna, co podano w pracy [135].

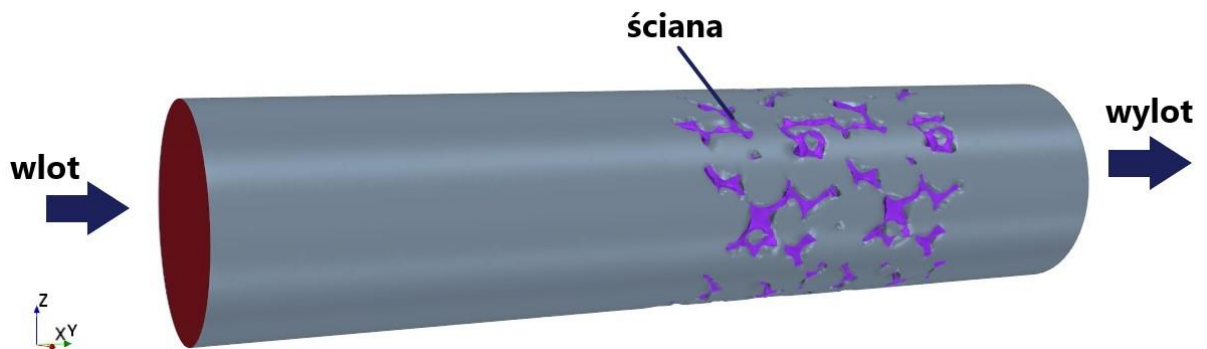
Autorzy pracy [163] przedstawili wyniki szczegółowej analizy mikrostruktury i morfologii czterech próbek otwarto-komórkowej piany aluminiowej o gęstości upakowania porów 5, 10 i 20 PPI, prowadzonej przy zastosowaniu rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Analiza obrazu wykazała duże zróżnicowanie rozmiarów włókien szkieletu piany, co świadczy o nieregularności jego struktury. Stwierdzono też, iż stosowanie modelu komórki elementarnej z rys. 6.4. może być bardziej dokładna w opisywaniu rzeczywistej struktury piany niż model *Kelvina*. Podobne obserwacje odnotowano także w pracy [164]. Jednak autorzy [165] podkreślają, że ze względu na stochastyczną naturę pian metalowych modele oparte na komórkach elementarnych jedynie przybliżają ich prawdziwą mikrostrukturę i nie są w stanie uchwycić skomplikowanych szczegółów przepływu płynu i wymiany ciepła w takich mediach. Jednocześnie zarekomendowano wykorzystanie modelu odwzorowanej geometrii piany metalowej przy wykorzystaniu mikrotomografii komputerowej. Taka teza została potwierdzona również w pracy [166].

W oparciu o przedstawione powyżej doniesienia literaturowe zdecydowano, aby we własnych badaniach numerycznych wykorzystać model zrekonstruowanej geometrii rzeczywistej piany. Badania te zrealizowano z wykorzystaniem modelu piany Al40. Jej odwzorowanie wykonano na drodze mikrotomografii komputerowej w Instytucie Fizyki UJ przy użyciu mikrotomografu komputerowego SkyScan 1172 o rozdzielczości 5,99 μm . Uzyskany model struktury próbki piany przedstawiono na rys. 6.6.



Rys. 6.6. Model 3D rzeczywistej struktury piany Al40

Został on zaimportowany do oprogramowania, które wykorzystano do prowadzenia symulacji numerycznych. Stosowanie skomplikowanej i nieregularnej struktury zrekonstruowanego modelu rzeczywistej geometrii piany wymaga ogromnych zasobów obliczeniowych, koniecznych do numerycznej analizy przepływu płynów. Z tego względu zdecydowano, aby ograniczyć rozmiary modelu piany. Mając na uwadze sugestie autorów pracy [165] uznano, że liczba ok. 10 porów w kierunku przepływu płynów jest wystarczająca, dla uzyskania warunków przepływu w pełni rozwiniętego. Badania numeryczne zrealizowano podczas pobytu na stażu badawczym na Politechnice w Chemnitz (Technische Universität Chemnitz) w ramach programu *InProTUC*. Prowadzono je z wykorzystaniem oprogramowania Simcenter STAR-CCM+® (Siemens) w wersji 13.06. Dysponując modelem geometrycznym piany metalowej wygenerowano domenę płynu, tworząc przy tym dłuższy odcinek pustej rury przed pianą i krótszy odcinek pustej rury za pianą. Pozwoliło to na przeprowadzenie obliczeń z ukształtowanym profilem prędkości płynów, który wynikał z warunków przepływu. Wygenerowaną domenę płynu przedstawiono schematycznie na rys. 6.7.



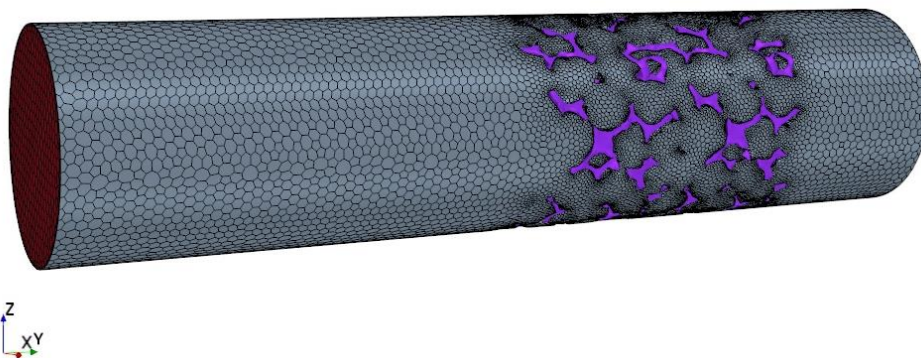
Rys. 6.7. Obiekt badań numerycznych

Obszar zaznaczony na fioletowo to modelowy szkielet piany stanowiący strefę ciała stałego, natomiast objętość szarej bryły stanowi domenę płynu. Warunki brzegowe ustawiono jako:

- *velocity-inlet* na płaszczyźnie wlotowej domeny płynu,
- *pressure-outlet* na płaszczyźnie wylotowej domeny płynu,
- *wall* na powierzchni między domeną płynu a szkieletem modelowym piany.

Również w programie STAR-CCM+® wygenerowano siatkę dyskretyzacyjną. Ze względu na nieregularną geometrię domeny płynu wywołaną obecnością piany wykorzystano siatkę polihedralną, przy czym warstwa przyścienna siatki składała się z dwóch warstw komórek pryzmatycznych o grubości 0,1mm i stosunku rozciągania

warstw równym 1,5. Dodatkowo, w bezpośrednim sąsiedztwie piany metalowej zastosowano siatkę o drobniejszych komórkach, których rozmiar docelowy był równy 0,2mm. Taka konieczność nie istniała w odcinku pustej rury przed i za pianą, zatem w tych obszarach zastosowano siatkę o większych rozmiarach, dążących do 0,5 mm. Było to korzystne także ze względu na zredukowanie koniecznej pamięci obliczeniowej stacji roboczej. W efekcie tych działań wygenerowana siatka składała się łącznie z 1.121.212 komórek. Jej widok 3D przedstawiono na rys. 6.8.



Rys. 6.8. Widok powierzchni domeny płynu z naniesioną siatką polihedralną

Do symulacji przepływu dwufazowego gaz-ciecz wykorzystano model Eulerian Multiphase, a w szczególności *Multiphase Segregated Flow*, definiujący interakcję międzyfazową. Model ten z powodzeniem może być stosowany w odniesieniu do układów dyspersyjnych, jak i rozdzielonych, gdyż traktuje każdą fazę jako przenikającą się ciągłość. Z jego pomocą rozwiązywane są równania transportu masy, pędu i energii dla każdej fazy, przy czym mają one wspólne pole ciśnienia. Zgodnie z przyjętym modelem objętość domeny płynu jest zajęta przez każdą z faz zgodnie z równaniem

$$V_i = \int_V \alpha_i dV, \quad (6.1)$$

gdzie α_i oznacza udział objętości i-tej fazy, przy czym suma udziałów objętości wszystkich faz powinna być równa jedności. Równanie ciągłości dla i-tej fazy przyjmuje postać

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha_i \rho_i dV + \oint_A \alpha_i \rho_i v_i \cdot da = \int_V \sum_{j \neq i} (m_{ij} - m_{ji}) dV + \int_V S_i^\alpha dV. \quad (6.2)$$

Z kolei równanie pędu zapisuje się jako

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha_i \rho_i dV + \oint_A \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i \otimes \mathbf{v}_i \cdot d\mathbf{a} = \\
& = - \int_V \alpha_i \nabla p dV + \int_V \alpha_i \rho_i \mathbf{g} dV + \oint_A \left[\alpha_i (\mathbf{T}_i + \mathbf{T}'_i) \right] \cdot d\mathbf{a} + \int_V \mathbf{M}_i dV + . \\
& + \int_V (\mathbf{F}_{\text{int}})_i dV + \int_V \mathbf{S}_i^\alpha dV + \int_V \sum_{i=1}^n (m_{ij} \mathbf{v}_j - m_{ji} \mathbf{v}_i) dV
\end{aligned} \tag{6.3}$$

Wykonane obliczenia numeryczne dotyczyły przepływu adiabatycznego, a zatem postać równania energii była nieistotna. W obliczeniach uwzględniono oddziaływanie sił grawitacji. Nie uwzględniono natomiast poślizgu faz i chropowatości ścianki kanału oraz powierzchni piany.

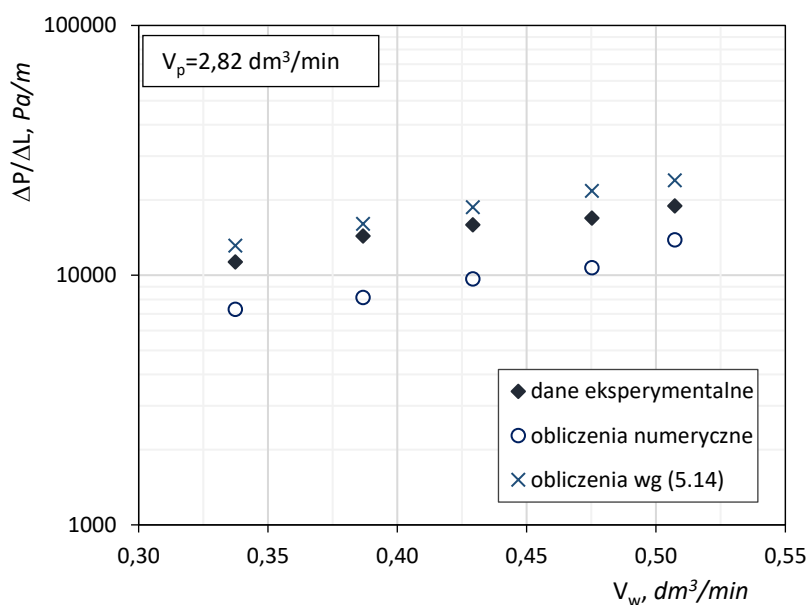
Symulacje prowadzono w warunkach niestacjonarnego przepływu laminarnego trwającego 10 s czasu fizycznego z krokiem co 0,01s, przy 5 wewnętrznych iteracjach. Po ocenie przebiegu zmian rezyduów uznano, że ilość wykonanych iteracji w łącznej liczbie 5 000 była wystarczająca na potrzeby prowadzonych obliczeń. Za ostateczną uznano uśrednioną wartość oporów przepływu od pierwszej do dziesiątej sekundy rzeczywistego czasu symulacji z krokiem 0,1 s. Właściwości fizyczne gazu i cieczy odpowiadały właściwościom poszczególnych płynów przy temperaturze $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. Obliczenia numeryczne wykonano w zakresie prędkości pozornych cieczy 0,7 – 0,76 m/s oraz 0,64 m/s dla gazu. Natomiast ciśnienie na wylocie było równe ciśnieniu atmosferycznemu.

Charakterystyczną cechą zaproponowanej metodyki prowadzenia symulacji numerycznych jest ustalenie w warunkach początkowych (za pomocą odpowiednio zaprogramowanych funkcji) pola przepływu rozdzielonego obu płynów. Zgodnie z ich właściwościami fizycznymi przyjęto, że ciecz znajdowała się w dolnej części kanału, zajmując jego objętość odpowiadającą jej danemu udziałowi. Zabieg ten był możliwy ze względu na fakt, iż strumienie poszczególnych faz odpowiadały warunkom przepływu laminarnego i strukturze rozwarstwionej w pustej rurze. Dzięki zastosowanej procedurze możliwe było też ograniczenie długości odcinka rury niewypełnionej pianą, w którym kształtowałyby się odpowiednia struktura dwufazowa. Tym samym ograniczono liczbę komórek siatki i przyspieszono przeprowadzenie symulacji. Przyjęta metodyka pozwoliła nie tylko wyznaczyć opory przepływu układu gaz-ciecz przez pianę metalową, ale również umożliwiła obserwacje oddziaływania obecnego w rurze szkieletu piany na jednoczesny przepływ cieczy i gazu oraz ich wzajemne interakcje. Warto też wspomnieć, że przedstawione podejście do badań numerycznych stanowi

jedną z nielicznych (spośród dotąd opublikowanych) prób symulacji numerycznych przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz przez pianę metalową.

6.2. Ocena uzyskanych wyników

Na rys. 6.9. przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych uzyskane dla układu powietrze-woda na tle wartości zmierzonych podczas eksperymentu oraz ustalonych według (5.14) z wykorzystaniem równania (5.15) do wyznaczenia parametru Φ_{g-c} .



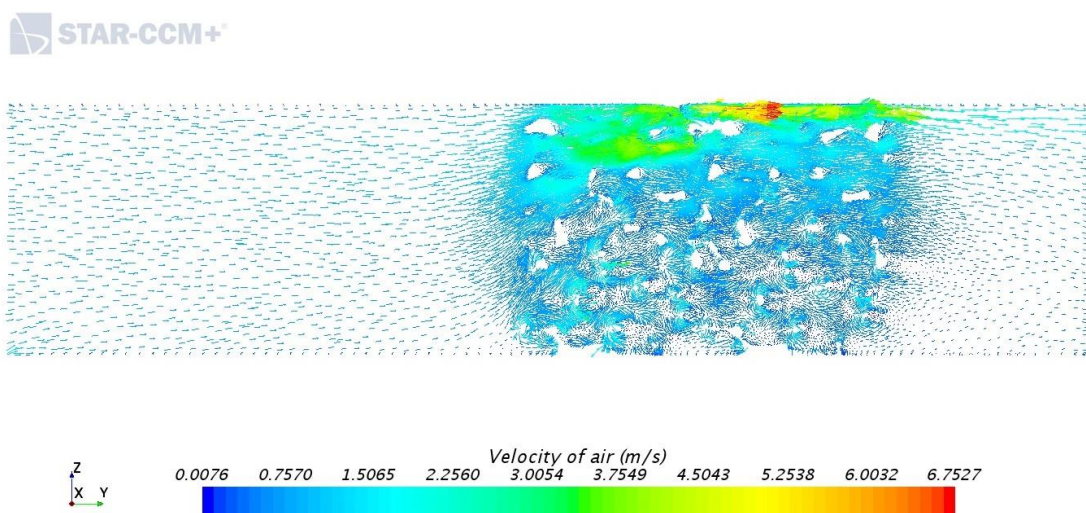
Rys. 6.9. Opory przepływu układu powietrze-woda przez pianę metalową wyznaczone różnymi metodami

Wartości uzyskane na drodze numerycznej zwiększają się w sposób potęgowy wraz ze wzrostem strumienia wody. Podobne spostrzeżenia podano przy opisie wyników eksperymentów dotyczących przepływu tego samego układu dwufazowego przez pianę metalową. W związku z tym można stwierdzić, że wyniki badań numerycznych charakteryzuje podobna tendencja zmian badanej wielkości. Analizując uzyskane wyniki w sposób ilościowy łatwo zauważyć, że wartości obliczone numerycznie są jednak wyraźnie niższe od zmierzonych. Średni błąd względny wartości numerycznych do danych eksperymentalnych wynosi -36%. Lepsze rezultaty otrzymano obliczając opory tego przepływu zgodnie z metodą zaproponowaną w niniejszej pracy, a wyrażoną równaniem (5.14). W jego przypadku średni błąd względny wynosi +20%, przy czym wartości obliczone są większe od zmierzonych.

Odnosząc się do wyników uzyskanych przez innych badaczy zauważono, iż obliczone numerycznie przez autora pracy [87] opory przepływu układów

jednofazowych odznaczały się jedynie kilkunastoprocentowym błędem. Z kolei autorzy pracy [159], w wyniku prowadzonych przez siebie symulacji numerycznych przepływu wody przez pianę metalową, otrzymali wartości oporów niższe od zmierzonych średnio o 25%. Za przyczynę tej niezgodności uznano brak uwzględnienia w symulacji efektów przyściennych. Tymczasem w niniejszej pracy przyjęto, iż przyczyny różnicy pomiędzy obliczonymi numerycznie a zmierzonymi eksperymentalnie wartościami oporów przepływu należy upatrywać w tym, że w procedurze prowadzonych symulacji numerycznych nie uwzględniono chropowatości ścianki kanału oraz chropowatości powierzchni struktury piany. Mając równocześnie na uwadze, że przepływ dwufazowy jest znacznie bardziej złożony niż przepływ jednofazowy, a jego cechą charakterystyczną jest występujący znaczący poślizg między fazami (co również nie zostało uwzględnione w procedurze symulacji numerycznych) należy uznać, że przyjęta metodyka prowadzenia obliczeń numerycznych jest poprawna. Pozostaje jednak obszar dalszych prac mających na celu ustalenie poprawki uwzględniającej wpływ wymienionych wyżej czynników na opory przepływu dwufazowego gaz-ciecz przez pianę metalową.

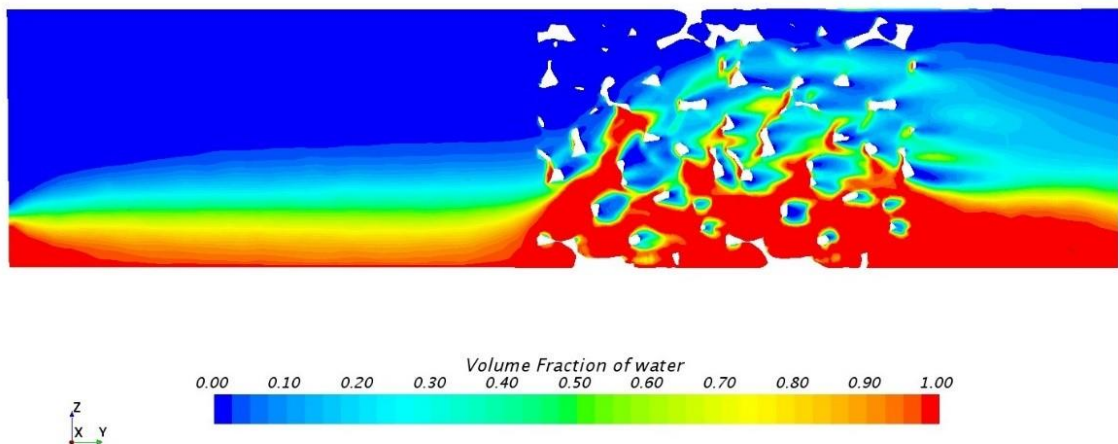
Dużą zaletą symulacji numerycznych okazała się możliwość wizualizacji zachowania się przepływających płynów na skutek kontaktu z przeszkodą, jaką jest umieszczona w kanale przepływowym piana metalowa. Na rys. 6.10. przedstawiono uzyskany podczas prowadzenia symulacji numerycznych rozkład prędkości lokalnych powietrza.



Rys. 6.10. Rozkład prędkości lokalnych powietrza w przekroju wzdłużnym rury wypełnionej pianą metalową

W oparciu o widoczne w tym rozkładzie zaburzenia, możliwe jest wskazanie przyczyny znacznego wzrostu oporów przepływu układu powietrze-woda przez pianę, w stosunku do przepływu w pustej rurze. Przed napotkaniem przeszkody w postaci piany, obie fazy płyną z taką samą prędkością w jednym kierunku. Przepływ obu faz ma charakter laminarny, co w konsekwencji odpowiada rozwarstwionej strukturze przepływu dwufazowego. W wyniku kontaktu z pianą metalową zarówno elementy powietrza, jak i wody gwałtownie zmieniają kierunki i prędkości swojego przepływu, w wyniku czego tworzą się wiry. Każda zmiana wektora prędkości wymaga wykonania pracy, do czego konieczna jest energia. W tym przypadku energia ta jest pobierana bezpośrednio z płynu, co znacząco obniża jego ciśnienie. To właśnie wysoki poziom turbulencji lokalnych jest główną przyczyną tak wysokich oporów przepływu układu dwufazowego przez piany metalowe. Dodatkowo, jak można wnioskować z rys. 6.11. prezentującego rozkład udziałów objętości wody (a tym samym obu faz) w kanale, stopień dyspersji faz w obszarze piany jest zdecydowanie większy niż poza nią.

STAR-CCM+



Solution Time 10 (s)

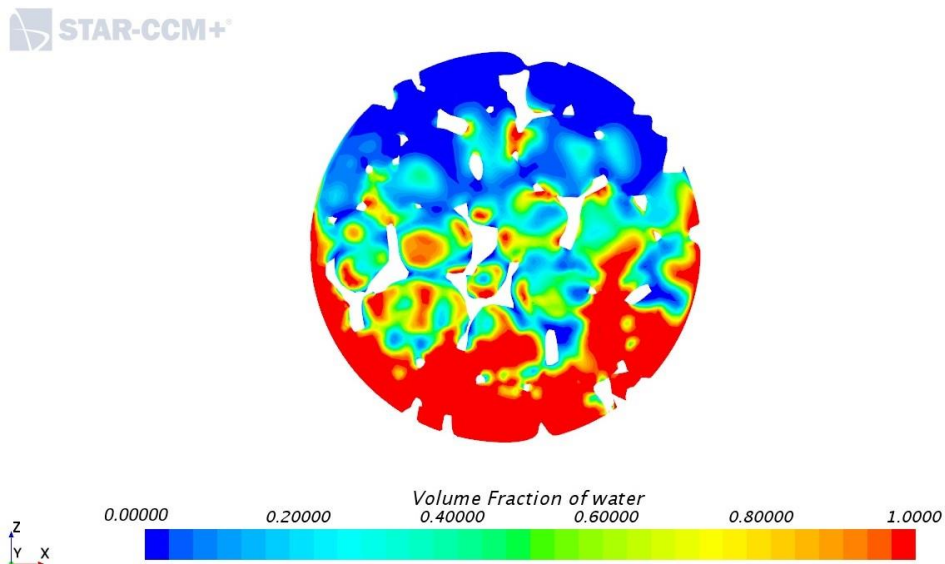
Rys. 6.11. Rozkład fazy ciekłej w objętości kanału

Łatwo również spostrzec, że w obszarze piany ma miejsce wyraźne, częściowe zatrzymanie cieczy. W związku z tym należy uznać, że może się ona kontaktować ze znacznie większą powierzchnią ścianki rury, niż wynika to z warunków odpowiadających typowej rozwarstwionej strukturze przepływu dwufazowego.

Jak wyraźnie widać na rys. 6.12., z powierzchnią piany metalowej kontaktuje się z kolei głównie dyspersyjna mieszanina powietrza z wodą. Efekt ten jest bardzo korzystny w odniesieniu do intensyfikacji ruchu ciepła, zarówno w samej mieszaninie

dwufazowej, jak też pomiędzy tą mieszaniną a powierzchnią kanału przepływowego wypełnionego pianą metalową.

Podsumowując można stwierdzić, że duże opory przepływu układu powietrze-woda w rurze wypełnionej pianą wynikają ze wzrostu zapotrzebowania na energię konieczną do tworzenia się wirów oraz zwiększenia powierzchni międzyfazowej, a także pokonania sił tarcia o zwiększoną powierzchnię kanału w obszarze piany. Ponadto, przedstawione wyniki wskazują, że przewidując opory przepływu dwufazowego gaz-ciecz lepiej jest posługiwać się metodą analityczną (5.14), niż przedstawioną w niniejszej pracy metodą numeryczną.



Rys. 6.12. Udział wody w przekroju poprzecznym rury wypełnionej pianą metalową

Obliczenia numeryczne dają mniej dokładne wyniki, a także są wymagające pod względem sprzętu i umiejętności, jakimi należy dysponować. Niemniej jednak symulacje numeryczne są bardzo dobrym dopełnieniem badań eksperymentalnych, umożliwiającym obserwowanie możliwych zjawisk zachodzących w wypełnionej pianą rurze, co jest bardzo utrudnione w warunkach laboratoryjnych.

7. Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych szczegółowych analiz literaturowych, dotyczących możliwości wykorzystania piany metalowej jako turbulizatora zwiększającego wydajność wymiennika ciepła, wykazano duże rozbieżności w opisie matematycznym przepływu płynów przez to medium porowate oraz braki w odniesieniu do przepływu układów wielofazowych. Stwierdzono, że istniejące w literaturze przedmiotu zależności opisujące opory przepływu jednofazowego przez piany metalowe są znacząco zróżnicowane, a ich stosowanie bywa trudne w związku z ograniczonymi możliwościami dysponowania wartościami parametrów, które zawarte są w proponowanych korelacjach. Zauważono również brak dostatecznej wiedzy w odniesieniu do przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz przez piany metalowe. Dostępne w literaturze przedmiotu metody obliczania oporów tego przepływu są nieliczne, a ich stosowalność ograniczona. Brak jest też publikacji poświęconych przepływowi układu ciecz-ciecz przez piany metalowe.

Istniejąca luka w aktualnym stanie wiedzy odnośnie przepływu płynów przez piany metalowe stanowiła podstawę do podjęcia w tym zakresie badań eksperymentalnych, analitycznych oraz numerycznych. Efekty tych działań można scharakteryzować w następujący sposób:

- w oparciu o wyniki eksperymentalnych badań własnych oraz wnioski innych badaczy opracowano nową metodę wyznaczania liczby oporu (równanie (5.11)). Jej wykorzystanie pozwala obliczać opory jednofazowego przepływu gazu i cieczy w rurze wypełnionej pianą metalową (równanie (5.12)). Metodę tą uproszczono pod względem koniecznych do uwzględnienia parametrów i wielkości (równanie (5.13)), co ułatwia jej stosowanie bez istotnego wpływu na dokładność obliczeń. Dzięki temu stosowanie modelu (5.11) jest możliwe nawet wówczas, gdy utrudnione jest dysponowanie wszystkimi jego parametrami. Wymienione powyżej cechy zaproponowanej metody obliczania oporów przepływu jednofazowego w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową czynią ją stosunkowo uniwersalną, co wyróżnia ją spośród dotychczas dostępnych metod.
- Opracowano też nową metodę obliczania oporów układu gaz-ciecz płynącego w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową (równania (5.14) i (5.15)). W tym przypadku również zaproponowano uproszczone równanie (5.16)

niezawierające trudnych do wyznaczenia szczegółowych parametrów opisujących strukturę piany. Na podstawie przeprowadzonej oceny statystycznej skuteczności obu procedur obliczeniowych należy stwierdzić, że bardziej dokładna jest metoda wykorzystująca równanie (5.15). Jednak wariant uproszczony, czyli równanie (5.16), jest łatwiejsze w stosowaniu, dając przy tym wyniki zadowalające dla zastosowań inżynierskich.

- Opracowano również metodę obliczania oporów przepływu układu dwufazowego ciecz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową (równania (5.18) i (5.19)). Jej praktyczne stosowanie nie wiąże się z koniecznością znajomości szczegółowych parametrów geometrycznych piany. Poza tym metoda ta jest jedną z pierwszych prób matematycznego opisu oporów przepływu układu dwufazowego ciecz-ciecz przez piany metalowe.
- W rezultacie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że rodzaj materiału, z którego wykonana jest piana, może mieć podobny wpływ na opory przepływu jak jej parametry strukturalne (średnica porów, średnica włókien, porowatość).
- Obserwacje struktur przepływu w odcinku za pianą metalową wskazały na wpływ obecności piany metalowej w rurze na struktury przepływu układów dwufazowych gaz-ciecz oraz ciecz-ciecz. Ustalono, że obecna w rurze piana zaburza struktury przepływu poprzez wzrost stopnia rozproszenia faz (w szczególności oleju, charakteryzującego się niższą od wody wartością napięcia powierzchniowego), a także poprzez promowanie przepływu pierścieniowego (tylko w przypadku układu gaz-ciecz). Zaburzenia te niewątpliwie wpływają na hydrodynamikę przepływu układów wielofazowych przez piany metalowe, co wymaga jednak osobnych badań eksperymentalnych.
- Przeprowadzone badania numeryczne pozwoliły na wyznaczenie oporów układu gaz-ciecz płynącego przez pianę metalową oraz umożliwiły ocenę oddziaływania obecnego w rurze szkieletu piany na jednoczesny przepływ cieczy i gazu oraz ich wzajemnych interakcji. W wyniku symulacji komputerowych stwierdzono, że główną przyczyną wysokich oporów przepływu jest wysoki poziom turbulencji lokalnych, a zatem wzrost

zapotrzebowania na energię konieczną do wytworzenia się wirów. Nie bez znaczenia pozostaje również zwiększenie powierzchni międzyfazowej, a także pokonanie sił tarcia o dużą powierzchnię ciała stałego w obszarze piany. Na podstawie weryfikacji wyników uzyskanych na drodze numerycznej z danymi eksperymentalnymi uznano, iż przyjęta metodyka modelowania numerycznego jest poprawna i daje wiarygodne wyniki. Trzeba zaznaczyć, że przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań numerycznych stanowią jedną z pierwszych prób symulacji przepływu dwufazowego gaz-ciecz przez zrekonstruowaną strukturę piany metalowej.

Poza wskazanymi wymiernymi efektami pracy, nasuwa się jednak także kilka wniosków ogólnych, a mianowicie wypełnienie rurek wymiennika ciepła pianą metalową przedstawiono w niniejszej pracy jako innowacyjne rozwiązanie pozwalające zwiększyć wydajność płaszczowo-rurowych wymienników ciepła. Wykazano jednak, że jej obecność zaburza przepływ płynów w rurze. Zatem konieczne było ustalenie nowego opisu matematycznego oporów przepływu jednofazowego oraz dwufazowego gaz-ciecz i ciecz-ciecz przez te piany. Możliwość ich przewidywania jest niezbędna do ustalenia wartości współczynnika cieplno-hydraulicznej wydajności wymiennika ciepła. Tym samym wykonano „krok” w kierunku poszukiwania optymalnego rozwiązania wymiennika ciepła z rurkami wypełnionymi pianą metalową, co stanowiło główną inspirację niniejszej pracy. Jednak do pełnego zrealizowania tego celu konieczne jest jeszcze ustalenie opisu matematycznego strumienia ciepła wymienianego w takim aparacie, co nie było przedmiotem tej pracy.

Niestety okazuje się, że aktualny stan wiedzy w odniesieniu do hydrodynamiki przepływu układów wielofazowych przez piany metalowe nadal wymaga uzupełnienia. Autorka dostrzega potrzebę prowadzenia dalszych badań ukierunkowanych na ustalenie wpływu obecności piany metalowej w rurze na właściwości reologiczne przepływającego układu wielofazowego, mające kluczowe znaczenie w projektowaniu zarówno aparatów, jak i procesów związanych z wymianą ciepła. Warto również rozpatrzyć długość odcinka pustej rury za pianą niezbędnej do ponownego ustabilizowania się zaburzonej struktury przepływu. Otwarty pozostaje też obszar badań dotyczących metodyki symulacji numerycznych przepływu dwufazowego przez piany metalowe. Wskazane zagadnienia znacząco wykraczały jednak poza przyjęty zakres niniejszej pracy.

LITERATURA

1. Mohammadi, M.H.; Abbasi, H.R.; Yavarinasab, A.; Pourrahmani, H. Thermal optimization of shell and tube heat exchanger using porous baffles. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *170*, 115005, doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115005.
2. Biçer, N.; Engin, T.; Yaşar, H.; Büyükkaya, E.; Aydın, A.; Topuz, A. Design optimization of a shell-and-tube heat exchanger with novel three-zonal baffle by using CFD and taguchi method. *Int. J. Therm. Sci.* **2020**, *155*, 106417, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2020.106417.
3. Urbaniec, K. *Optymalizacja w projektowaniu aparatury procesowej*; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: Warszawa, 1979; ISBN 8320401259 9788320401257.
4. Marzouk, S.A.; Al-sood, M.M.A.; El-said, E.M.S.; El-fakharany, M.K. Effect of wired nails circular – rod inserts on tube side performance of shell and tube heat exchanger: Experimental study. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *167*, 114696, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114696.
5. Filipczak, G.; Guzik, A.; Troniewski, L.; Witczak, S. Badania cieplne helikoidalnego wymiennika ciepła typu JAD 6/50. Cz. I.: Badania eksploatacyjne. *Zesz. Nauk. Wyższej Szk. Inżynierskiej w Opolu* **1991**, z.40.
6. Thulukkanam, K. *Heat Exchanger Design Handbook*; Mechanical Engineering; Second Edi.; Taylor & Francis Group, 2013; ISBN 9781439842126.
7. Kumar, A.; Kumar, R. Condensation frictional pressure drop characteristic of R-600a inside the horizontal smooth and dimpled helical coiled tube in shell type heat exchanger. *Int. J. Therm. Sci.* **2020**, *154*, 106406, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2020.106406.
8. Yousufuddin, S. Heat Transfer Enhancement of a Shell and Tube Heat Exchanger with Different Baffle Spacing Arrangements. *Sch. J. Appl. Sci. Res.* **2018**, *1*, 50–56.
9. Gao, B.; Bi, Q.; Nie, Z.; Wu, J. Experimental study of effects of baffle helix angle on shell-side performance of shell-and-tube heat exchangers with discontinuous helical baffles. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2015**, *68*, 48–57, doi:10.1016/j.expthermflusci.2015.04.011.
10. Yang, J.; Liu, W. Numerical investigation on a novel shell-and-tube heat exchanger with plate baffles and experimental validation. *Energy Convers. Manag.* **2015**, *101*, 689–696, doi:10.1016/j.enconman.2015.05.066.
11. Akbar, A.; Arani, A.; Moradi, R. Shell and tube heat exchanger optimization using new baffle and tube configuration. **2019**, *157*, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.113736.
12. Wen, J.; Yang, H.; Jian, G.; Tong, X.; Li, K.; Wang, S. Energy and cost optimization of shell and tube heat exchanger with helical baffles using Kriging metamodel based on MOGA. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2016**, *98*, 29–39, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.084.
13. Cao, X.; Du, T.; Liu, Z.; Zhai, H.; Duan, Z. Experimental and numerical investigation on heat transfer and fluid flow performance of sextant helical baffle

- heat exchangers. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2019**, *142*, 118437, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118437.
14. Chen, Y.-P.; Wang, W.; Wu, J.-F.; Dong, C. Experimental investigation on performances of trisection helical baffled heat exchangers for oil/water–water heat transfer. *Energy Convers. Manag.* **2015**, *101*, 460–469, doi:10.1016/j.enconman.2015.05.042.
 15. Zhang, J.-F.; Guo, S.-L.; Li, Z.-Z.; Wang, J.-P.; He, Y.-L.; Tao, W.-Q. Experimental performance comparison of shell-and-tube oil coolers with overlapped helical baffles and segmental baffles. *Appl. Therm. Eng.* **2013**, *58*, 336–343, doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.04.009.
 16. Wang, X.; Zheng, N.; Liu, Z.; Liu, W. Numerical analysis and optimization study on shell-side performances of a shell and tube heat exchanger with staggered baffles. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2018**, *124*, 247–259, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.081.
 17. Gu, X.; Luo, Y.; Xiong, X.; Wang, K.; Wang, Y. Numerical and experimental investigation of the heat exchanger with trapezoidal baffle. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2018**, *127*, 598–606, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.045.
 18. Cao, X.; Chen, D.; Du, T.; Liu, Z.; Ji, S. Numerical investigation and experimental validation of thermo-hydraulic and thermodynamic performances of helical baffle heat exchangers with different baffle configurations. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2020**, *160*, 120181, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120181.
 19. Lutcha, J.; Němčanský, J. Performance improvement of tubular heat exchangers by helical baffles. *Chem. Eng. Res. Des.* **1990**, *68*, 263–270.
 20. Master, B.I.; Chunangad, K.S.; Pushpanathan, V. Heat exchanger. Patent US-6827138-B1, ABB Lummus Global Inc. 2004.
 21. Peng, B.; Wang, Q.W.; Zhang, C.; Xie, G.N.; Luo, L.Q.; Chen, Q.Y.; Zeng, M. An Experimental Study of Shell-and-Tube Heat Exchangers With Continuous Helical Baffles. *J. Heat Transfer* **2007**, *129*, 1425–1431, doi:10.1115/1.2754878.
 22. Chen, G.; Wang, Q. Experimental and Numerical Studies of Shell-and-Tube Heat Exchangers With Helical Baffles. *ASME 2009 Heat Transf. Summer Conf. collocated with InterPACK09 3rd Energy Sustain. Conf.* 2009, 601–609.
 23. Chen, Y. A novel helix baffled heat exchanger suitable for tube bundle arrangement with equilateral triangles. **2008**, *37*, 1–5.
 24. Zeyninejad Movassag, S.; Nematı Taher, F.; Razmi, K.; Tasouji Azar, R. Tube bundle replacement for segmental and helical shell and tube heat exchangers: Performance comparison and fouling investigation on the shell side. *Appl. Therm. Eng.* **2013**, *51*, 1162–1169, doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.10.025.
 25. Chen, Y.; Cao, R.; Wu, J.; Dong, C.; Sheng, Y. Experimental Study on Shell Side Heat Transfer Performance of Circumferential Overlap Trisection Helical Baffle Heat Exchangers. *ASME 2011 Int. Mech. Eng. Congr. Expo.* **2011**, 27–33, doi:10.1115/IMECE2011-63254.
 26. Kunwer, R.; Pandey, S.; Bhurat, S.S. Comparison of selected shell and tube heat

- exchangers with segmental and helical baffles. *Therm. Sci. Eng. Prog.* **2020**, *20*, 100712, doi:10.1016/j.tsep.2020.100712.
27. Zhang, L.; Xia, Y.; Jiang, B.; Xiao, X.; Yang, X. Pilot experimental study on shell and tube heat exchangers with small-angles helical baffles. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* **2013**, *69*, 112–118, doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.03.005.
 28. Nemati Taher, F.; Zeyninejad Movassag, S.; Razmi, K.; Tasouji Azar, R. Baffle space impact on the performance of helical baffle shell and tube heat exchangers. *Appl. Therm. Eng.* **2012**, *44*, 143–149, doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.03.042.
 29. El, A.; Laknizi, A.; Saadeddine, S.; El, M.; Zaitte, A.; Meziane, M.; Ben, A. Numerical comparison of shell-side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole , helical and segmental baffles. *Appl. Therm. Eng.* **2016**, *109*, 175–185, doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.067.
 30. Shrikant, A.; Sivakumar, R.; Anantharaman, N.; Vivekenandan, M. CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations. **2016**, *108*, 999–1007, doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.013.
 31. Tian, H.; Zhao, T.; Shi, L.; Chen, T.; Ma, X.; Zhang, H. Assessment and optimization of exhaust gas heat exchanger with porous baffles and porous fins. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *178*, 115446, doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115446.
 32. Chen, T.; Shu, G.; Tian, H.; Zhao, T.; Zhang, H.; Zhang, Z. Performance evaluation of metal-foam baffle exhaust heat exchanger for waste heat recovery. *Appl. Energy* **2020**, *266*, 114875, doi:10.1016/j.apenergy.2020.114875.
 33. Abbasi, H.R.; Sharifi Sedeh, E.; Pourrahmani, H.; Mohammadi, M.H. Shape optimization of segmental porous baffles for enhanced thermo-hydraulic performance of shell-and-tube heat exchanger. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *180*, doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115835.
 34. Nuntadusit, C.; Wae-hayee, M.; Bunyajitradulya, A.; Eiamsa-ard, S. Thermal visualization on surface with transverse perforated ribs. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2012**, *39*, 634–639, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.001.
 35. Derick, J.; Dhoble, A.S.; Mangrulkar, C.K. Numerical analysis for thermo-hydraulic performance of staggered cross flow tube bank with longitudinal tapered fins. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2020**, *118*, 104905, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104905.
 36. Mikielewicz, D.; Stasiak, A.; Jewartowski, M.; Stasiak, J. Measurements of heat transfer enhanced by the use of transverse vortex generators. *Appl. Therm. Eng.* **2012**, *49*, 61–72, doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.11.013.
 37. Liu, X.; Yu, J.; Yan, G. An experimental study on the air side heat transfer performance of the perforated fin-tube heat exchangers under the frosting conditions. *Appl. Therm. Eng.* **2020**, *166*, 114634, doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114634.
 38. Babu, C.R.; Kumar, P.; Roy, S.; Kanungo, D. Materials Today : Proceedings

- CFD analysis of an economizer for heat transfer enhancement using serrated finned tube equipped with variable fin segments. *Mater. Today Proc.* **2020**, doi:10.1016/j.matpr.2020.10.422.
39. Hooman, K.; Chumpia, A.; Jadhav, .P.; Rudolph, V. Metal foam heat exchanger for dry cooling. *Final Rep. ANLEC Proj. 5-0710-0063* **2013**.
 40. Wu, C.C.; Chen, C.K.; Yang, Y.T.; Huang, K.H. Numerical simulation of turbulent flow forced convection in a twisted elliptical tube. *Int. J. Therm. Sci.* **2018**, *132*, 199–208, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.028.
 41. Ferroni, P.; Block, R.E.; Todreas, N.E.; Bergles, A.E. Experimental evaluation of pressure drop in round tubes provided with physically separated, multiple, short-length twisted tapes. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2011**, *35*, 1357–1369, doi:10.1016/j.expthermflusci.2011.05.004.
 42. Man, C.; Lv, X.; Hu, J.; Sun, P.; Tang, Y. Experimental study on effect of heat transfer enhancement for single-phase forced convective flow with twisted tape inserts. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2017**, *106*, 877–883, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.026.
 43. Promvonge, P.; Pethkool, S.; Pimsarn, M.; Thianpong, C. Heat transfer augmentation in a helical-ribbed tube with double twisted tape inserts. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2012**, *39*, 953–959, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.05.015.
 44. Bhuiya, M.M.K.; Sayem, A.S.M.; Islam, M.; Chowdhury, M.S.U.; Shahabuddin, M. Performance assessment in a heat exchanger tube fitted with double counter twisted tape inserts. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2014**, *50*, 25–33, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.005.
 45. Murugesan, P.; Mayilsamy, K.; Suresh, S.; Srinivasan, P.S.S. Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2011**, *38*, 329–334, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.11.010.
 46. Hong, Y.; Du, J.; Wang, S. Turbulent thermal, fluid flow and thermodynamic characteristics in a plain tube fitted with overlapped multiple twisted tapes. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2017**, *115*, 551–565, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.017.
 47. Eiamsa-ard, S.; Promvonge, P. Thermal characterization of turbulent tube flows over diamond-shaped elements in tandem. *Int. J. Therm. Sci.* **2010**, *49*, 1051–1062, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2009.12.003.
 48. Muñoz-esparza, D.; Sanmiguel-rojas, E. Computers & Fluids Numerical simulations of the laminar flow in pipes with wire coil inserts. **2011**, *44*, 169–177, doi:10.1016/j.compfluid.2010.12.034.
 49. Karakaya, H.; Durmus, A. Heat transfer and exergy loss in conical spring turbulators. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2013**, *60*, 756–762, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.054.
 50. Zhang, Z.; Yang, W.; Guan, C.; Ding, Y.; Yan, H. Numerical study on thermo-hydraulic characteristics of turbulent flow in a circular tube fitted with helical

- blade rotors. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2013**, *60*, 603–611, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.050.
51. Patil, S.; Vijay Babu, P. Experimental heat transfer and friction factor studies through a square duct fitted with helical screw tapes. *Can. J. Chem. Eng.* **2014**, *92*, 663–670, doi:10.1002/cjce.21864.
 52. Dziak, J.; Ratajczak, K. Zastosowanie pierścieni Białeckiego jako turbulizatorów zwiększających sprawność wymiennika ciepła. *Inżynieria i Apar. chemiczna* **2014**, *1*, 17–18, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2009.12.003.
 53. Dyga, R.; Brol, S. Pressure drops in two-phase gas–liquid flow through channels filled with open-cell metal foams. *Energies* **2021**, *14*, 2419, doi:10.3390/en14092419.
 54. Banhart, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Prog. Mater. Sci.* **2001**, *46*, 559–632, doi:10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
 55. Evans, A. Multifunctionality of cellular metal systems. *Prog. Mater. Sci.* **1998**, *43*, 171–221, doi:10.1016/S0079-6425(98)00004-8.
 56. Evans, A.G.; Hutchinson, J.W.; Ashby, M.F. Cellular metals. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* **1998**, *3*, 288–303, doi:10.1016/S1359-0286(98)80105-8.
 57. Jin I., Kenny L.D., S.H. Method of producing lightweight foamed metal. Patent US-4973358-A 1990.
 58. Shimizu, T.; Matsuzaki, K.; Nagai, H.; Kanetake, N. Production of high porosity metal foams using EPS beads as space holders. *Mater. Sci. Eng. A* **2012**, *558*, 343–348, doi:10.1016/j.msea.2012.08.010.
 59. Gibson, L.J.; Ashby, M.F. *Cellular solids: Structure and properties*; Cambridge solid state science series; 2. ed., 1.; Cambridge Univ. Press: Cambridge, 2010; ISBN 0521495601.
 60. Zalucky, J.; Wagner, M.; Schubert, M.; Lange, R.; Hampel, U. Hydrodynamics of descending gas-liquid flows in solid foams: Liquid holdup, multiphase pressure drop and radial dispersion. *Chem. Eng. Sci.* **2017**, *168*, 480–494, doi:10.1016/j.ces.2017.05.011.
 61. Mohammed, I.; Bauer, T.; Schubert, M.; Lange, R. Hydrodynamic multiplicity in a tubular reactor with solid foam packings. *Chem. Eng. J.* **2013**, *231*, 334–344, doi:10.1016/j.ces.2013.07.024.
 62. Edouard, D.; Lacroix, M.; Pham, C.; Mbodji, M.; Pham-Huu, C. Experimental measurements and multiphase flow models in solid SiC foam beds. *AIChE J.* **2008**, *54*, 2823–2832, doi:10.1002/aic.11594.
 63. Schampheleire, S. De; Jaeger, P. De; Huisseune, H.; Ameel, B.; Joen, C.T.; Kerpel, K. De; Paepe, M. De Thermal hydraulic performance of 10 PPI aluminium foam as alternative for louvered fins in an HVAC heat exchanger. *Appl. Therm. Eng.* **2013**, *51*, 371–382, doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.09.027.
 64. Inayat, A.; Freund, H.; Zeiser, T.; Schwieger, W. Determining the specific

- surface area of ceramic foams: The tetrakaidecahedra model revisited. *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66*, 1179–1188, doi:10.1016/j.ces.2010.12.031.
65. Buciuman, F.C.; Kraushaar-Czarnetzki, B. Ceramic Foam Monoliths as Catalyst Carriers. 1. Adjustment and Description of the Morphology. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2003**, *42*, 1863–1869, doi:10.1021/ie0204134.
 66. Dietrich, B.; Schabel, W.; Kind, M.; Martin, H. Pressure drop measurements of ceramic sponges-determining the hydraulic diameter. *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64*, 3633–3640, doi:10.1016/j.ces.2009.05.005.
 67. Xu, J.; Ji, X.; Zhang, W.; Liu, G. Pool boiling heat transfer of ultra-light copper foam with open cells. *Int. J. Multiph. Flow* **2008**, *34*, 1008–1022, doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.05.003.
 68. Tourvieille, J.-N.; Philippe, R.; de Bellefon, C. Milli-channel with metal foams under an applied gas-liquid periodic flow: External mass transfer performance and pressure drop. *Chem. Eng. J.* **2015**, *267*, 332–346, doi:10.1016/j.cej.2014.11.084.
 69. Leon, M.A.; Geers, P.; Nijhuis, T.A.; van der Schaaf, J.; Schouten, J.C. Effect of foam stirrer design on the catalytic performance of rotating foam stirrer reactors. *Chem. Eng. J.* **2012**, *207–208*, 209–217, doi:10.1016/j.cej.2012.06.053.
 70. L ev eque, J.; Rouzineau, D.; Pr evost, M.; Meyer, M. Hydrodynamic and mass transfer efficiency of ceramic foam packing applied to distillation. *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64*, 2607–2616, doi:10.1016/j.ces.2009.02.010.
 71. Hutter, C.; Zenklusen, A.; Lang, R.; Rudolf von Rohr, P. Axial dispersion in metal foams and streamwise-periodic porous media. *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66*, 1132–1141, doi:10.1016/j.ces.2010.12.016.
 72. Richardson, J.T.; Peng, Y.; Remue, D. Properties of ceramic foam catalyst supports: pressure drop. *Appl. Catal. A Gen.* **2000**, *204*, 19–32, doi:10.1016/S0926-860X(00)00508-1.
 73. Leon, M.A.; Nijhuis, T.A.; van der Schaaf, J.; Schouten, J.C. Residence time distribution and reaction rate in the horizontal rotating foam stirrer reactor. *Chem. Eng. Sci.* **2014**, *117*, 8–17, doi:10.1016/j.ces.2014.06.016.
 74. Mu, C.; Huang, K.; Cheng, T.; Wang, H.; Yu, H.; Peng, F. Ni foams decorated with carbon nanotubes as catalytic stirrers for aerobic oxidation of cumene. *Chem. Eng. J.* **2016**, *306*, 806–815, doi:10.1016/j.cej.2016.08.016.
 75. Topin, F.; Bonnet, J.-P.; Madani, B.; Tadrist, L. Experimental Analysis of Multiphase Flow in Metallic foam: Flow Laws, Heat Transfer and Convective Boiling. *Adv. Eng. Mater.* **2006**, *8*, 890–899, doi:10.1002/adem.200600102.
 76. Hutter, C.; Allemann, C.; Kuhn, S.; Rudolf von Rohr, P. Scalar transport in a milli-scale metal foam reactor. *Chem. Eng. Sci.* **2010**, *65*, 3169–3178, doi:10.1016/j.ces.2010.02.002.
 77. Zhao, C.Y. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2012**, *55*, 3618–3632, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.017.

78. Hu, H.; Zhu, Y.; Ding, G.; Sun, S. Effect of oil on two-phase pressure drop of refrigerant flow boiling inside circular tubes filled with metal foam. *Int. J. Refrig.* **2013**, *36*, 516–526, doi:10.1016/j.ijrefrig.2012.10.037.
79. Boomsma, K.; Poulikakos, D.; Zwick, F. Metal foams as compact high performance heat exchangers. *Mech. Mater.* **2003**, *35*, 1161–1176, doi:10.1016/j.mechmat.2003.02.001.
80. Ghidossi, R.; Bonnet, J.-P.; Rebollar-Perez, G.; Carretier, E.; Ferrasse, J.-H.; Vicente, J.; Topin, F.; Moulin, P. Separation of particles from hot gases using metallic foams. *J. Mater. Process. Technol.* **2009**, *209*, 3859–3868, doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.08.033.
81. Rong, J.; Zhang, T.; Qiu, F.; Xu, J.; Zhu, Y.; Yang, D.; Dai, Y. Design and preparation of efficient, stable and superhydrophobic copper foam membrane for selective oil absorption and consecutive oil-water separation. *Mater. Des.* **2018**, *142*, 83–92, doi:10.1016/j.matdes.2018.01.027.
82. Zhu, H.; Gao, L.; Yu, X.; Liang, C.; Zhang, Y. Durability evaluation of superhydrophobic copper foams for long-term oil-water separation. *Appl. Surf. Sci.* **2017**, *407*, 145–155, doi:10.1016/j.apsusc.2017.02.184.
83. Liu, Y.; Zhan, B.; Zhang, K.; Kaya, C.; Stegmaier, T.; Han, Z.; Ren, L. On-demand oil/water separation of 3D Fe foam by controllable wettability. *Chem. Eng. J.* **2018**, *331*, 278–289, doi:10.1016/j.cej.2017.08.081.
84. Krasiński, A. *Proces usuwania rozproszonych zanieczyszczeń ciekłych z paliw i wody z wykorzystaniem wysokosprawnych włókninowych struktur koalescencyjnych*; Prace Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa, 2017; T. 39; ISBN 9788378146865.
85. De Schamphelre, S.; De Jaeger, P.; De Kerpel, K.; Ameel, B.; Huisseune, H.; De Paepe, M. How to study thermal applications of open-cell metal foam: Experiments and computational fluid dynamics. *Materials (Basel)*. **2016**, *9*, 1–27, doi:10.3390/ma9020094.
86. G. Fourie, J.; Du P. Plessis, J. Pressure drop modelling in cellular metallic foams. *Chem. Eng. Sci.* **2002**, *57*, 2781–2789, doi:10.1016/S0009-2509(02)00166-5.
87. Dyga, R. Symulacja numeryczna przepływu płynu przez przestrzeń komórkową pian metalowych. *Inżynieria i Apar. chemiczna* **2017**, *2*, 34–37.
88. Joen, C.T.; Jaeger, P. De; Huisseune, H.; Herzeele, S. Van; Vorst, N.; Paepe, M. De Thermo-hydraulic study of a single row heat exchanger consisting of metal foam covered round tubes. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2010**, *53*, 3262–3274, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.055.
89. Xu, W.; Zhang, H.; Yang, Z.; Zhang, J. Numerical investigation on the flow characteristics and permeability of three-dimensional reticulated foam materials. *Chem. Eng. J.* **2008**, *140*, 562–569, doi:10.1016/j.cej.2007.12.010.
90. Kouidri, A.; Madani, B. Thermal and hydrodynamic performance of flow boiling through a heat exchanger filled with various metallic foam samples. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* **2017**, *121*, 162–169, doi:10.1016/j.cep.2017.08.014.

91. Hamadouche, A.; Nebbali, R.; Benahmed, H.; Kouidri, A.; Bousri, A. Experimental investigation of convective heat transfer in an open-cell aluminum foams. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2016**, *71*, 86–94, doi:10.1016/j.expthermflusci.2015.10.009.
92. Shi, J.; Zheng, G.; Chen, Z. Experimental investigation on flow condensation in horizontal tubes filled with annular metal foam. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2018**, *116*, 920–930, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.007.
93. Bamorovat Abadi, G.; Kim, K.C. Experimental heat transfer and pressure drop in a metal-foam-filled tube heat exchanger. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2017**, *82*, 42–49, doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.10.031.
94. Zhu, Y.; Hu, H.; Sun, S.; Ding, G. Heat transfer measurements and correlation of refrigerant flow boiling in tube filled with copper foam. *Int. J. Refrig.* **2014**, *38*, 215–226, doi:10.1016/j.ijrefrig.2013.04.012.
95. Kurtbas, I.; Celik, N. Experimental investigation of forced and mixed convection heat transfer in a foam-filled horizontal rectangular channel. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2009**, *52*, 1313–1325, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.07.050.
96. Dixit, T.; Ghosh, I. An experimental study on open cell metal foam as extended heat transfer surface. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2016**, *77*, 28–37, doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.04.010.
97. Lai, Z.; Hu, H.; Ding, G. Effect of porosity on heat transfer and pressure drop characteristics of wet air in hydrophobic metal foam under dehumidifying conditions. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2018**, *96*, 90–100, doi:10.1016/j.expthermflusci.2018.02.025.
98. Kouidri, A.; Madani, B. Experimental hydrodynamic study of flow through metallic foams: Flow regime transitions and surface roughness influence. *Mech. Mater.* **2016**, *99*, 79–87, doi:10.1016/j.mechmat.2016.05.007.
99. Koch, R.; Firewicz, H. *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*; Skrypty - Politechnika Wrocławska; Wydawnictwa PW, 1979;
100. Materiał graficzny pobrany ze strony internetowej Dostępne na: www.pl.wikipedia.org (udostępniono 1 wrzesień 2021).
101. Czernek, K.; Troniewski, L.; Opolskiej, O.W.P. *Dane do obliczeń procesowych: podręcznik akademicki*; Podręcznik Akademicki - Politechnika Opolska; Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2012; ISBN 9788362736812.
102. Dziubiński, M. *Hydrodynamika przepływu mieszanin dwufazowych ciecz-gaz*; Monografie / Politechnika Łódzka; Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej: Łódź, 2005; ISBN 8372831629.
103. Backer, O. Simulation flow of oil and gas. *Oil Gas J.* **1954**, 183–195.
104. Mandhane, J.M.; Gregory, G.A.; Aziz, K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiph. Flow* **1974**, *1*, 537–553, doi:10.1016/0301-9322(74)90006-8.
105. Weisman, J.; Duncan, D.; Gibson, J.; Crawford, T. Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines. *Int. J. Multiph.*

- Flow* **1979**, 5, 437–462, doi:10.1016/0301-9322(79)90031-4.
106. Ulbrich, R. *Identyfikacja przepływu dwufazowego gaz-ciecz*; Studia i Monografie WSI: Opole, 1989; T. 32;.
 107. Dziubiński, M.; Prywer, J. *Mechanika płynów dwufazowych*; Podręczniki Akademickie. Inżynieria i Ochrona Środowiska; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: Warszawa, 2009; ISBN 9788320435191.
 108. Chisholm, D. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Transf.* **1967**, 10, 1767–1778, doi:10.1016/0017-9310(67)90047-6.
 109. Hapanowicz, J. *Przepływ ciekłych układów dyspersyjnych*; Studia i Monografie / Politechnika Opolska; Politechnika Opolska: Opole, 2007; T. 204;.
 110. Kashid, M.N.; Agar, D.W. Hydrodynamics of liquid-liquid slug flow capillary microreactor: Flow regimes, slug size and pressure drop. *Chem. Eng. J.* **2007**, 131, 1–13, doi:10.1016/j.cej.2006.11.020.
 111. Ahmed, S.A.; John, B. Liquid - Liquid horizontal pipe flow - A review. *J. Pet. Sci. Eng.* **2018**, 168, 426–447, doi:10.1016/j.petrol.2018.04.012.
 112. Ibarra, R.; Matar, O.K.; Markides, C.N.; Zadrzil, I. An experimental study of oil-water flows in horizontal pipes. In Proceedings of the 17th International Conference on Multiphase Technology; Cannes, France, 2015.
 113. Angeli, P.; Hewitt, G.F. Flow structure in horizontal oil-water flow. *Int. J. Multiph. Flow* **2000**, 26, 1117–1140, doi:10.1016/S0301-9322(99)00081-6.
 114. Ismail, A.S.I.; Ismail, I.; Zoveidavianpoor, M.; Mohsin, R.; Piroozian, A.; Misnan, M.S.; Sariman, M.Z. Review of oil-water through pipes. *Flow Meas. Instrum.* **2015**, 45, 357–374, doi:10.1016/j.flowmeasinst.2015.07.015.
 115. Hapanowicz, J. *Przepływ dwufazowy ciecz-ciecz w rurach poziomych*, Praca Doktorska, Instytut Inżynierii Chemicznej, Polska Akademia Nauk: Gliwice, 1996.
 116. Brauner, N. Two-phase liquid-liquid annular flow. *Int. J. Multiph. Flow* **1991**, 17, 59–76, doi:10.1016/0301-9322(91)90070-J.
 117. Angeli, P.; Hewitt, G.F. Pressure gradient in horizontal liquid-liquid flows. *Int. J. Multiph. Flow* **1999**, 24, 1183–1203, doi:10.1016/S0301-9322(98)00006-8.
 118. Lovick, J.; Angeli, P. Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil-water flows. *Int. J. Multiph. Flow* **2004**, 30, 139–157, doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.11.011.
 119. Hapanowicz, J.; Troniewski, L. Struktury przepływu dwufazowego ciecz-ciecz. *Inżynieria Chem. i Proces.* **1998**, 575.
 120. Dukhan, N.; Baugci, Ö.; Özdemir, M. Metal foam hydrodynamics: Flow regimes from pre-Darcy to turbulent. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2014**, 77, 114–123, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.017.
 121. Dukhan, N. Correlations for the pressure drop for flow through metal foam. *Exp. Fluids* **2006**, 41, 665–672, doi:10.1007/s00348-006-0194-x.

122. Dukhan, N.; Patel, P. Equivalent particle diameter and length scale for pressure drop in porous metals. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2008**, *32*, 1059–1067, doi:10.1016/j.expthermflusci.2007.12.001.
123. Edouard, D.; Lacroix, M.; Huu, C.P.; Luck, F. Pressure drop modeling on SOLID foam: State-of-the art correlation. *Chem. Eng. J.* **2008**, *144*, 299–311, doi:10.1016/j.cej.2008.06.007.
124. Mancin, S.; Zilio, C.; Cavallini, A.; Rossetto, L. Pressure drop during air flow in aluminum foams. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2010**, *53*, 3121–3130, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.015.
125. Inayat, A.; Schwerdtfeger, J.; Freund, H.; Körner, C.; Singer, R.F.; Schwieger, W. Periodic open-cell foams: Pressure drop measurements and modeling of an ideal tetrakaidecahedra packing. *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66*, 2758–2763, doi:10.1016/j.ces.2011.03.031.
126. Dietrich, B. Pressure drop correlation for ceramic and metal sponges. *Chem. Eng. Sci.* **2012**, *74*, 192–199, doi:10.1016/j.ces.2012.02.047.
127. Dyga, R. *Wymiana ciepła i hydrodynamika przepływu przez piany metalowe; Studia i Monografie z. 420*, Politechnika Opolska; Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej: Opole, 2015; ISBN 9788365235169.
128. Baugci, Ö.; Dukhan, N. Experimental hydrodynamics of high-porosity metal foam: Effect of pore density. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2016**, *103*, 879–885, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.097.
129. Skibinski, J.; Cwieka, K.; Kowalkowski, T.; Wysocki, B.; Wejrzanowski, T.; Kurzydłowski, K.J. The influence of pore size variation on the pressure drop in open-cell foams. *Mater. Des.* **2015**, *87*, 650–655, doi:10.1016/j.matdes.2015.08.079.
130. Wang, H.; Guo, L. Experimental investigation on pressure drop and heat transfer in metal foam filled tubes under convective boundary condition. *Chem. Eng. Sci.* **2016**, *155*, 438–448, doi:10.1016/j.ces.2016.08.031.
131. Antohe, B. V.; Lage, J.L.; Price, D.C.; Weber, R.M. Experimental determination of permeability and inertia coefficients of mechanically compressed aluminum porous matrices. *J. Fluids Eng.* **1997**, *119*, 404–412, doi:10.1115/1.2819148.
132. Albanakis, C.; Missirlis, D.; Michailidis, N.; Yakinthos, K.; Goulas, A.; Omar, H.; Tsipas, D.; Granier, B. Experimental analysis of the pressure drop and heat transfer through metal foams used as volumetric receivers under concentrated solar radiation. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2009**, *33*, 246–252, doi:10.1016/j.expthermflusci.2008.08.007.
133. Bhattacharya, A.; Calmidi, V.V.; Mahajan, R.L. Thermophysical properties of high porosity metal foams. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2002**, *45*, 1017–1031, doi:10.1016/S0017-9310(01)00220-4.
134. Paek, J.W.; Kang, B.H.; Kim, S.Y.; Hyun, J.M. Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials. *Int. J. Thermophys.* **2000**, *21*, 453–464, doi:10.1023/A:1006643815323.
135. Ambrosio, G.; Bianco, N.; Chiu, W.K.S.; Iasiello, M.; Naso, V.; Oliviero, M. The

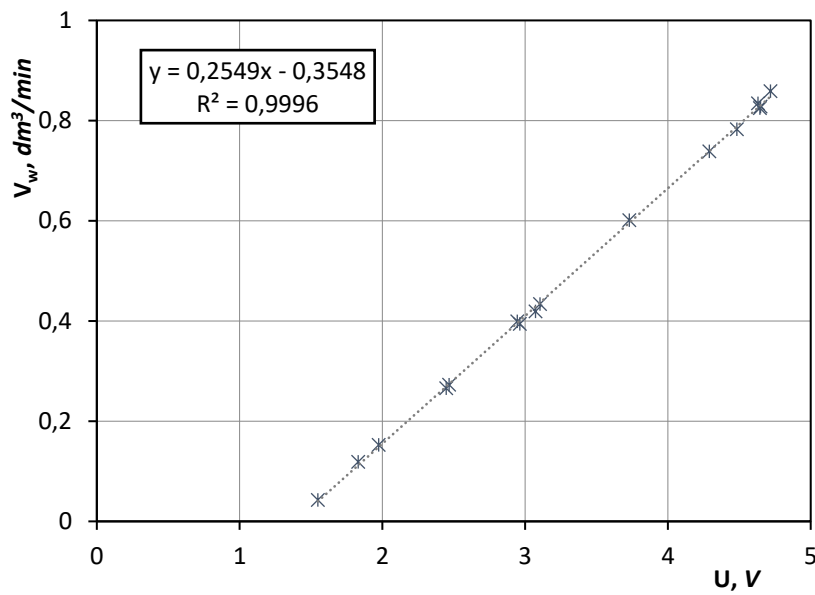
- effect of open-cell metal foams strut shape on convection heat transfer and pressure drop. *Appl. Therm. Eng.* **2016**, *103*, 333–343, doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.04.085.
136. Ergun, S. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.* **1952**, *48*, 89–94.
 137. Kim, S.Y.; Kang, B.H.; Kim, J.-H. Forced convection from aluminum foam materials in an asymmetrically heated channel. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2001**, *44*, 1451–1454, doi:10.1016/S0017-9310(00)00187-3.
 138. Mancin, S.; Zilio, C.; Rossetto, L.; Cavallini, A. Foam height effects on heat transfer performance of 20 ppi aluminum foams. *Appl. Therm. Eng.* **2012**, *49*, 55–60, doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.05.015.
 139. Innocentini, M.D.M.; Salvini, V.R.; Macedo, A.; Pandolfelli, V.C. Prediction of ceramic foams permeability using Ergun's equation. *Mater. Res.* **1999**, *2*, 283–289, doi:10.1590/S1516-14391999000400008.
 140. Moreira, E.A.; Coury, J.R. The influence of structural parameters on the permeability of ceramic foams. *Brazilian J. Chem. Eng.* **2004**, *21*, 23–33, doi:10.1590/S0104-66322004000100004.
 141. Lacroix, M.; Nguyen, P.; Schweich, D.; Pham Huu, C.; Savin-Poncet, S.; Edouard, D. Pressure drop measurements and modeling on SiC foams. *Chem. Eng. Sci.* **2007**, *62*, 3259–3267, doi:10.1016/j.ces.2007.03.027.
 142. Fernandes, J.; Simões, P.C.; Mota, J.P.B.; Saadjan, E. Application of CFD in the study of supercritical fluid extraction with structured packing: Dry pressure drop calculations. *J. Supercrit. Fluids* **2008**, *47*, 17–24, doi:10.1016/j.supflu.2008.07.008.
 143. Alix, P.; Raynal, L. Liquid distribution and liquid hold-up in modern high capacity packings. *Chem. Eng. Res. Des.* **2008**, *86*, 585–591, doi:10.1016/j.cherd.2008.02.021.
 144. Gerbaux, O.; Vercueil, T.; Momponteil, A.; Bador, B. Experimental characterization of single and two-phase flow through nickel foams. *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64*, 4186–4195, doi:10.1016/j.ces.2009.06.056.
 145. Ji, X.; Xu, J. Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams. *Heat Mass Transf.* **2012**, *48*, 153–164, doi:10.1007/s00231-011-0860-2.
 146. Tourvieille, J.-N.; Philippe, R.; de Bellefon, C. Milli-channel with metal foams under an applied gas-liquid periodic flow: Flow patterns, residence time distribution and pulsing properties. *Chem. Eng. Sci.* **2015**, *126*, 406–426, doi:10.1016/j.ces.2014.11.059.
 147. Stemmet, C.P.; van der Schaaf, J.; Kuster, B.F.M.; Schouten, J.C. Solid Foam Packings for Multiphase Reactors. *Chem. Eng. Res. Des.* **2006**, *84*, 1134–1141, doi:10.1205/cherd05034.
 148. Voltolina, S.; Marín, P.; Díez, F. V; Ordóñez, S. Open-cell foams as beds in multiphase reactors: Residence time distribution and mass transfer. *Chem. Eng. J.* **2017**, *316*, 323–331, doi:10.1016/j.cej.2017.01.113.

149. Tschentscher, R.; Schubert, M.; Bieberle, A.; Nijhuis, T.A.; van der Schaaf, J.; Hampel, U.; Schouten, J.C. Tomography measurements of gas holdup in rotating foam reactors with Newtonian, non-Newtonian and foaming liquids. *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66*, 3317–3327, doi:10.1016/j.ces.2011.01.051.
150. Lali, F. A hydrodynamic study of cylindrical metal foam packings: Residence time distribution and two phase pressure drop. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* **2017**, *115*, 1–10, doi:10.1016/j.cep.2017.02.010.
151. Hu, H.; Zhu, Y.; Peng, H.; Ding, G.; Sun, S. Effect of tube diameter on pressure drop characteristics of refrigerant-oil mixture flow boiling inside metal-foam filled tubes. *Appl. Therm. Eng.* **2014**, *62*, 433–443, doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.09.051.
152. Dukhan, N.; Ali, M. Strong wall and transverse size effects on pressure drop of flow through open-cell metal foam. *Int. J. Therm. Sci.* **2012**, *57*, 85–91, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.017.
153. Hapanowicz, J. Proposition of non-standard method useful for viscosity measurements of unstable two-phase systems coupled with examples of its application. *Measurement* **2020**, *164*, 108113, doi:https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108113.
154. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* **1979**, *9*, 62–66, doi:10.1109/TSMC.1979.4310076.
155. Dyga, R. Opory przepływu trójfazowego gaz-ciecz-ciecz w kanale poziomym, Praca doktorska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska: Opole, 2002.
156. Mydlarz-Gabryk, K. Transport mieszanin wodno-olejowych w rurach pionowych, Praca doktorska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska: Opole, 2009.
157. Huu, T.T.; Lacroix, M.; Pham Huu, C.; Schweich, D.; Edouard, D. Towards a more realistic modeling of solid foam: Use of the pentagonal dodecahedron geometry. *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64*, 5131–5142, doi:10.1016/j.ces.2009.08.028.
158. Bai, M.; Chung, J.N. Analytical and numerical prediction of heat transfer and pressure drop in open-cell metal foams. *Int. J. Therm. Sci.* **2011**, *50*, 869–880, doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.01.007.
159. Boomsma, K.; Poulikakos, D.; Ventikos, Y. Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure. *Int. J. Heat Fluid Flow* **2003**, *24*, 825–834, doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2003.08.002.
160. Nie, Z.; Lin, Y.; Tong, Q. Numerical investigation of pressure drop and heat transfer through open cell foams with 3D Laguerre-Voronoi model. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2017**, *113*, 819–839, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.119.
161. Wejrzanowski, T.; Skibinski, J.; Szumbariski, J.; Kurzydłowski, K.J. Structure of foams modeled by Laguerre–Voronoi tessellations. *Comput. Mater. Sci.* **2013**, *67*, 216–221, doi:10.1016/j.commatsci.2012.08.046.
162. Wu, Z.; Caliot, C.; Bai, F.; Flamant, G.; Wang, Z.; Zhang, J.; Tian, C. Experimental and numerical studies of the pressure drop in ceramic foams for volumetric solar receiver applications. *Appl. Energy* **2010**, *87*, 504–513,

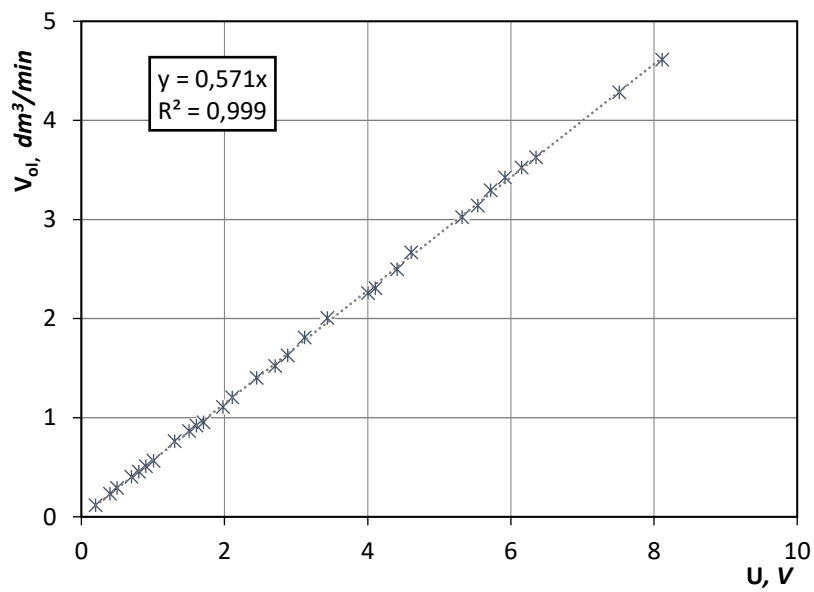
doi:10.1016/j.apenergy.2009.08.009.

163. Bock, J.; Jacobi, A.M. Geometric classification of open-cell metal foams using X-ray micro-computed tomography. *Mater. Charact.* **2013**, *75*, 35–43, doi:10.1016/j.matchar.2012.10.001.
164. Bodla, K.K.; Murthy, J.Y.; Garimella, S. V. Resistance network-based thermal conductivity model for metal foams. *Comput. Mater. Sci.* **2010**, *50*, 622–632, doi:10.1016/j.commatsci.2010.09.026.
165. Diani, A.; Bodla, K.K.; Rossetto, L.; Garimella, S. V. Numerical analysis of air flow through metal foams. *Energy Procedia* **2014**, *45*, 645–652, doi:10.1016/j.egypro.2014.01.069.
166. Regulski, W.; Szumbariski, J.; Łaniewski-Wołk; Gumowski, K.; Skibiński, J.; Wichrowski, M.; Wejrzanowski, T. Pressure drop in flow across ceramic foams- A numerical and experimental study. *Chem. Eng. Sci.* **2015**, *137*, 320–337, doi:10.1016/j.ces.2015.06.043.

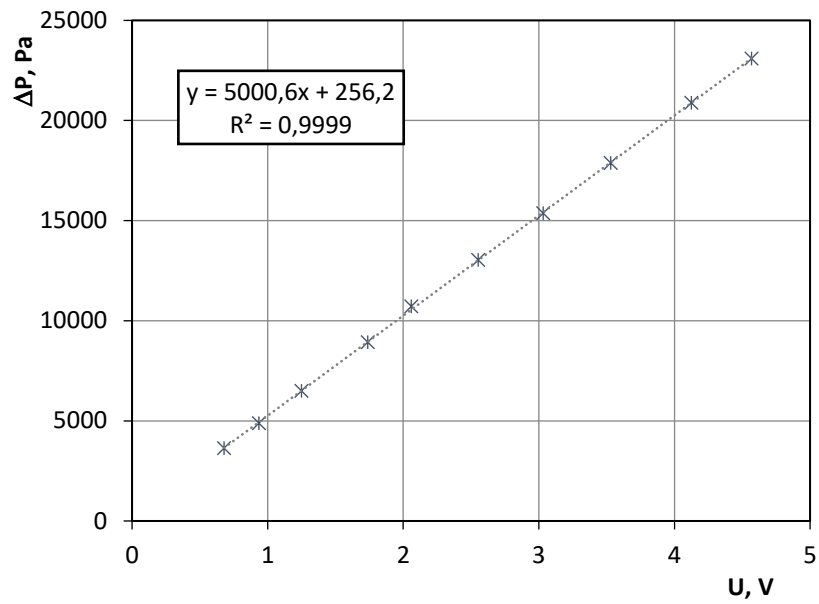
ZAŁĄCZNIKI



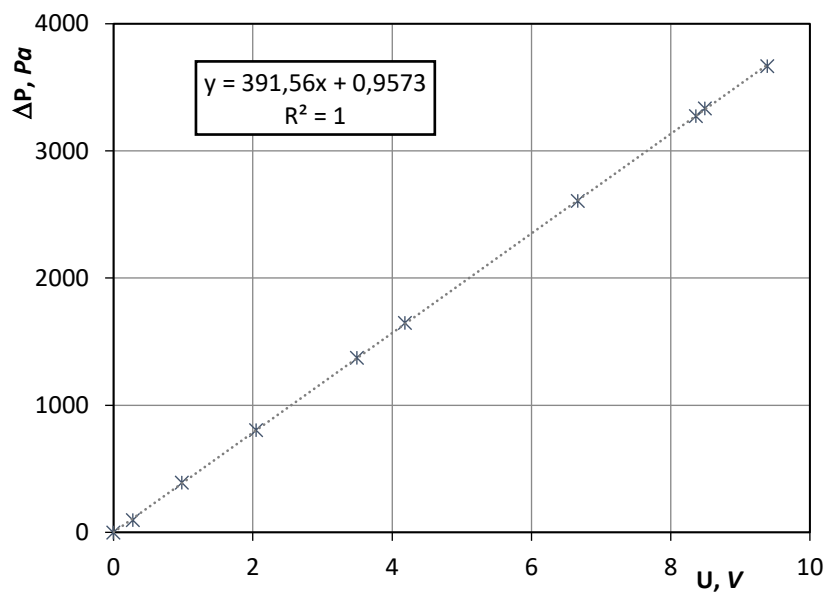
Rys. Z.1. Wyznaczona eksperymentalnie charakterystyka przetwarzania przepływomierza wody



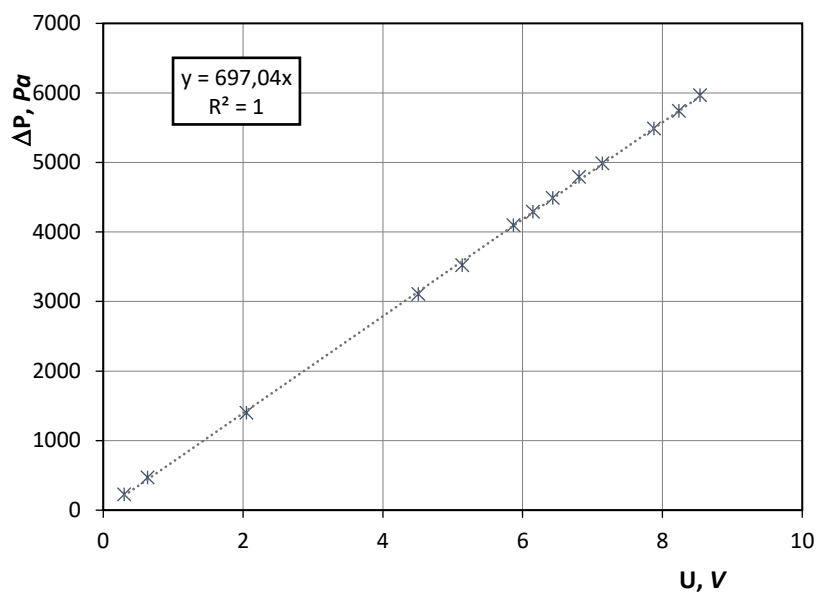
Rys. Z.2. Wyznaczona eksperymentalnie charakterystyka przetwarzania przepływomierza oleju



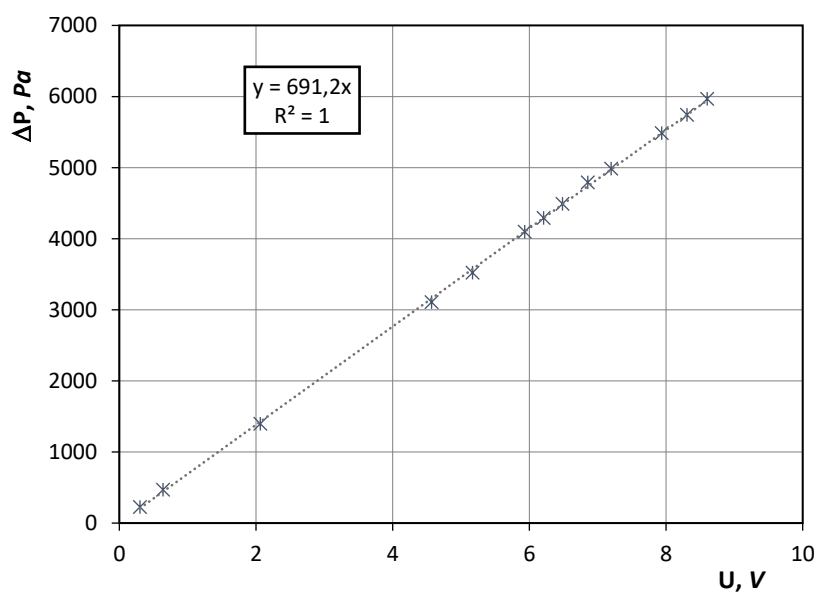
Rys. Z.3. Wyznaczona eksperymentalnie charakterystyka przetwarzania miernika nadciśnienia powietrza w rotametrze P_p



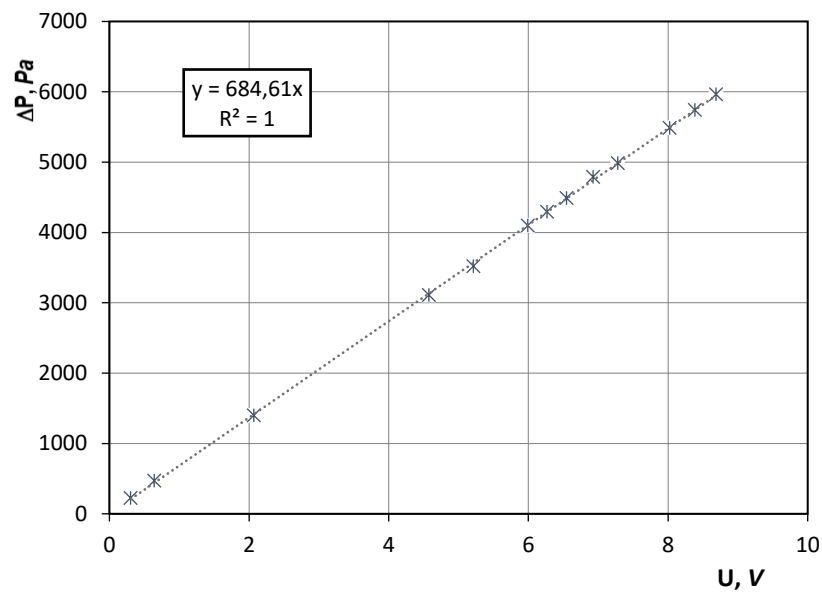
Rys. Z.4. Wyznaczona eksperymentalnie charakterystyka przetwarzania miernika różnicy ciśnień ΔP_{RR1}



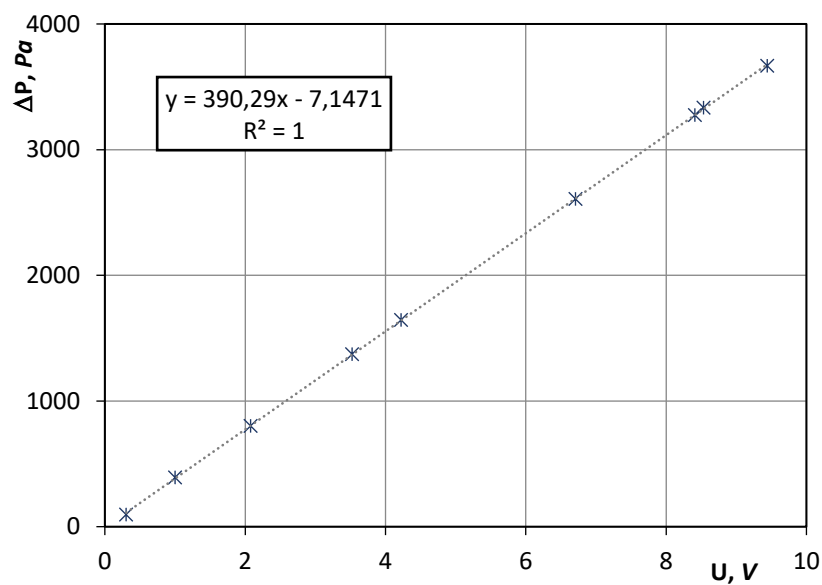
Rys. Z.5. Wyznaczona eksperymentalnie charakterystyka przetwarzania miernika różnicy ciśnień ΔP_I



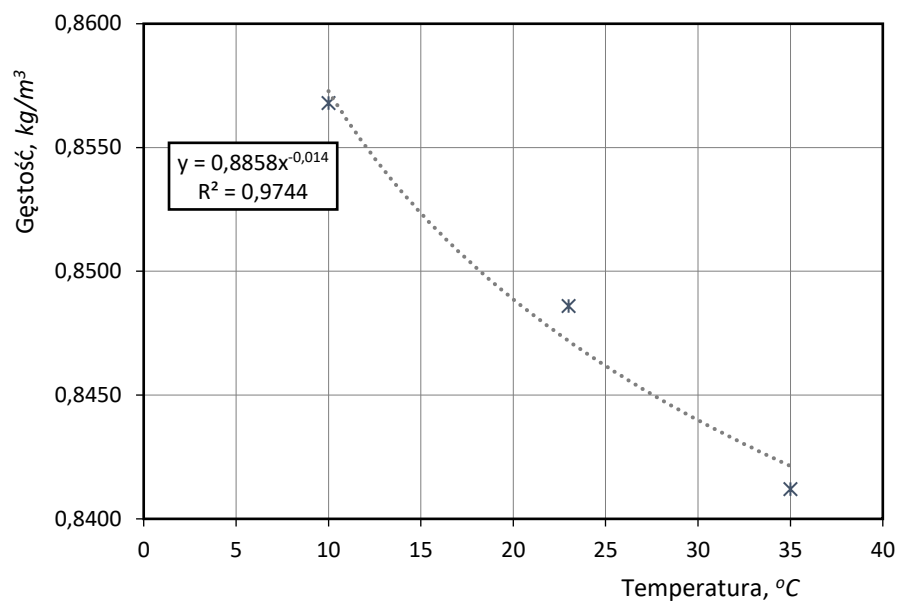
Rys. Z.6. Wyznaczona eksperymentalnie charakterystyka przetwarzania miernika różnicy ciśnień ΔP_{II}



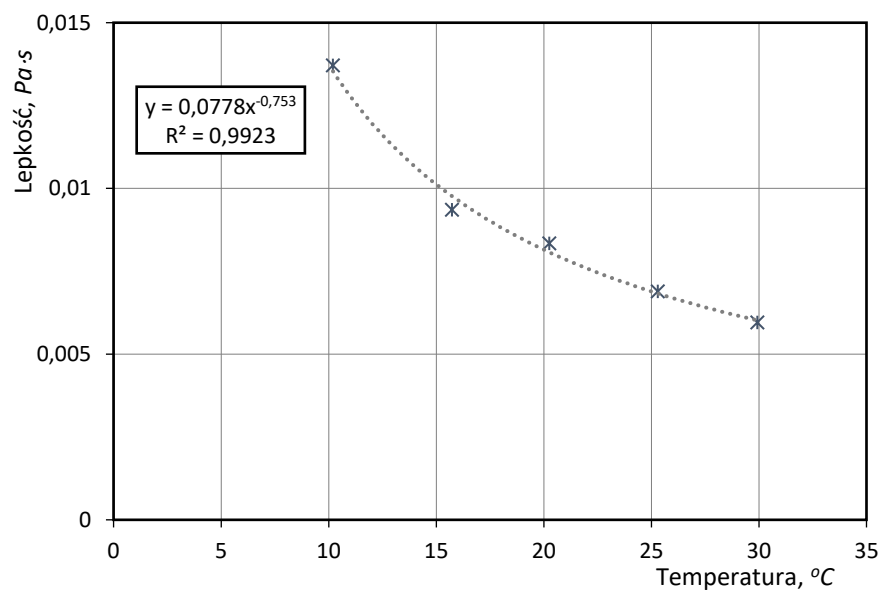
Rys. Z.7. Wyznaczona eksperymentalnie charakterystyka przetwarzania miernika różnicy ciśnień ΔP_{III}



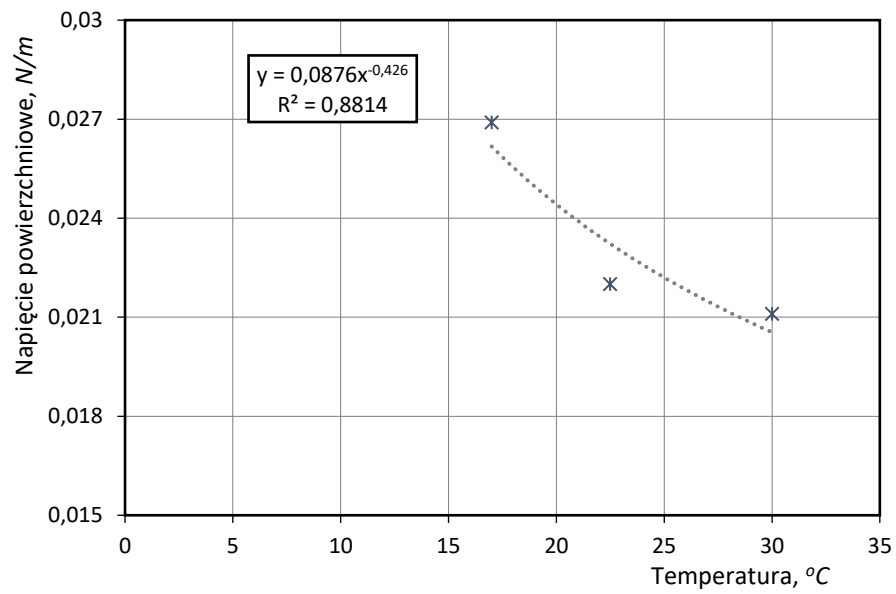
Rys. Z.8. Wyznaczona eksperymentalnie charakterystyka przetwarzania miernika różnicy ciśnień ΔP_{RR2}



Rys. Z.9. Gęstość oleju w funkcji temperatury



Rys. Z.10. Lepkość oleju w funkcji temperatury



Rys. Z.11. Napięcie powierzchniowe oleju w funkcji temperatury

Tabela Z.1.

Dane pomiarowe dla piany Al40

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
1	-	0,00723	-	20,0	104,8	6292	6440	6968	6366	6704	6566
2	-	0,00955	-	20,2	106,2	10275	9898	11000	10086	10449	10391
3	-	0,01117	-	20,3	107,8	13605	12778	13800	13192	13289	13394
4	-	0,01281	-	20,4	109,8	17353	16066	17831	16709	16948	17083
5	-	0,01345	-	20,4	110,7	18976	17968	19888	18472	18928	18944
6	-	0,01453	-	20,5	112,0	21497	20686	22892	21092	21789	21692
7	-	0,01618	-	20,7	114,7	25523	25499	26083	25511	25791	25702
8	-	-	0,00253	23,0	106,2	7232	7631	7962	7432	7797	7609
9	-	-	0,00294	23,1	107,1	8716	9103	8863	8910	8983	8894
10	-	-	0,00415	23,3	108,7	11415	11877	11668	11646	11772	11653
11	-	-	0,00497	23,5	109,8	13036	13484	14177	13260	13830	13566
12	-	-	0,00576	23,6	111,6	15826	16330	17014	16078	16672	16390
13	-	-	0,00663	23,6	112,2	16885	17275	18198	17080	17736	17453
14	-	-	0,00740	23,7	114,7	21050	21380	22585	21215	21983	21672
15	-	-	0,00741	23,8	114,7	21725	22099	23418	21912	22758	22414
16	-	-	0,00825	23,8	115,2	23205	23537	24988	23371	24262	23910
17	-	-	0,00903	23,9	117,3	26623	27015	28679	26819	27847	27439
18	-	-	0,00986	23,9	118,1	28028	28404	30099	28216	29251	28844
19	-	-	0,01065	24,0	119,8	31093	31440	33303	31267	32371	31945
20	-	-	0,00173	23,9	104,7	4717	4783	5402	4750	5093	4967
21	-	-	0,00254	23,9	105,9	6942	6637	6882	6789	6760	6820
22	-	-	0,00334	23,9	107,5	9287	9772	10021	9530	9897	9693
23	-	-	0,00415	24,0	108,8	11050	12130	12756	11590	12443	11979
24	-	-	0,00496	24,0	110,0	13067	13858	14620	13462	14239	13848
25	-	-	0,00575	24,0	111,5	15514	16171	17049	15843	16610	16245
26	-	-	0,00662	24,1	112,6	17367	17956	18890	17662	18423	18071
27	-	-	0,00738	24,1	113,8	19364	19902	20910	19633	20406	20059
28	-	-	0,00745	24,1	115,4	21908	22383	23516	22146	22950	22602
29	-	-	0,00825	24,1	115,8	22539	22952	24249	22745	23600	23246
30	-	-	0,00903	24,1	116,5	25601	26039	27520	25820	26780	26387
31	-	-	0,00986	24,1	118,1	27834	28289	29840	28061	29064	28654
32	-	-	0,00334	24,2	108,2	10103	10551	11494	10327	11023	10716
33	-	-	0,00414	24,2	109,1	11582	11688	13912	11635	12800	12394
34	-	-	0,00173	23,8	105,0	5297	5564	5228	5430	5396	5363
35	0,00006	-	-	22,0	101,6	438	446	458	442	452	447
36	0,00007	-	-	22,1	101,7	668	677	662	672	669	669
37	0,00009	-	-	22,2	101,8	866	878	-	-	-	-
38	0,00010	-	-	22,3	102,1	1189	1240	1302	1215	1271	1244
39	0,00012	-	-	22,4	102,2	1500	1570	1620	1535	1595	1563
40	0,00014	-	-	22,5	102,4	1823	1884	2008	1853	1946	1905
41	0,00015	-	-	22,5	102,7	2165	2258	2440	2212	2349	2288
42	0,00017	-	-	22,6	102,9	2632	2737	2992	2685	2864	2787

Tabela Z.1. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
43	0,00019	-	-	22,7	103,2	2998	3146	3435	3072	3290	3193
44	0,00020	-	-	22,7	103,5	3527	3681	4073	3604	3877	3761
45	0,00022	-	-	22,8	103,8	4013	4212	4643	4113	4428	4289
46	0,00024	-	-	22,9	104,2	4615	4838	5338	4727	5088	4930
47	0,00025	-	-	22,9	104,5	5048	5332	5919	5190	5626	5433
48	0,00027	-	-	23,0	104,8	5628	5931	6632	5779	6281	6063
49	0,00029	-	-	23,0	105,2	6202	6520	7307	6361	6913	6676
50	0,00031	-	-	23,1	105,6	6750	7167	7977	6959	7572	7298
51	0,00032	-	-	23,2	105,9	7368	7818	8747	7593	8283	7978
52	0,00034	-	-	23,2	106,4	8029	8533	9568	8281	9050	8710
53	0,00036	-	-	23,3	106,9	8773	9364	10521	9068	9943	9553
54	0,00038	-	-	23,4	107,3	9519	10164	11445	9842	10804	10376
55	0,00040	-	-	23,4	107,8	10281	11019	12404	10650	11712	11235
56	0,00041	-	-	23,5	108,3	11049	11822	13337	11436	12580	12070
57	0,00043	-	-	23,5	108,9	11888	12721	14450	12305	13586	13020
58	0,00045	-	-	23,5	109,5	12846	13770	15720	13308	14745	14112
59	0,00047	-	-	23,6	110,1	13732	14744	16801	14238	15772	15092
60	0,00049	-	-	23,6	110,6	14505	15585	17773	15045	16679	15954
61	0,00051	-	-	23,7	111,4	15628	16858	19325	16243	18091	17270
62	0,00053	-	-	23,7	111,8	16370	17680	20265	17025	18972	18105
63	0,00055	-	-	23,8	112,5	17352	18805	21549	18079	20177	19235
64	0,00057	-	-	23,8	113,2	18501	20034	23040	19267	21537	20525
65	0,00060	-	-	23,8	113,9	19558	21209	24407	20383	22808	21724
66	0,00062	-	-	23,9	114,9	20873	22723	26083	21798	24403	23226
67	0,00007	-	-	24,1	101,7	677	678	664	678	671	673
68	0,00010	-	-	24,1	102,1	1195	1223	1304	1209	1263	1240
69	0,00014	-	-	24,2	102,4	1844	1911	2064	1877	1987	1940
70	0,00017	-	-	24,2	102,9	2649	2747	3019	2698	2883	2805
71	0,00020	-	-	24,2	103,5	3612	3747	4150	3679	3949	3836
72	0,00024	-	-	24,3	104,2	4687	4904	5459	4795	5181	5016
73	0,00027	-	-	24,3	104,9	5673	5987	6727	5830	6357	6129
74	0,00030	-	-	24,3	105,6	6812	7228	8069	7020	7649	7370
75	0,00034	-	-	24,4	106,5	8129	8618	9679	8373	9148	8808
76	0,00038	-	-	24,4	107,4	9545	10179	11473	9862	10826	10399
77	0,00041	-	-	24,4	108,4	11116	11869	13449	11493	12659	12145
78	0,00045	-	-	24,4	109,5	12786	13691	15634	13238	14662	14037
79	0,00049	-	-	24,4	110,7	14643	15738	17982	15190	16860	16121
80	0,00053	-	-	24,4	111,9	16452	17775	20367	17113	19071	18198
81	0,00057	-	-	24,5	113,2	18404	19912	22926	19158	21419	20414
82	0,00062	-	-	24,5	114,8	20769	22570	26067	21669	24318	23135
83	0,00059	-	-	24,6	113,7	19222	20817	23997	20020	22407	21345

Tabela Z.1. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
84	0,00055	-	-	24,6	112,5	17390	18827	21607	18108	20217	19274
85	0,00051	-	-	24,6	111,3	15548	16735	19196	16142	17965	17160
86	0,00047	-	-	24,7	110,1	13703	14718	16780	14210	15749	15067
87	0,00043	-	-	24,7	109,0	11983	12806	14595	12395	13700	13128
88	0,00039	-	-	24,7	107,9	10427	11134	12587	10780	11861	11383
89	0,00036	-	-	24,7	107,0	8925	9495	10687	9210	10091	9702
90	0,00032	-	-	24,8	106,1	7558	8056	9034	7807	8545	8216
91	0,00029	-	-	24,8	105,3	6335	6653	7517	6494	7085	6835
92	0,00025	-	-	24,8	104,6	5224	5502	6110	5363	5806	5612
93	0,00022	-	-	24,8	103,8	4008	4204	4657	4106	4430	4290
94	0,00018	-	-	24,8	103,2	3054	3210	3501	3132	3355	3255
95	0,00015	-	-	24,8	102,7	2190	2288	2478	2239	2383	2319
96	0,00012	-	-	24,9	102,3	1461	1519	1592	1490	1555	1524
97	0,00009	-	-	24,9	101,9	912	914	921	913	918	916
98	0,00006	-	-	24,9	101,6	467	469	473	468	471	469
99	0,00006	-	-	25,0	101,6	465	463	460	464	461	463
100	0,00007	-	-	25,0	101,7	670	675	648	672	661	664
101	0,00009	-	-	25,0	101,9	908	914	895	911	904	906
102	0,00010	-	-	25,0	102,0	1184	1213	1274	1198	1243	1224
103	0,00012	-	-	25,0	102,2	1468	1518	1580	1493	1549	1522
104	0,00014	-	-	25,0	102,4	1820	1882	2009	1851	1946	1904
105	0,00015	-	-	25,0	102,7	2174	2268	2449	2221	2359	2297
106	0,00017	-	-	25,0	102,9	2579	2691	2926	2635	2809	2732
107	0,00018	-	-	25,1	103,2	3018	3164	3452	3091	3308	3211
108	0,00020	-	-	25,1	103,5	3552	3699	4100	3625	3899	3784
109	0,00022	-	-	25,1	103,8	4031	4234	4668	4132	4451	4311
110	0,00023	-	-	25,1	104,2	4597	4816	5321	4707	5069	4911
111	0,00025	-	-	25,1	104,5	5074	5364	5964	5219	5664	5467
112	0,00027	-	-	25,1	104,8	5604	5892	6606	5748	6249	6034
113	0,00029	-	-	25,1	105,2	6200	6524	7316	6362	6920	6680
114	0,00030	-	-	25,1	105,6	6767	7202	8021	6984	7611	7330
115	0,00032	-	-	25,1	105,9	7364	7808	8750	7586	8279	7974
116	0,00034	-	-	25,1	106,4	8034	8514	9579	8274	9047	8709
117	0,00036	-	-	25,1	106,8	8761	9330	10503	9046	9917	9532
118	0,00038	-	-	25,1	107,3	9493	10126	11417	9810	10772	10345
119	0,00039	-	-	25,1	107,8	10259	10982	12388	10621	11685	11210
120	0,00041	-	-	25,1	108,3	10984	11736	13276	11360	12506	11999
121	0,00043	-	-	25,1	108,9	11886	12722	14455	12304	13588	13021
122	0,00045	-	-	25,2	109,4	12721	13612	15517	13167	14565	13950
123	0,00047	-	-	25,2	110,0	13580	14563	16635	14072	15599	14926
124	0,00049	-	-	25,2	110,6	14492	15566	17768	15029	16667	15942
125	0,00051	-	-	25,2	111,2	15424	16597	19018	16010	17808	17013
126	0,00053	-	-	25,2	111,8	16280	17537	20146	16908	18842	17988

Tabela Z.1. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
127	0,00055	-	-	25,2	112,5	17285	18698	21434	17991	20066	19139
128	0,00057	-	-	25,2	113,1	18320	19827	22860	19073	21344	20336
129	0,00059	-	-	25,3	113,9	19429	21047	24255	20238	22651	21577
130	0,00061	-	-	25,3	114,7	20658	22445	25886	21551	24166	22996
131	0,00004	0,00040	-	27,3	101,9	898	878	960	888	919	912
132	0,00004	0,00210	-	27,6	102,3	1549	1835	1685	1692	1760	1690
133	0,00004	0,00402	-	28,4	104,9	5171	5277	6901	5224	6089	5783
134	0,00004	0,00602	-	28,4	108,2	10625	10244	12782	10435	11513	11217
135	0,00004	0,00783	-	28,4	110,5	14035	14124	16068	14079	15096	14742
136	0,00004	0,00859	-	28,3	112,4	16124	16136	18707	16130	17421	16989
137	0,00004	0,00961	-	28,3	113,1	17337	16811	20754	17074	18782	18301
138	0,00005	0,00781	-	19,2	113,4	18587	19580	22380	19083	20980	20182
139	0,00005	0,00881	-	19,3	115,3	21407	22347	26327	21877	24337	23360
140	0,00005	0,00947	-	19,4	116,7	24573	24660	28833	24617	26747	26022
141	0,00005	0,00997	-	19,4	117,7	26187	26280	30760	26233	28520	27742
142	0,00005	0,01130	-	19,5	121,9	32267	31827	37793	32047	34810	33962
143	0,00005	0,01196	-	19,6	123,2	34533	34320	40707	34427	37513	36520
144	0,00005	0,01279	-	19,7	124,6	36787	36520	43067	36653	39793	38791
145	0,00005	0,01346	-	19,8	125,9	39100	38613	44760	38857	41687	40824
146	0,00008	0,00043	-	28,3	102,9	2282	2344	2502	2313	2423	2376
147	0,00008	0,00398	-	28,8	107,5	7144	8964	11671	8054	10317	9260
148	0,00009	0,00457	-	29,1	108,8	8675	10824	13965	9749	12394	11155
149	0,00009	0,00544	-	29,1	110,3	10711	12503	16046	11607	14274	13087
150	0,00009	0,00659	-	29,2	112,7	13085	15131	18754	14108	16943	15657
151	0,00009	0,00681	-	29,2	113,3	13839	15837	19263	14838	17550	16313
152	0,00009	0,00681	-	29,2	114,4	14796	17240	20520	16018	18880	17518
153	0,00009	0,00771	-	29,3	115,4	15486	17459	20186	16472	18823	17710
154	0,00009	0,00752	-	29,3	115,5	15628	17805	21147	16716	19476	18193
155	0,00009	0,00775	-	29,3	115,7	16186	17990	20990	17088	19490	18389
156	0,00009	0,00802	-	29,3	116,2	16432	18141	21018	17287	19579	18530
157	0,00009	0,00813	-	29,3	116,5	16184	18830	21928	17507	20379	18981
158	0,00009	0,00874	-	29,3	117,3	17081	18391	22023	17736	20207	19165
159	0,00009	0,00722	-	28,0	116,9	21633	22903	27951	22268	25427	24162
160	0,00009	0,00785	-	28,0	118,1	23299	24181	29385	23740	26783	25622
161	0,00009	0,00814	-	28,1	119,2	25320	25983	31251	25651	28617	27518
162	0,00010	0,00860	-	28,1	120,9	26907	27586	32877	27247	30232	29124
163	0,00010	0,00910	-	28,2	122,5	27992	29018	34226	28505	31622	30412
164	0,00010	0,00941	-	28,2	122,9	28563	29360	35561	28962	32461	31161
165	0,00010	0,00980	-	28,2	123,5	29038	30079	36330	29559	33205	31816
166	0,00010	0,01012	-	28,3	125,0	30965	30843	36982	30904	33912	32930
167	0,00010	0,01069	-	28,2	127,9	33132	33363	40081	33247	36722	35525
168	0,00010	0,01131	-	28,2	129,1	34244	34513	41214	34379	37864	36657
169	0,00010	0,01143	-	28,2	129,1	34274	34694	41474	34484	38084	36814

Tabela Z.1. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
170	0,00010	0,01163	-	28,2	130,0	35672	35025	42176	35348	38600	37624
171	0,00010	0,01208	-	28,2	130,1	35534	35463	42451	35498	38957	37816
172	0,00010	0,01279	-	28,3	133,4	38969	37878	44387	38424	41132	40411
173	0,00017	0,00065	-	24,3	105,1	5687	6372	5965	6030	6169	6008
174	0,00017	0,00149	-	24,3	105,1	5665	6377	6011	6021	6194	6018
175	0,00017	0,00350	-	24,2	107,9	10704	11097	10948	10901	11023	10916
176	0,00018	0,00459	-	24,2	114,1	15307	16955	18826	16131	17890	17029
177	0,00019	0,00440	-	18,5	115,3	18285	21207	25062	19746	23134	21518
178	0,00020	0,00596	-	19,0	122,0	25755	28472	33544	27113	31008	29257
179	0,00020	0,00642	-	19,2	125,4	29814	32199	37168	31006	34683	33060
180	0,00020	0,00678	-	19,3	127,1	31698	34158	38307	32928	36232	34721
181	0,00020	0,00674	-	19,4	126,7	30606	33433	38666	32019	36049	34235
182	0,00021	0,00730	-	19,5	130,9	35155	37414	41610	36284	39512	38059
183	0,00021	0,00789	-	19,6	132,4	35705	38655	41850	37180	40252	38737
184	0,00021	0,00811	-	19,7	132,1	35536	37824	41874	36680	39849	38412
185	0,00021	0,00840	-	19,8	133,2	36856	39081	42307	37968	40694	39415
186	0,00021	0,00851	-	19,9	133,9	36814	39661	43026	38237	41343	39833
187	0,00022	0,00878	-	19,9	134,5	37585	39088	42612	38336	40850	39762
188	0,00022	0,00929	-	20,0	136,0	38090	40331	43756	39211	42044	40726
189	0,00022	0,00928	-	20,0	136,0	37618	40126	43148	38872	41637	40298
190	0,00022	0,00954	-	20,1	136,9	38333	40834	43677	39583	42255	40948
191	0,00022	0,00963	-	20,1	137,5	40015	41187	44178	40601	42683	41794
192	0,00022	0,00993	-	20,2	139,8	41501	42718	44725	42109	43721	42981
193	0,00025	0,00137	-	27,1	106,6	8148	8441	9240	8295	8841	8610
194	0,00025	0,00220	-	27,8	108,2	10290	11101	12651	10695	11876	11347
195	0,00025	0,00351	-	27,8	109,5	11957	13134	14749	12545	13941	13280
196	0,00028	0,00206	-	23,6	120,1	25177	32437	35664	28807	34051	31093
197	0,00030	0,00407	-	23,7	126,8	41691	41618	42863	41655	42241	42058
198	0,00030	0,00502	-	23,8	127,9	33731	36231	40151	34981	38191	36704
199	0,00031	0,00576	-	23,9	129,8	35814	38278	41470	37046	39874	38521
200	0,00031	0,00555	-	24,0	130,7	36686	38884	41834	37785	40359	39134
201	0,00031	0,00604	-	24,2	132,7	38348	40369	43733	39358	42051	40816
202	0,00031	0,00620	-	24,2	133,1	38480	40414	43316	39447	41865	40737
203	0,00032	0,00668	-	24,3	137,0	40688	43107	44859	41897	43983	42885
204	0,00037	0,00307	-	24,6	117,7	18278	20330	41481	19304	30905	26696
205	0,00038	0,00339	-	24,7	121,5	20016	37083	43285	28549	40184	33461
206	0,00045	0,00152	-	25,0	115,4	21263	21719	25905	21491	23812	22962
207	0,00046	0,00204	-	25,1	117,6	20869	22459	35942	21664	29200	26423
208	0,00047	0,00210	-	25,2	119,2	22814	24601	40806	23708	32704	29407
209	0,00056	0,00149	-	25,3	118,5	24453	25462	34548	24958	30005	28154
210	0,00058	0,00156	-	25,2	123,5	29180	37650	45089	33415	41369	37306
211	0,00059	0,00190	-	25,2	125,9	32537	43731	45618	38134	44675	40629
212	0,00006	0,00177	-	27,1	103,1	2489	2891	3736	2690	3313	3038

Tabela Z.1. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
213	0,00006	0,00201	-	27,3	103,5	3183	3135	3843	3159	3489	3387
214	0,00006	0,00242	-	27,4	104,7	4181	5336	6772	4759	6054	5430
215	0,00007	0,00397	-	27,5	108,0	8066	9458	12372	8762	10915	9965
216	0,00007	0,00492	-	27,5	110,5	11347	12393	15974	11870	14183	13238
217	0,00007	0,00582	-	27,6	112,2	13226	14577	18378	13901	16477	15393
218	0,00007	0,00665	-	27,6	114,7	15955	16875	20030	16415	18453	17620
219	0,00007	0,00911	-	26,5	120,1	27224	27414	32058	27319	29736	28899
220	0,00008	0,00988	-	26,7	122,1	29781	29414	34983	29598	32198	31393
221	0,00008	0,01061	-	26,8	125,9	32537	32171	38437	32354	35304	34381
222	0,00008	0,01119	-	27,4	126,5	33761	33299	38922	33530	36111	35328
223	0,00008	0,01175	-	27,5	127,7	36018	34740	41093	35379	37916	37283
224	0,00008	0,01234	-	27,6	129,1	37482	36118	43185	36800	39652	38929
225	0,00008	0,01237	-	27,7	129,6	38749	37152	43790	37950	40471	39897
226	0,00011	0,00207	-	22,4	103,0	2751	2484	2716	2618	2600	2650
227	0,00011	0,00260	-	22,5	103,7	3740	3314	3102	3527	3208	3385
228	0,00011	0,00322	-	22,7	105,5	4874	6662	8775	5768	7718	6770
229	0,00011	0,00437	-	23,0	107,8	7930	9504	11948	8717	10726	9794
230	0,00011	0,00515	-	23,1	110,3	11115	12193	16736	11654	14464	13348
231	0,00011	0,00560	-	23,2	110,1	11289	11887	16275	11588	14081	13150
232	0,00012	0,00642	-	23,3	113,3	14348	15960	20201	15154	18081	16836
233	0,00012	0,00713	-	23,3	114,2	15874	16981	20630	16427	18805	17828
234	0,00012	0,00789	-	23,4	115,1	16901	17241	21091	17071	19166	18411
235	0,00012	0,00637	-	27,5	118,1	21968	24067	29224	23017	26645	25086
236	0,00012	0,00801	-	27,5	122,7	26860	28682	34416	27771	31549	29986
237	0,00012	0,00880	-	27,4	124,1	28331	29598	35973	28964	32785	31301
238	0,00013	0,00918	-	27,3	126,6	31307	32337	37851	31822	35094	33831
239	0,00013	0,00944	-	27,2	127,5	31498	32398	38876	31948	35637	34257
240	0,00013	0,00956	-	27,1	128,4	31938	33508	39864	32723	36686	35104
241	0,00013	0,00998	-	27,1	129,4	33620	34523	40396	34072	37460	36180
242	0,00013	0,01090	-	27,0	133,6	35983	36877	42605	36430	39741	38489
243	0,00014	0,01117	-	26,9	135,5	38492	38340	43734	38416	41037	40189
244	0,00014	0,00166	-	19,0	104,6	4869	4638	4981	4754	4810	4829
245	0,00014	0,00277	-	18,9	106,4	7454	7375	8404	7414	7889	7744
246	0,00015	0,00368	-	18,9	108,9	10784	11494	12425	11139	11960	11568
247	0,00015	0,00408	-	19,1	113,1	12882	14763	17946	13823	16355	15197
248	0,00016	0,00458	-	19,4	115,6	16491	18155	21008	17323	19581	18551
249	0,00016	0,00557	-	26,8	119,3	23047	25158	30597	24102	27877	26267
250	0,00016	0,00710	-	26,8	123,8	27883	29944	35257	28914	32600	31028
251	0,00017	0,00822	-	26,7	128,2	32250	33964	38834	33107	36399	35016
252	0,00017	0,00891	-	26,7	130,2	33208	35129	40210	34168	37669	36182
253	0,00017	0,00922	-	26,6	132,0	34060	35500	40794	34780	38147	36785
254	0,00018	0,00969	-	26,6	132,9	35285	36460	41268	35872	38864	37671
255	0,00018	0,00979	-	26,6	133,2	35566	37402	42027	36484	39714	38332

Tabela Z.1. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
256	0,00021	0,00132	-	22,9	106,0	6913	6911	7245	6912	7078	7023
257	0,00021	0,00263	-	23,1	107,5	8745	8840	9622	8793	9231	9069
258	0,00021	0,00324	-	23,3	109,6	11606	11659	12279	11632	11969	11848
259	0,00023	0,00419	-	23,5	117,9	19646	26084	30925	22865	28505	25552
260	0,00024	0,00480	-	23,7	121,3	26399	28804	33436	27602	31120	29546
261	0,00025	0,00614	-	23,8	127,0	32499	35120	39313	33809	37216	35644
262	0,00025	0,00639	-	23,9	129,9	34877	37453	41188	36165	39321	37840
263	0,00026	0,00687	-	24,1	132,5	37490	39610	42967	38550	41288	40022
264	0,00027	0,00766	-	24,2	136,7	40349	42309	44415	41329	43362	42358
265	0,00027	0,00825	-	24,3	139,1	42769	43461	44922	43115	44191	43717
266	0,00004	-	0,00110	25,1	110,0	13132	14943	16964	14037	15953	15013
267	0,00004	-	0,00116	25,0	111,4	14417	17730	20127	16074	18928	17425
268	0,00005	-	0,00307	25,0	116,9	20372	25300	30585	22836	27943	25419
269	0,00005	-	0,00424	24,9	121,9	25866	32467	39911	29167	36189	32748
270	0,00005	-	0,00527	24,9	124,4	26292	34698	45103	30495	39900	35364
271	0,00004	-	0,00141	24,8	112,2	16255	18310	20691	17283	19501	18419
272	0,00005	-	0,00212	24,7	114,9	17903	22497	26965	20200	24731	22455
273	0,00005	-	0,00303	24,7	117,4	20996	26393	31991	23694	29192	26460
274	0,00005	-	0,00413	24,6	120,9	23011	30622	39050	26816	34836	30894
275	0,00005	-	0,00424	24,6	123,6	25859	34432	44148	30146	39290	34813
276	0,00006	-	0,00123	25,2	111,8	15752	17376	20097	16564	18737	17742
277	0,00006	-	0,00212	25,2	115,6	20879	23907	27688	22393	25797	24158
278	0,00006	-	0,00312	25,0	118,2	23164	27492	32756	25328	30124	27804
279	0,00007	-	0,00424	24,9	122,3	26768	32716	39346	29742	36031	32943
280	0,00008	-	0,00094	25,4	111,4	15129	16732	18470	15930	17601	16777
281	0,00008	-	0,00212	25,2	116,0	21490	24338	27879	22914	26109	24569
282	0,00008	-	0,00292	25,1	120,4	26315	30572	35251	28443	32911	30712
283	0,00009	-	0,00428	25,0	125,2	30342	36230	42588	33286	39409	36386
284	0,00010	-	0,00134	25,4	112,6	17210	18801	21113	18006	19957	19042
285	0,00010	-	0,00212	25,2	116,4	21485	24504	28545	22995	26525	24845
286	0,00010	-	0,00321	25,0	121,1	27742	32551	37602	30146	35077	32632
287	0,00011	-	0,00424	24,8	125,7	31686	36692	42384	34189	39538	36921
288	0,00011	-	0,00531	24,8	128,6	33393	38467	43546	35930	41007	38469
289	0,00012	-	0,00115	25,0	113,7	19543	20954	23042	20248	21998	21180
290	0,00012	-	0,00237	24,8	118,6	24152	27511	31936	25832	29723	27866
291	0,00012	-	0,00333	24,7	122,4	28351	32776	37725	30564	35251	32951
292	0,00013	-	0,00424	24,6	126,4	32214	36991	41787	34603	39389	36998
293	0,00013	-	0,00532	24,6	131,0	35408	40573	44303	37991	42438	40095
294	0,00013	-	0,00138	25,6	113,7	19381	21216	23528	20299	22372	21375
295	0,00014	-	0,00199	25,6	117,2	22988	25966	29813	24477	27890	26256
296	0,00014	-	0,00313	25,4	121,6	27308	31457	36291	29383	33874	31685
297	0,00015	-	0,00438	25,3	127,6	34546	38678	42427	36612	40552	38550
298	0,00015	-	0,00121	25,2	114,9	21504	23154	24582	22329	23868	23080

Tabela Z.1. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
299	0,00016	-	0,00223	25,1	118,5	25056	27975	30862	26516	29418	27964
300	0,00017	-	0,00338	24,6	125,7	33907	37924	40924	35916	39424	37585
301	0,00017	-	0,00431	24,6	128,2	34425	39586	42257	37005	40921	38756
302	0,00017	-	0,00118	24,9	115,9	23843	24697	26201	24270	25449	24913
303	0,00018	-	0,00196	24,9	118,8	26508	28602	30792	27555	29697	28634
304	0,00018	-	0,00305	24,9	124,6	32717	36386	39363	34552	37875	36156
305	0,00019	-	0,00389	24,9	126,7	34078	38583	41683	36330	40133	38114
306	0,00019	-	0,00446	25,0	130,3	37996	42484	44292	40240	43388	41591
307	0,00019	-	0,00102	25,5	115,3	22888	23574	24640	23231	24107	23700
308	0,00019	-	0,00151	25,5	117,4	25008	26843	28746	25925	27795	26866
309	0,00020	-	0,00280	25,4	124,1	33016	36205	38472	34610	37339	35898
310	0,00021	-	0,00385	25,3	127,7	35529	39981	42288	37755	41135	39266
311	0,00021	-	0,00172	25,5	118,4	27227	28551	30172	27889	29361	28650
312	0,00021	-	0,00192	25,4	119,4	27545	29279	31159	28412	30219	29328
313	0,00022	-	0,00302	25,4	125,4	34891	38361	40704	36626	39533	37986
314	0,00023	-	0,00449	25,3	129,7	37111	41933	43561	39522	42747	40868
315	0,00023	-	0,00092	25,4	117,7	26262	27350	28821	26806	28086	27478
316	0,00023	-	0,00172	25,4	120,6	30129	31846	33370	30987	32608	31781
317	0,00024	-	0,00281	25,4	125,6	36404	39292	40145	37848	39718	38613
318	0,00025	-	0,00404	25,3	130,5	39753	44127	44317	41940	44222	42732

Tabela Z.2.

Dane pomiarowe dla piany AI20

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
1	-	0,01637	-	26,9	111,3	20469	20619	19410	20544	20014	20166
2	-	0,01569	-	26,9	110,5	18848	19131	18060	18989	18596	18680
3	-	0,01506	-	27,0	109,7	17405	17679	16780	17542	17230	17288
4	-	0,01482	-	27,0	109,4	16728	17063	16154	16896	16609	16648
5	-	0,01430	-	27,0	108,8	15800	16157	15328	15978	15742	15761
6	-	0,01391	-	26,9	108,4	14976	15348	14541	15162	14944	14955
7	-	0,01290	-	27,0	107,4	13065	13236	12872	13151	13054	13058
8	-	0,01174	-	27,0	106,3	10988	10667	11477	10827	11072	11044
9	-	0,01094	-	27,0	105,8	10501	8780	-	-	9829	10053
10	-	0,01032	-	27,0	105,3	9139	9642	8628	9640	9135	9136
11	-	0,00998	-	26,9	105,1	8661	9204	8182	9390	8693	8683
12	-	0,00896	-	26,9	104,8	7142	7677	6702	8933	7189	7174
13	-	0,00829	-	26,9	104,4	6302	6643	5606	7410	6125	6184
14	-	0,00800	-	26,9	104,3	5922	6225	5278	6472	5752	5809
15	-	0,00721	-	26,9	104,0	4971	5297	4542	6074	4920	4937
16	-	0,00596	-	26,9	103,5	3601	4163	3237	5134	3700	3667
17	-	0,00506	-	26,8	103,1	2702	3253	2328	3882	2791	2761
18	-	0,00418	-	26,8	102,9	1973	2502	1746	2977	2124	2073
19	-	0,00333	-	26,7	102,5	1332	1880	1110	2237	1495	1441
20	-	0,00239	-	26,6	102,4	735	-	-	-	899	844
21	-	0,00181	-	26,5	102,2	-	-	-	-	597	510
22	-	0,01790	-	26,5	108,6	18731	19408	-	19069	-	-
23	-	0,01558	-	26,5	106,8	15013	14666	14938	14839	-	-
24	-	0,01491	-	26,5	106,4	13821	13385	13984	13603	-	12969
25	-	0,01419	-	26,5	105,7	12623	12788	13496	12705	13142	11845
26	-	0,01333	-	26,5	104,8	12091	11323	12120	11707	11722	9700
27	-	0,01177	-	26,5	103,9	9532	9415	10154	9473	9784	8887
28	-	0,01138	-	26,5	104,2	8911	8862	8889	8887	8876	6991
29	-	0,01000	-	26,5	104,2	7109	7264	6601	7186	6932	6151
30	-	0,00921	-	26,5	103,7	6169	6438	5847	6304	6143	4971
31	-	0,00811	-	26,5	103,6	4949	5265	4698	5107	4981	3957
32	-	0,00704	-	26,5	103,1	3881	4179	3809	4030	3994	3226
33	-	0,00615	-	26,5	102,7	3096	3439	3142	3268	3290	2448
34	-	0,00527	-	26,4	102,3	2329	2703	2314	2516	2508	1973
35	-	0,00462	-	26,4	102,0	1827	2220	1873	2024	2046	1210
36	-	0,00335	-	26,4	102,5	1071	1530	1029	1301	1280	770
37	-	0,00249	-	26,4	102,3	624	1103	-	864	843	442
38	-	0,02504	-	26,4	115,8	41657	41732	41073	41695	41403	41487
39	-	0,02454	-	23,4	115,2	40460	40584	40038	40522	40311	40361
40	-	0,02387	-	23,5	114,0	38321	38583	38167	38452	38375	38357
41	-	0,02304	-	23,5	112,7	35958	35961	36194	35959	36078	36038
42	-	0,02263	-	23,5	112,2	34988	34812	35475	34900	35144	35092
43	-	0,02218	-	23,5	111,3	33246	32165	34786	32706	33476	33399
44	-	0,02072	-	23,6	108,8	29065	25547	32332	27306	28940	28981

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
45	-	0,02009	-	23,7	108,0	26665	24989	30612	25827	27800	27422
46	-	0,01928	-	23,7	106,9	23032	24625	28698	23829	26662	25452
47	-	0,01827	-	23,7	105,8	19771	23676	26268	21723	24972	23238
48	-	0,01729	-	23,7	105,0	19162	21271	24453	20216	22862	21629
49	-	0,01665	-	23,8	104,6	19563	19835	23339	19699	21587	20912
50	-	0,01539	-	23,9	103,1	16523	17044	16284	16784	16664	16617
51	-	0,01414	-	23,9	101,9	14244	15041	13800	14642	14420	14362
52	-	0,01414	-	23,9	108,8	14527	14729	14291	14628	14510	14516
53	-	0,01347	-	24,4	108,1	13077	13378	12985	13228	13181	13147
54	-	0,01287	-	24,4	107,6	12161	12488	12205	12324	12346	12284
55	-	0,01176	-	24,4	106,6	10243	10588	10293	10415	10440	10375
56	-	0,01077	-	24,4	105,8	8873	9215	9009	9044	9112	9033
57	-	0,00929	-	24,4	104,6	6728	7081	6823	6905	6952	6877
58	-	0,00813	-	24,4	103,9	5440	5826	5591	5633	5708	5619
59	-	0,00765	-	24,5	103,7	4942	5319	5115	5131	5217	5125
60	-	0,00663	-	24,5	103,0	3823	4196	3994	4010	4095	4004
61	-	0,00621	-	24,5	102,8	3451	3841	3633	3646	3737	3641
62	-	0,00571	-	24,5	102,6	3032	3447	3262	3239	3354	3247
63	-	0,00481	-	24,5	102,2	2305	2710	2474	2508	2592	2496
67	-	-	0,02240	20,1	119,8	45082	44838	43698	44960	44268	44539
68	-	-	0,02240	20,1	118,7	43064	42907	42766	42985	42836	42912
69	-	-	0,02140	20,1	118,0	41795	41609	41463	41702	41536	41622
70	-	-	0,02027	20,1	116,7	39329	39251	39119	39290	39185	39233
71	-	-	0,02027	20,1	115,4	37130	37048	36929	37089	36989	37036
72	-	-	0,01928	20,2	114,9	35919	35920	35634	35920	35777	35824
73	-	-	0,01814	20,2	113,0	32625	32239	32720	32432	32480	32528
74	-	-	0,01715	20,2	113,3	30315	30404	29971	30360	30187	30230
75	-	-	0,01602	20,3	112,7	28519	28756	28439	28637	28597	28571
76	-	-	0,01502	20,3	111,4	26015	26298	25995	26156	26146	26103
77	-	-	0,01389	20,3	110,4	24125	24408	24062	24266	24235	24198
78	-	-	0,01290	20,3	110,5	21210	21517	21149	21363	21333	21292
79	-	-	0,01176	20,3	109,2	18856	19193	18772	19025	18982	18940
80	-	-	0,01077	20,3	108,7	17498	17833	17399	17666	17616	17577
81	-	-	0,00964	20,3	108,2	14946	15336	14901	15141	15119	15061
82	-	-	0,00858	20,4	108,1	12491	12907	12545	12699	12726	12648
83	-	-	0,00751	20,4	107,4	11250	11693	11285	11472	11489	11410
84	-	-	0,00638	20,4	106,2	9086	9582	9262	9334	9422	9310
85	-	-	0,00533	20,4	105,2	7329	-	-	7578	-	-
86	-	-	0,00425	20,5	104,3	5476	6791	5850	6133	6320	6039
87	-	-	0,00314	20,5	104,4	4239	5331	-	4785	4976	4730
88	-	-	0,00213	20,6	103,7	3131	4088	-	-	-	-
89	-	-	0,00100	20,6	103,1	-	-	2410	-	2695	2590

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
90	-	-	0,02241	19,3	119,2	45470	44486	44820	44978	44653	44925
91	-	-	0,02241	19,4	117,9	43232	43215	42913	43224	43064	43120
92	-	-	0,02141	19,4	116,5	40829	40143	41247	40486	40695	40740
93	-	-	0,02141	19,5	115,9	39693	39763	39428	39728	39596	39628
94	-	-	0,02028	19,5	115,3	38775	38639	38665	38707	38652	38693
95	-	-	0,01929	19,5	113,5	35139	35332	34952	35236	35142	35141
96	-	-	0,01816	19,6	112,9	33940	34122	33774	34031	33948	33945
97	-	-	0,01716	19,6	111,4	31002	31191	30758	31097	30975	30984
98	-	-	0,01602	19,7	110,4	28386	29202	28848	28794	29025	28812
99	-	-	0,01503	19,7	109,0	26038	26256	25821	26147	26038	26038
100	-	-	0,01290	20,0	110,7	22073	22187	21642	22130	21914	21967
101	-	-	0,01207	20,0	109,0	21569	22126	21845	21847	21986	21847
102	-	-	0,01077	20,1	107,0	17356	17513	17034	17435	17274	17301
103	-	-	0,00930	20,1	107,2	14268	14548	13971	14408	14259	14262
104	-	-	0,00862	20,2	106,4	13116	13216	12550	13166	12883	12960
105	-	-	0,00751	20,2	105,7	11646	12265	11319	11956	11792	11744
106	-	-	0,00638	20,2	105,3	10799	11262	10670	11030	10966	10910
107	-	-	0,00534	20,2	104,4	9087	9758	9813	9422	9786	9553
108	-	-	0,00425	20,2	106,3	7610	8343	7812	7976	8078	7922
109	-	-	0,00314	20,2	105,6	6693	6578	6951	6635	6764	6741
110	-	-	0,00213	20,2	104,9	5455	-	5093	-	-	-
111	-	-	0,02229	20,2	123,7	42943	43016	42519	42979	42767	42826
112	-	-	0,02143	18,4	122,0	42721	42913	42490	42817	42702	42708
113	-	-	0,02029	18,5	115,6	37576	37030	37908	37303	37469	37505
114	-	-	0,01816	18,6	113,1	32782	32998	32510	32890	32754	32763
115	-	-	0,01930	18,7	114,5	35052	35261	34769	35157	35015	35027
116	-	-	0,01816	18,7	112,7	31876	32140	31647	32008	31894	31888
117	-	-	0,01717	18,8	111,8	30316	30421	30354	30369	30387	30364
118	-	-	0,01603	18,8	110,3	27575	26696	28740	27135	27718	27670
119	-	-	0,01503	18,8	109,4	26071	26537	25550	26304	26044	26053
120	-	-	0,01390	18,9	114,6	23786	24093	23607	23939	23850	23829
121	-	-	0,01291	19,1	113,2	21266	21632	21175	21449	21403	21358
122	-	-	0,01177	19,1	112,9	18992	19393	18914	19193	19153	19100
123	-	-	0,01076	19,6	111,7	16892	17329	16944	17110	17136	17055
124	-	-	0,00964	19,6	111,1	15879	16272	15840	16075	16056	15997
125	-	-	0,00857	19,6	109,3	12723	13226	12829	12975	13028	12926
126	-	-	0,00750	19,6	108,4	11274	11578	11221	11426	11399	11358
127	-	-	0,00638	19,7	107,6	9587	10332	10263	9960	10297	10061
128		-	0,00533	19,7	107,0	8627	9399	9246	9013	9322	9091
129		-	0,00425	19,7	105,9	6454	8010	6935	7232	7473	7133
130		-	0,00313	19,8	105,0	5351	5772	5666	5561	5719	5596
131		-	0,00213	19,8	104,5	4856	4770	5015	4813	4893	4880
132		-	0,00099	19,9	103,5	-	-	2798	-	-	-
133	0,00004	-	-	19,4	101,4	180	203	172	191	187	185

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
134	0,00007	-	-	19,5	101,6	462	470	399	466	434	444
135	0,00010	-	-	19,7	101,8	812	797	709	804	753	773
136	0,00014	-	-	19,8	102,0	1217	1214	1154	1215	1184	1195
137	0,00015	-	-	20,2	102,1	1414	1439	1421	1427	1430	1425
138	0,00017	-	-	20,2	102,3	1680	1721	1694	1701	1708	1699
139	0,00019	-	-	20,4	102,5	1997	2000	1960	1999	1980	1986
140	0,00020	-	-	20,5	102,6	2284	2259	2208	2271	2233	2250
141	0,00022	-	-	20,5	102,7	2493	2464	-	-	-	2453
142	0,00024	-	-	20,6	103,0	2931	2946	2918	2938	2932	2931
143	0,00025	-	-	20,6	103,2	3289	3287	3250	3288	3269	3275
144	0,00027	-	-	20,7	103,4	3610	3637	3544	3624	3591	3597
145	0,00029	-	-	20,8	103,6	3967	3975	3853	3971	3914	3932
146	0,00030	-	-	20,8	103,8	4359	4388	4309	4374	4349	4352
147	0,00032	-	-	20,9	104,1	4753	4777	4725	4765	4751	4752
148	0,00034	-	-	21,0	104,3	5183	5182	5074	5182	5128	5146
149	0,00035	-	-	21,1	104,6	5647	5667	5540	5657	5604	5618
150	0,00037	-	-	21,1	104,8	6120	6163	6096	6142	6130	6127
151	0,00039	-	-	21,2	105,1	6640	6642	6545	6641	6593	6609
152	0,00041	-	-	21,2	105,4	7213	7188	7087	7200	7137	7163
153	0,00042	-	-	21,3	105,7	7638	7653	7599	7645	7626	7630
154	0,00044	-	-	21,3	106,0	8218	8232	8108	8225	8170	8186
155	0,00046	-	-	21,4	106,3	8796	8821	8743	8809	8782	8787
156	0,00048	-	-	21,5	106,6	9264	9320	9275	9292	9297	9286
157	0,00050	-	-	21,6	107,0	9925	9953	9813	9939	9883	9897
158	0,00051	-	-	21,6	107,4	10602	10705	10646	10654	10675	10651
159	0,00053	-	-	21,6	107,8	11202	11266	11191	11234	11229	11220
160	0,00055	-	-	21,7	108,1	11842	11955	11899	11899	11927	11899
161	0,00057	-	-	21,8	108,5	12475	12587	12526	12531	12556	12529
162	0,00059	-	-	21,8	108,9	13209	13331	13251	13270	13291	13264
163	0,00061	-	-	21,9	109,4	14022	14231	14143	14127	14187	14132
164	0,00063	-	-	21,9	109,8	14676	14863	14814	14769	14838	14784
165	0,00065	-	-	22,0	110,2	15419	15664	15617	15541	15640	15567
166	0,00067	-	-	22,0	110,8	16288	16562	16597	16425	16580	16482
167	0,00069	-	-	22,1	111,3	17222	17499	17477	17361	17488	17399
168	0,00071	-	-	22,1	111,7	17947	18275	18367	18111	18321	18196
169	0,00073	-	-	22,2	112,3	18905	19285	19361	19095	19323	19184
170	0,00075	-	-	22,2	113,0	19979	20384	20499	20181	20442	20287
171	0,00004	-	-	25,4	101,4	183	-	171	-	-	-
172	0,00007	-	-	25,4	101,6	433	470	386	451	428	430
173	0,00010	-	-	25,4	101,8	798	787	705	792	746	763
174	0,00013	-	-	25,4	102,0	1259	1266	1203	1263	1235	1243
175	0,00015	-	-	25,4	102,1	1416	1423	1405	1419	1414	1415
176	0,00017	-	-	25,4	102,3	1704	1713	1696	1709	1705	1704
177	0,00018	-	-	25,4	102,4	1963	1958	1918	1961	1938	1947

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
178	0,00020	-	-	25,4	102,6	2314	2293	2194	2303	2243	2267
179	0,00022	-	-	25,4	102,8	2594	2610	2509	2602	2559	2571
180	0,00023	-	-	25,4	103,0	2980	2984	2929	2982	2957	2964
181	0,00025	-	-	25,4	103,2	3307	3286	3238	3296	3262	3277
182	0,00026	-	-	25,4	103,4	3663	3642	3551	3653	3597	3619
183	0,00028	-	-	25,4	103,6	3994	3957	3829	3976	3893	3927
184	0,00030	-	-	25,4	103,8	4400	4391	4298	4395	4344	4363
185	0,00031	-	-	25,4	104,0	4788	4776	4729	4782	4753	4764
186	0,00033	-	-	25,4	104,3	5270	5219	5126	5244	5173	5205
187	0,00035	-	-	25,4	104,6	5699	5673	5541	5686	5607	5637
188	0,00037	-	-	25,4	104,9	6138	6189	6107	6163	6148	6144
189	0,00038	-	-	25,4	105,1	6513	6613	6500	6563	6557	6542
190	0,00040	-	-	25,4	105,4	7054	7136	6995	7095	7065	7062
191	0,00042	-	-	25,5	105,7	7503	7651	7556	7577	7603	7570
192	0,00044	-	-	25,4	106,0	8078	8191	8081	8135	8136	8117
193	0,00045	-	-	25,5	106,4	8715	8819	8714	8767	8766	8749
194	0,00047	-	-	25,5	106,7	9366	9454	9341	9410	9398	9387
195	0,00049	-	-	25,5	107,0	9912	9966	9818	9939	9892	9899
196	0,00051	-	-	25,5	107,3	10486	10590	10505	10538	10548	10527
197	0,00053	-	-	25,5	107,7	11139	11231	11115	11185	11173	11162
198	0,00055	-	-	25,5	108,2	11865	11993	11926	11929	11960	11928
199	0,00056	-	-	25,5	108,5	12514	12674	12583	12594	12629	12590
200	0,00058	-	-	25,5	109,0	13271	13433	13362	13352	13397	13355
201	0,00060	-	-	25,5	109,4	14066	14301	14187	14183	14244	14184
202	0,00062	-	-	25,5	109,8	14747	14976	14900	14861	14938	14874
203	0,00064	-	-	25,5	110,2	15412	15667	15618	15539	15642	15566
204	0,00066	-	-	25,5	110,8	16294	16579	16589	16436	16584	16487
205	0,00068	-	-	25,5	111,3	17272	17551	17554	17412	17553	17459
206	0,00070	-	-	25,5	111,9	18168	18539	18628	18354	18584	18445
207	0,00072	-	-	25,6	112,4	19084	19447	19558	19266	19503	19363
208	0,00074	-	-	25,6	113,0	19997	20428	20541	20213	20484	20322
209	0,00004	-	-	24,3	101,4	185	-	166	-	-	-
210	0,00007	-	-	24,3	101,6	437	468	382	452	425	429
211	0,00010	-	-	24,3	101,8	786	796	709	791	752	763
212	0,00014	-	-	24,4	102,0	1201	1219	1152	1210	1186	1191
213	0,00015	-	-	24,4	102,1	1392	1420	1413	1406	1417	1408
214	0,00017	-	-	24,4	102,3	1672	1715	1696	1693	1705	1694
215	0,00020	-	-	24,4	102,6	2297	2313	2225	2305	2269	2278
216	0,00022	-	-	24,4	102,8	2555	2599	2493	2577	2546	2549
217	0,00023	-	-	24,5	103,0	2904	2963	2899	2934	2931	2922
218	0,00025	-	-	24,5	103,2	3247	3287	3231	3267	3259	3255
219	0,00027	-	-	24,5	103,4	3602	3622	3535	3612	3579	3586
220	0,00028	-	-	24,6	103,6	3948	3958	3834	3953	3896	3913
221	0,00030	-	-	24,6	103,8	4332	4364	4271	4348	4318	4322

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
222	0,00032	-	-	24,6	104,0	4739	4778	4722	4758	4750	4746
223	0,00033	-	-	24,6	104,3	5197	5204	5092	5201	5148	5165
224	0,00035	-	-	24,6	104,6	5651	5675	5544	5663	5609	5623
225	0,00037	-	-	24,7	104,8	6099	6154	6052	6127	6103	6102
226	0,00038	-	-	24,7	105,1	6576	6614	6495	6595	6555	6562
227	0,00040	-	-	24,7	105,4	7092	7106	6972	7099	7039	7057
228	0,00042	-	-	24,7	105,7	7622	7676	7582	7649	7629	7626
229	0,00044	-	-	24,7	106,0	8160	8195	8064	8178	8129	8140
230	0,00045	-	-	24,8	106,4	8782	8831	8732	8806	8781	8781
231	0,00047	-	-	24,8	106,7	9339	9420	9307	9380	9363	9355
232	0,00049	-	-	24,8	107,0	9969	10016	9858	9992	9937	9948
233	0,00051	-	-	24,8	107,4	10561	10665	10589	10613	10627	10605
234	0,00053	-	-	24,9	107,7	11084	11215	11086	11149	11151	11128
235	0,00055	-	-	24,9	108,1	11806	11933	11865	11869	11899	11868
236	0,00057	-	-	24,9	108,5	12460	12603	12537	12531	12570	12533
237	0,00058	-	-	24,9	108,9	13220	13407	13302	13313	13354	13309
238	0,00060	-	-	25,0	109,4	13991	14183	14116	14087	14149	14096
239	0,00062	-	-	25,0	109,8	14669	14876	14798	14772	14837	14781
240	0,00064	-	-	25,0	110,1	15174	15429	15413	15302	15421	15339
241	0,00066	-	-	25,1	110,7	16234	16511	16514	16372	16512	16419
242	0,00068	-	-	25,1	111,3	17248	17529	17554	17389	17542	17444
243	0,00070	-	-	25,1	111,9	18131	18481	18539	18306	18510	18384
244	0,00072	-	-	25,2	112,4	19168	19543	19652	19356	19598	19455
245	0,00075	-	-	25,2	112,9	19948	20381	20458	20164	20419	20262
246	0,00004	0,00194	-	19,4	102,2	1141	1540	1070	1341	1305	1251
247	0,00004	0,00388	-	19,9	104,2	3729	4752	4977	4241	4865	4486
248	0,00004	0,00593	-	20,3	105,8	7818	6178	7064	6998	6621	7020
249	0,00004	0,00751	-	20,6	108,7	12714	12066	13438	12390	12752	12739
250	0,00004	0,00915	-	20,8	110,7	16288	16238	16787	16263	16513	16438
251	0,00004	0,00965	-	21,0	111,3	17512	17728	17708	17620	17718	17649
252	0,00004	0,01014	-	21,5	111,9	18806	18599	19098	18703	18848	18834
253	0,00004	0,01114	-	21,9	113,4	21190	21765	22061	21477	21913	21672
254	0,00005	0,01182	-	22,1	114,2	22537	22448	23632	22493	23040	22872
255	0,00005	0,01261	-	22,4	115,5	25063	24407	25998	24735	25202	25156
256	0,00005	0,01330	-	22,6	116,9	27394	27309	28880	27351	28094	27861
257	0,00005	0,01457	-	22,7	118,9	30209	30381	32183	30295	31282	30925
258	0,00005	0,01478	-	22,8	119,2	31497	31412	33448	31454	32430	32119
259	0,00005	0,01592	-	23,1	121,6	35037	35103	37615	35070	36359	35918
260	0,00005	0,01759	-	23,1	124,0	39590	39515	42377	39552	40946	40494
261	0,00005	0,01789	-	23,4	126,6	42937	41820	45244	42379	43532	43334
262	0,00006	0,00170	-	20,5	102,4	1462	1510	1700	1486	1605	1557
263	0,00006	0,00277	-	21,5	103,0	2613	2145	2395	2379	2270	2384
264	0,00006	0,00336	-	22,0	103,3	3071	2831	3032	2951	2932	2978
265	0,00006	0,00464	-	22,6	104,2	4498	4054	4374	4276	4214	4309

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
266	0,00006	0,00579	-	23,1	106,9	7958	9002	10510	8480	9756	9157
267	0,00006	0,00558	-	23,4	106,8	8053	8412	9966	8232	9189	8810
268	0,00006	0,00674	-	23,8	108,2	11026	10959	12273	10993	11616	11420
269	0,00006	0,00712	-	24,2	109,0	12830	13018	14132	12924	13575	13327
270	0,00006	0,00770	-	24,6	110,3	14457	15459	16175	14958	15817	15363
271	0,00006	0,00794	-	25,2	110,6	15004	15799	16556	15402	16177	15786
272	0,00006	0,00832	-	25,5	110,8	15972	16729	16992	16351	16861	16564
273	0,00006	0,00868	-	25,7	111,3	17030	17509	17640	17269	17574	17393
274	0,00006	0,00911	-	25,9	111,8	17976	18726	18212	18351	18469	18305
275	0,00006	0,00943	-	26,1	112,0	18623	19314	19134	18969	19224	19024
276	0,00006	0,01014	-	26,4	113,3	20928	21128	21010	21028	21069	21022
277	0,00006	0,01087	-	26,6	114,6	23130	23590	24107	23360	23849	23609
278	0,00006	0,01152	-	26,8	116,2	25919	25760	26073	25840	25916	25917
279	0,00006	0,01270	-	27,2	118,7	29699	29167	30903	29433	30035	29923
280	0,00006	0,01313	-	27,4	119,3	31733	30361	31923	31047	31142	31339
281	0,00006	0,00165	-	27,9	102,2	1261	1270	1222	1265	1246	1251
282	0,00006	0,00230	-	28,4	102,6	1733	1656	1866	1694	1761	1751
283	0,00006	0,00330	-	29,2	104,1	3492	4289	4595	3890	4442	4125
284	0,00007	0,00459	-	29,5	105,8	5848	6932	8229	6390	7581	7003
285	0,00007	0,00516	-	29,6	106,3	7192	8173	9316	7683	8744	8227
286	0,00007	0,00611	-	29,6	108,0	10321	10416	12264	10369	11340	11000
287	0,00007	0,00670	-	29,7	108,8	11773	13078	13446	12426	13262	12766
288	0,00007	0,00772	-	29,7	110,9	15998	16343	17060	16171	16702	16467
289	0,00007	0,00842	-	29,7	111,6	16846	17664	18571	17255	18117	17693
290	0,00007	0,00916	-	29,7	112,2	18636	18944	19661	18790	19302	19080
291	0,00007	0,01007	-	29,8	114,3	21688	22870	22926	22279	22898	22495
292	0,00007	0,01080	-	29,8	115,7	24398	24704	25487	24551	25095	24863
293	0,00007	0,01110	-	29,8	116,4	25540	25781	26264	25660	26023	25862
294	0,00007	0,01163	-	29,8	117,1	27139	26696	27201	26917	26948	27012
295	0,00007	0,01254	-	29,9	118,8	30828	29481	31098	30154	30289	30469
296	0,00007	0,01286	-	30,0	120,1	30725	30470	32105	30597	31287	31100
297	0,00007	0,01313	-	30,0	120,6	32374	31096	33364	31735	32230	32278
298	0,00007	0,01385	-	29,9	121,7	33995	32108	33993	33052	33050	33365
299	0,00007	0,01413	-	29,9	121,9	34643	33044	35944	33843	34494	34543
300	0,00008	0,01479	-	29,8	123,2	36554	34795	37467	35674	36131	36272
301	0,00008	0,01541	-	29,8	125,2	38789	36115	39898	37452	38006	38267
302	0,00008	0,00133	-	24,5	102,5	1530	1814	1618	1672	1716	1654
303	0,00008	0,00411	-	25,5	105,9	6134	7212	8090	6673	7651	7145
304	0,00009	0,00488	-	25,8	107,5	8632	9631	11181	9132	10406	9815
305	0,00009	0,00582	-	25,9	108,6	10359	11939	13457	11149	12698	11918
306	0,00009	0,00639	-	25,8	110,3	13219	14773	16659	13996	15716	14883
307	0,00009	0,00687	-	25,9	111,4	15325	16557	17895	15941	17226	16592
308	0,00009	0,00734	-	25,9	111,7	15870	16951	18728	16411	17839	17183
309	0,00009	0,00731	-	25,9	111,9	16809	17251	19059	17030	18155	17706

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
310	0,00009	0,00793	-	25,9	112,7	17965	18804	20444	18385	19624	19071
311	0,00009	0,00837	-	25,9	113,3	18920	19323	21493	19121	20408	19912
312	0,00009	0,00883	-	25,9	114,0	19954	20948	22126	20451	21537	21009
313	0,00009	0,00889	-	25,9	114,6	21150	21588	22211	21369	21899	21650
314	0,00009	0,00955	-	25,9	115,7	23217	23245	24280	23231	23762	23580
315	0,00009	0,00977	-	25,9	116,3	24095	24199	24361	24147	24280	24218
316	0,00009	0,00997	-	25,9	116,3	24120	24344	25408	24232	24876	24624
317	0,00009	0,01060	-	26,0	117,3	25667	25805	26672	25736	26238	26048
318	0,00009	0,01082	-	25,9	118,1	26386	26017	27020	26202	26518	26474
319	0,00009	0,01112	-	25,9	118,8	27535	27188	28188	27361	27688	27637
320	0,00010	0,01168	-	25,9	119,8	28464	28295	29333	28380	28814	28697
321	0,00010	0,01204	-	25,9	120,4	28642	28549	30651	28596	29600	29281
322	0,00010	0,01234	-	25,9	120,8	29368	29550	30217	29459	29883	29712
323	0,00010	0,01313	-	25,9	123,0	32204	32175	33454	32189	32814	32611
324	0,00010	0,01360	-	25,9	123,4	32225	31403	34047	31814	32725	32558
325	0,00010	0,01353	-	25,9	124,1	34392	34325	35224	34359	34774	34647
326	0,00010	0,01427	-	25,9	126,1	34898	34082	37014	34490	35548	35332
327	0,00010	0,01440	-	25,7	126,1	35140	35331	37798	35236	36565	36090
328	0,00010	0,01492	-	25,7	126,3	36927	36056	38519	36491	37287	37167
329	0,00010	0,01509	-	25,7	128,0	37969	36820	39621	37394	38220	38136
330	0,00010	0,01575	-	25,7	128,4	39557	37797	40985	38677	39391	39446
331	0,00010	0,01619	-	25,7	129,3	40101	39122	42479	39611	40800	40567
332	0,00010	0,00166	-	28,1	102,8	2215	2356	2157	2285	2257	2243
333	0,00010	0,00278	-	28,1	103,8	3801	3818	3894	3810	3856	3838
334	0,00010	0,00352	-	28,2	104,2	4338	4206	4471	4272	4338	4338
335	0,00011	0,00406	-	28,2	107,5	7983	9690	10452	8836	10071	9375
336	0,00011	0,00518	-	28,3	108,9	10240	12284	14229	11262	13257	12251
337	0,00011	0,00600	-	28,2	110,6	13401	14295	17051	13848	15673	14916
338	0,00011	0,00669	-	28,3	112,4	16266	17092	19431	16679	18261	17596
339	0,00011	0,00756	-	28,3	114,2	19518	19711	22265	19614	20988	20498
340	0,00012	0,00866	-	28,3	115,5	21732	21888	23244	21810	22566	22288
341	0,00012	0,00884	-	28,3	116,0	21752	22153	24532	21953	23342	22812
342	0,00012	0,00932	-	28,3	117,4	23410	23729	25380	23569	24554	24173
343	0,00012	0,00972	-	28,2	117,9	24170	24424	27622	24297	26023	25405
344	0,00012	0,00998	-	28,2	118,4	24985	25081	27877	25033	26479	25981
345	0,00012	0,01029	-	28,2	119,4	27226	27155	28594	27190	27874	27658
346	0,00012	0,01062	-	28,1	120,6	26581	27754	30600	27167	29177	28312
347	0,00012	0,01115	-	28,0	121,6	28456	28557	31038	28507	29798	29351
348	0,00012	0,01183	-	28,0	122,2	29546	29255	31702	29401	30479	30168
349	0,00012	0,01255	-	27,9	124,1	31029	31798	35538	31414	33668	32788
350	0,00013	0,01331	-	27,9	125,3	32797	32863	37395	32830	35129	34352
351	0,00013	0,01447	-	27,9	128,6	34346	35432	39795	34889	37613	36524
352	0,00013	0,01515	-	27,9	130,9	36830	37197	41634	37013	39415	38553
353	0,00014	0,00177	-	26,0	103,4	3033	3031	3087	3032	3059	3051

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
354	0,00014	0,00255	-	26,8	103,9	4022	3950	3769	3986	3860	3914
355	0,00014	0,00351	-	27,3	104,8	5542	5167	5065	5355	5116	5258
356	0,00014	0,00424	-	27,5	109,2	11528	12935	14042	12232	13489	12835
357	0,00015	0,00533	-	27,6	111,9	14761	16724	18867	15742	17795	16784
358	0,00015	0,00637	-	27,6	114,3	17842	19778	22158	18810	20968	19926
359	0,00015	0,00709	-	27,7	116,1	20897	22327	25217	21612	23772	22814
360	0,00015	0,00781	-	27,7	117,8	23871	24868	27222	24369	26045	25320
361	0,00016	0,00876	-	27,7	119,1	24598	25672	28541	25135	27106	26270
362	0,00016	0,00876	-	27,7	120,5	26823	28122	30443	27473	29283	28463
363	0,00016	0,00902	-	27,6	120,8	26278	27470	30520	26874	28995	28089
364	0,00016	0,00972	-	27,6	122,7	29774	31330	32651	30552	31991	31252
365	0,00016	0,00984	-	27,6	123,0	30020	31100	32155	30560	31628	31092
366	0,00016	0,01031	-	27,5	124,1	31095	31626	33024	31361	32325	31915
367	0,00016	0,01065	-	27,5	124,7	30739	31355	33660	31047	32508	31918
368	0,00016	0,01107	-	27,4	125,5	31387	32717	35233	32052	33975	33112
369	0,00017	0,01182	-	27,4	127,5	32630	34400	37185	33515	35793	34738
370	0,00017	0,01216	-	27,3	129,2	33842	36385	37713	35113	37049	35980
371	0,00018	0,01377	-	27,3	134,1	37171	39812	41530	38492	40671	39504
372	0,00018	0,01434	-	27,3	133,8	37088	38409	41580	37748	39994	39025
373	0,00018	0,01503	-	27,3	137,0	38934	40192	43693	39563	41943	40940
374	0,00017	0,00181	-	21,8	104,0	4901	4107	3691	4504	3899	4233
375	0,00017	0,00319	-	22,1	106,1	7801	7906	7789	7853	7847	7832
376	0,00017	0,00503	-	22,8	108,0	10368	10887	10641	10627	10764	10632
377	0,00018	0,00577	-	23,1	112,9	15818	17899	20674	16859	19287	18130
378	0,00018	0,00660	-	23,3	115,0	17853	20370	24459	19111	22414	20894
379	0,00018	0,00684	-	23,5	115,7	19253	21621	25759	20437	23690	22211
380	0,00018	0,00698	-	23,7	116,1	19559	21302	25078	20430	23190	21980
381	0,00018	0,00710	-	24,1	116,7	19982	22646	26475	21314	24560	23034
382	0,00019	0,00762	-	24,3	118,0	21509	23781	28185	22645	25983	24492
383	0,00019	0,00805	-	24,5	118,8	23265	25228	29170	24247	27199	25888
384	0,00019	0,00798	-	24,7	119,2	22950	24963	29551	23956	27257	25821
385	0,00019	0,00860	-	25,0	121,0	25837	28055	31543	26946	29799	28478
386	0,00019	0,00861	-	25,2	121,8	27187	29072	32913	28130	30992	29724
387	0,00019	0,00919	-	25,4	123,3	28861	30966	34135	29913	32550	31321
388	0,00020	0,00949	-	25,7	125,1	30459	32395	35397	31427	33896	32751
389	0,00020	0,00976	-	25,9	125,2	29435	31654	35700	30544	33677	32263
390	0,00020	0,00986	-	26,0	126,2	31217	33418	35655	32317	34537	33430
391	0,00020	0,01006	-	26,2	127,0	32608	34718	37105	33663	35911	34810
392	0,00020	0,01105	-	26,4	128,5	33767	35340	37674	34553	36507	35594
393	0,00020	0,01090	-	26,6	128,4	32772	34758	37663	33765	36210	35064
394	0,00020	0,01108	-	26,8	129,6	34883	36928	38704	35905	37816	36838
395	0,00020	0,01123	-	26,9	130,1	34871	36360	38757	35616	37559	36663
396	0,00020	0,01182	-	27,7	129,9	34435	35966	38622	35201	37294	36341
397	0,00021	0,01210	-	27,8	132,1	36847	38938	40355	37892	39646	38713

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
398	0,00021	0,01276	-	27,8	135,6	39025	40861	42715	39943	41788	40867
399	0,00022	0,01469	-	27,9	139,4	40581	42327	44325	41454	43326	42411
400	0,00022	0,01449	-	28,0	138,8	39615	41840	43149	40727	42494	41534
401	0,00021	0,00166	-	21,4	106,4	9662	8235	8161	8949	8198	8686
402	0,00021	0,00262	-	21,6	107,6	10484	11116	10682	10800	10899	10761
403	0,00021	0,00336	-	22,4	107,8	10696	10757	10616	10727	10687	10690
404	0,00022	0,00398	-	23,2	113,0	15679	21958	22883	18818	22421	20173
405	0,00023	0,00472	-	23,9	116,9	22784	29645	29771	26215	29708	27400
406	0,00023	0,00579	-	24,5	117,3	21220	24354	26596	22787	25475	24057
407	0,00023	0,00625	-	24,7	120,3	26899	29382	31149	28140	30265	29143
408	0,00024	0,00679	-	25,2	121,1	27681	29709	32021	28695	30865	29803
409	0,00024	0,00697	-	25,5	122,7	30067	31528	33546	30797	32537	31714
410	0,00024	0,00767	-	25,8	123,5	29903	32301	34812	31102	33557	32339
411	0,00024	0,00746	-	26,1	124,3	30896	33596	35887	32246	34742	33460
412	0,00025	0,00775	-	26,4	126,8	34306	35933	37333	35120	36633	35858
413	0,00025	0,00837	-	26,6	127,9	36189	37408	38310	36798	37859	37302
414	0,00025	0,00873	-	26,8	128,5	35185	37499	39126	36342	38313	37270
415	0,00026	0,00957	-	27,0	133,6	41452	42424	42308	41938	42366	42061
416	0,00026	0,00967	-	27,2	133,0	39861	41184	41514	40523	41349	40853
417	0,00026	0,01101	-	27,5	137,0	44253	43080	43693	43667	43387	43676
418	0,00025	0,00149	-	21,0	106,5	9450	9113	7489	9281	8301	8684
419	0,00026	0,00248	-	22,1	107,8	11582	10841	10308	11211	10574	10910
420	0,00026	0,00374	-	22,6	109,4	13158	13613	13362	13385	13487	13377
421	0,00027	0,00414	-	22,9	115,3	20408	21685	23141	21046	22413	21745
422	0,00028	0,00487	-	23,2	116,6	21684	23544	25525	22614	24534	23584
423	0,00028	0,00530	-	23,6	118,5	24572	26705	28956	25638	27830	26744
424	0,00028	0,00558	-	23,9	119,0	24680	26722	29334	25701	28028	26912
425	0,00028	0,00582	-	24,2	119,7	25218	27871	30515	26545	29193	27868
426	0,00028	0,00583	-	24,6	120,4	26904	29480	32033	28192	30756	29472
427	0,00028	0,00588	-	24,8	120,6	27032	29408	31612	28220	30510	29351
428	0,00028	0,00599	-	25,1	121,0	28136	30474	32551	29305	31513	30387
429	0,00028	0,00621	-	25,6	121,3	27511	30002	32779	28757	31391	30097
430	0,00029	0,00652	-	25,9	122,7	30183	32345	34150	31264	33247	32226
431	0,00029	0,00647	-	26,3	122,4	29417	31745	33791	30581	32768	31651
432	0,00029	0,00713	-	26,7	125,5	32842	35033	37148	33938	36091	35008
433	0,00030	0,00806	-	27,1	129,0	37590	38516	39771	38053	39143	38625
434	0,00031	0,00848	-	27,4	131,3	39861	40865	41989	40363	41427	40905
435	0,00031	0,00901	-	27,7	133,9	42571	43221	43697	42896	43459	43163
436	0,00034	0,00149	-	28,1	108,3	13663	12649	9981	13156	11315	12098
437	0,00036	0,00308	-	28,3	116,4	24769	28240	28777	26505	28509	27262
438	0,00036	0,00342	-	28,5	118,0	26796	31701	31884	29249	31792	30127
439	0,00037	0,00367	-	28,7	119,4	30856	33370	33739	32113	33554	32655
440	0,00037	0,00398	-	28,8	120,4	32081	35272	35664	33677	35468	34339
441	0,00038	0,00431	-	28,9	121,8	36292	37084	37530	36688	37307	36969

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
442	0,00038	0,00451	-	28,9	123,5	39629	39230	39531	39430	39380	39463
443	0,00039	0,00545	-	29,1	126,1	36439	38001	39340	37220	38670	37927
444	0,00039	0,00557	-	29,1	126,3	36830	38090	38883	37460	38486	37934
445	0,00041	0,00644	-	29,3	131,5	42631	43283	43641	42957	43462	43185
446	0,00041	0,00674	-	29,4	132,1	42547	43753	43831	43150	43792	43377
447	0,00041	0,00679	-	29,4	132,3	42820	43569	43924	43195	43747	43438
448	0,00041	0,00673	-	29,5	132,6	43693	44329	44412	44011	44371	44145
449	0,00041	0,00711	-	29,5	134,2	44350	44769	44801	44559	44785	44640
450	0,00043	0,00149	-	28,9	110,7	17742	17393	14019	17567	15706	16384
451	0,00043	0,00205	-	29,5	111,4	18437	17954	15228	18195	16591	17206
452	0,00043	0,00232	-	29,7	111,9	19235	18390	16427	18812	17408	18017
453	0,00045	0,00232	-	29,8	115,1	19169	26694	28159	22931	27426	24674
454	0,00046	0,00264	-	29,8	118,7	29650	32350	32624	31000	32487	31541
455	0,00047	0,00308	-	29,8	120,7	34200	35384	36125	34792	35754	35236
456	0,00047	0,00316	-	29,8	121,6	35909	36650	36928	36280	36789	36496
457	0,00048	0,00353	-	29,8	123,7	40625	39462	39922	40043	39692	40003
458	0,00048	0,00373	-	29,7	124,7	42345	41135	41691	41740	41413	41723
459	0,00049	0,00414	-	29,6	127,0	45429	43933	44312	44681	44123	44558
460	0,00050	0,00459	-	29,6	128,1	40209	41140	41606	40674	41373	40985
461	0,00051	0,00531	-	29,5	130,6	42508	43290	43858	42899	43574	43218
462	0,00053	0,00149	-	28,6	114,5	22688	23573	23457	23131	23515	23239
463	0,00054	0,00167	-	29,0	116,2	22682	27519	29382	25100	28450	26528
464	0,00055	0,00187	-	29,4	117,7	26189	30751	31314	28470	31032	29418
465	0,00055	0,00216	-	29,5	119,6	29962	34309	34960	32135	34634	33077
466	0,00057	0,00262	-	29,6	122,3	36882	38342	39079	37612	38710	38101
467	0,00057	0,00293	-	29,7	123,8	39644	40721	41582	40183	41152	40649
468	0,00058	0,00299	-	29,6	124,4	41551	41154	41735	41353	41445	41480
469	0,00059	0,00324	-	29,6	126,4	44904	43843	44687	44374	44265	44478
470	0,00064	0,00142	-	29,2	118,5	26764	31613	32985	29189	32299	30454
471	0,00066	0,00173	-	29,2	121,1	34792	35859	36643	35325	36251	35765
472	0,00067	0,00212	-	29,3	123,6	39593	40023	40838	39808	40431	40151
473	0,00068	0,00249	-	29,5	126,0	43610	43481	44447	43546	43964	43846
474	0,00076	0,00145	-	29,2	122,3	35300	38555	39388	36927	38972	37748
475	0,00077	0,00161	-	29,2	123,6	38801	40221	41253	39511	40737	40092
476	0,00078	0,00180	-	29,2	125,9	42983	43791	44814	43387	44303	43863
477	0,00008	0,00149	-	27,8	102,6	1922	1937	1848	1930	1892	1902
478	0,00017	0,00317	-	28,4	106,3	7539	8599	7971	8069	8285	8036
479	0,00028	0,00468	-	28,6	119,1	26853	34028	34644	30441	34336	31842
480	0,00032	0,00520	-	28,5	124,5	41073	38215	38349	39644	38282	39212
481	0,00034	0,00534	-	28,5	125,4	35547	37112	37831	36329	37471	36830
482	0,00037	0,00570	-	28,4	125,9	35963	37650	38145	36806	37897	37253
483	0,00040	0,00601	-	28,3	128,0	38400	39257	40107	38828	39682	39255
484	0,00043	0,00591	-	28,3	131,0	42011	42574	43073	42293	42824	42553
485	0,00048	0,00730	-	28,4	138,1	45900	45864	45618	45882	45741	45794

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
486	0,00004	0,00130	-	27,9	102,2	1055	1081	1075	1068	1078	1070
487	0,00008	0,00241	-	28,5	103,9	3473	4354	4497	3914	4426	4108
488	0,00017	0,00473	-	28,6	111,7	16468	17870	19074	17169	18472	17804
489	0,00019	0,00489	-	28,7	113,5	17620	19766	21261	18693	20513	19549
490	0,00022	0,00550	-	28,7	116,9	22747	24954	26873	23850	25913	24858
491	0,00024	0,00576	-	28,6	119,0	25438	27441	29451	26439	28446	27443
492	0,00027	0,00606	-	28,6	123,1	30954	33100	33577	32027	33338	32544
493	0,00029	0,00615	-	28,6	123,3	31656	33969	35785	32812	34877	33803
494	0,00033	0,00696	-	28,6	130,5	40718	41851	42520	41285	42186	41696
495	0,00037	0,00810	-	28,6	135,9	45456	45259	45283	45357	45271	45333
496	0,00004	0,00187	-	28,3	102,8	1711	2125	1942	1918	2034	1926
497	0,00008	0,00388	-	28,6	106,5	7412	8270	8910	7841	8590	8197
498	0,00010	0,00467	-	28,6	108,6	10864	11668	12346	11266	12007	11626
499	0,00012	0,00532	-	28,6	110,3	13431	14143	16419	13787	15281	14664
500	0,00014	0,00624	-	28,7	113,5	18004	18520	20862	18262	19691	19128
501	0,00016	0,00680	-	28,7	116,9	22221	23656	25714	22938	24685	23864
502	0,00019	0,00810	-	28,8	122,7	30080	32158	33600	31119	32879	31946
503	0,00021	0,00842	-	28,8	126,0	32695	34535	35810	33615	35173	34347
504	0,00024	0,00916	-	28,7	131,3	38436	39793	40144	39114	39969	39458
505	0,00027	0,00988	-	28,8	133,3	38535	39830	41073	39182	40452	39813
506	0,00030	0,01081	-	28,8	139,2	45346	45576	44599	45461	45087	45173
507	0,00004	0,00266	-	19,0	102,9	2522	2351	2274	2437	2313	2383
508	0,00009	0,00593	-	19,0	109,4	12174	12900	14830	12537	13865	13302
509	0,00011	0,00698	-	19,8	113,1	17329	18706	21032	18018	19869	19022
510	0,00013	0,00765	-	19,9	115,8	20466	21404	25191	20935	23298	22354
511	0,00015	0,00884	-	20,8	120,7	25479	27562	29882	26520	28722	27641
512	0,00018	0,00973	-	20,8	125,3	32648	32871	35418	32760	34145	33646
513	0,00021	0,01123	-	21,0	133,5	40382	40445	42356	40413	41401	41061
514	0,00024	0,01210	-	21,1	137,0	41536	42950	44008	42243	43479	42832
515	0,00004	0,00392	-	22,5	104,4	3894	4654	5298	4274	4976	4615
516	0,00006	0,00534	-	22,6	107,0	9349	9069	10203	9209	9636	9540
517	0,00007	0,00636	-	22,7	109,0	12175	12539	13588	12357	13064	12767
518	0,00008	0,00706	-	22,9	111,4	15528	16744	18691	16136	17717	16988
519	0,00009	0,00769	-	23,1	113,8	19340	20139	21837	19739	20988	20438
520	0,00011	0,00958	-	23,3	117,5	24563	24958	27722	24761	26340	25748
521	0,00014	0,01116	-	23,4	123,8	30113	30834	35286	30474	33060	32078
522	0,00016	0,01224	-	23,5	129,2	33631	34892	38564	34261	36728	35696
523	0,00020	0,01451	-	23,6	138,8	40354	41773	44787	41064	43280	42305
524	0,00004	-	0,00099	20,4	106,6	8075	9031	9544	8553	9287	8883
525	0,00004	-	0,00177	20,3	108,1	10945	12012	12404	11479	12208	11787
526	0,00004	-	0,00313	20,3	111,3	15031	17431	18923	16231	18177	17128
527	0,00005	-	0,00448	20,3	115,1	20248	24399	27248	22324	25824	23965
528	0,00005	-	0,00547	20,3	120,0	25417	31774	36208	28596	33991	31133
529	0,00005	-	0,00637	20,3	120,7	24944	32615	38662	28779	35639	32074

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
530	0,00005	-	0,00749	20,3	125,4	29513	38532	45618	34023	42075	37888
531	0,00005	-	0,00840	20,3	126,0	30134	39623	45616	34879	42620	38458
532	0,00005	-	0,00514	20,3	117,7	21678	27254	31142	24466	29198	26691
533	0,00008	-	0,00115	20,3	108,0	10304	11494	12357	10899	11926	11385
534	0,00008	-	0,00212	20,4	110,7	14307	16178	17728	15243	16953	16071
535	0,00008	-	0,00327	20,3	113,4	18728	21031	22848	19880	21940	20869
536	0,00008	-	0,00415	20,2	115,6	20734	24186	26963	22460	25575	23961
537	0,00009	-	0,00515	20,2	119,6	25986	30854	33698	28420	32276	30179
538	0,00009	-	0,00657	20,2	122,9	28831	34002	37402	31416	35702	33411
539	0,00009	-	0,00787	20,2	126,1	32603	38656	43163	35630	40909	38141
540	0,00009	-	0,00861	20,2	128,0	34120	40603	44998	37362	42801	39907
541	0,00009	-	0,00951	20,3	131,0	36709	43182	45618	39946	44400	41837
542	0,00011	-	0,00105	20,2	108,8	11854	13056	13637	12455	13347	12849
543	0,00012	-	0,00235	20,2	111,9	16900	18449	19645	17674	19047	18331
544	0,00012	-	0,00353	20,1	115,0	21137	24335	25334	22736	24834	23602
545	0,00012	-	0,00415	20,1	116,1	22005	25601	27076	23803	26339	24894
546	0,00012	-	0,00525	20,1	119,9	26009	30115	31936	28062	31026	29354
547	0,00013	-	0,00583	20,1	123,5	32051	36831	38068	34441	37450	35650
548	0,00013	-	0,00729	20,1	125,6	31498	37207	39909	34353	38558	36205
549	0,00013	-	0,00851	20,1	128,3	34477	39470	42227	36973	40848	38725
550	0,00013	-	0,00856	20,1	130,0	36049	41509	43926	38779	42717	40495
551	0,00014	-	0,01096	20,1	137,1	41878	45885	45618	43882	45752	44460
552	0,00020	-	0,00114	19,0	112,1	17791	18464	18185	18127	18324	18146
553	0,00021	-	0,00256	19,0	116,8	25379	27152	27183	26266	27168	26571
554	0,00021	-	0,00273	19,0	116,9	25479	27301	27600	26390	27450	26793
555	0,00022	-	0,00429	18,9	120,8	29461	32580	33319	31021	32949	31787
556	0,00023	-	0,00487	18,8	123,6	31422	35346	36527	33384	35936	34431
557	0,00023	-	0,00609	18,9	126,6	34804	39492	40274	37148	39883	38190
558	0,00024	-	0,00717	18,9	130,0	37312	42872	43046	40092	42959	41077
559	0,00024	-	0,00808	18,9	132,5	38365	44956	44433	41661	44694	42585
560	0,00025	-	0,00154	19,8	114,9	23141	23594	23334	23367	23464	23356
561	0,00025	-	0,00190	19,7	115,5	24781	25749	25831	25265	25790	25454
562	0,00026	-	0,00372	19,5	120,5	29685	32234	32794	30959	32514	31571
563	0,00026	-	0,00384	19,4	121,6	31605	34278	34830	32942	34554	33571
564	0,00027	-	0,00583	19,3	126,5	35678	40400	40822	38039	40611	38966
565	0,00027	-	0,00544	19,3	127,6	37360	41610	42242	39485	41926	40404
566	0,00029	-	0,00782	19,2	133,4	39287	45660	44633	42474	45146	43193
567	0,00028	-	0,00152	20,7	114,4	22496	23105	23103	22800	23104	22901
568	0,00028	-	0,00229	20,5	116,0	24895	25628	25548	25261	25588	25357
569	0,00029	-	0,00292	20,3	120,3	31168	32843	33105	32005	32974	32372
570	0,00030	-	0,00431	20,0	123,4	34195	36997	37202	35596	37100	36131
571	0,00031	-	0,00552	20,0	126,4	36335	40116	40816	38225	40466	39089
572	0,00032	-	0,00652	19,9	130,0	39939	44531	44082	42235	44307	42851
573	0,00032	-	0,00121	20,6	115,1	23785	24138	24217	23961	24177	24046

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
574	0,00033	-	0,00223	20,4	118,9	29660	30836	31049	30248	30942	30515
575	0,00034	-	0,00372	20,2	122,4	33521	35512	35991	34516	35752	35008
576	0,00035	-	0,00417	20,1	125,6	37129	40111	40818	38620	40464	39352
577	0,00036	-	0,00533	20,0	129,0	40021	44664	44288	42342	44476	42991
578	0,00036	-	0,00590	20,0	130,6	40631	44926	44574	42778	44750	43377
579	0,00037	-	0,00106	20,5	115,8	25045	25414	25535	25230	25475	25332
580	0,00039	-	0,00237	20,4	119,9	31867	32404	32795	32135	32599	32355
581	0,00040	-	0,00326	20,3	123,0	34779	36608	37161	35693	36885	36183
582	0,00041	-	0,00444	20,2	128,0	41111	44330	44330	42721	44330	43257
583	0,00042	-	0,00472	20,1	130,5	42752	45862	45412	44307	45637	44675
584	0,00004	-	0,00135	17,3	106,7	8740	9209	9591	8974	9400	9180
585	0,00006	-	0,00219	17,6	109,6	12977	14427	15181	13702	14804	14195
586	0,00008	-	0,00328	17,7	113,5	18468	20879	22403	19674	21641	20583
587	0,00010	-	0,00434	17,8	116,7	22343	26284	27942	24313	27113	25523
588	0,00013	-	0,00551	17,8	120,9	28319	32838	34318	30578	33578	31825
589	0,00015	-	0,00646	17,9	124,4	30852	35785	37619	33319	36702	34752
590	0,00017	-	0,00783	18,0	128,0	33544	39012	40671	36278	39841	37742
591	0,00020	-	0,00846	18,0	130,7	35903	41869	42137	38886	42003	39970
592	0,00023	-	0,00983	18,1	136,2	39887	45881	44315	42884	45098	43361
593	0,00004	-	0,00112	20,1	106,2	7694	8365	8726	8029	8545	8261
594	0,00006	-	0,00326	19,5	111,1	15633	17860	18493	16746	18176	17328
595	0,00008	-	0,00453	19,2	115,3	20865	23916	26503	22391	25209	23761
596	0,00010	-	0,00541	19,1	119,2	25439	29437	31260	27438	30349	28712
597	0,00013	-	0,00632	19,0	122,0	27935	32785	35685	30360	34235	32135
598	0,00015	-	0,00813	18,9	128,0	33970	39893	41050	36931	40471	38304
599	0,00017	-	0,00807	18,9	128,0	33970	40138	41011	37054	40574	38373
600	0,00020	-	0,00917	18,9	133,0	38267	44784	44199	41526	44492	42417
601	0,00004	-	0,00425	19,2	112,4	16369	19323	21032	17846	20177	18908
602	0,00007	-	0,00533	19,0	118,4	24495	28961	31314	26728	30137	28257
603	0,00009	-	0,00673	19,0	123,5	30323	35492	38748	32907	37120	34854
604	0,00011	-	0,00860	19,0	129,1	35554	41384	44107	38469	42746	40348
605	0,00014	-	0,00965	19,0	132,4	38937	44696	45463	41816	45079	43032
606	0,00005	-	0,00531	20,0	115,2	19793	24185	26220	21989	25202	23399
607	0,00007	-	0,00728	19,7	122,2	28454	33904	38613	31179	36259	33657
608	0,00009	-	0,00836	19,7	125,6	32042	38158	42224	35100	40191	37474
609	0,00012	-	0,01068	19,6	134,7	39979	45811	45618	42895	45715	43803
610	0,00005	-	0,00536	16,8	116,8	21851	26274	29466	24062	27870	25864
611	0,00007	-	0,00861	17,2	126,8	32433	39736	45158	36085	42447	39109
612	0,00010	-	0,01035	17,4	133,6	38812	45497	45618	42155	45558	43309
613	0,00005	-	0,00965	17,7	130,3	35310	44796	45618	40053	45207	41908
614	-	0,00150	0,01174	20,8	117,6	29979	29324	27768	29651	28546	29023
615	-	0,00182	0,01287	20,8	119,1	33535	32510	31084	33022	31797	32376
616	-	0,00179	0,01386	20,8	120,5	36106	35061	33460	35584	34261	34876
617	-	0,00204	0,01497	20,7	122,6	40231	39326	37607	39778	38466	39055

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
618	-	0,00215	0,01598	20,7	124,2	43231	42336	40484	42784	41410	42017
619	-	0,00149	0,00725	20,9	112,4	20918	19832	18426	20375	19129	19725
620	-	0,00180	0,00854	20,8	114,9	25547	24310	22769	24928	23539	24208
621	-	0,00209	0,00962	20,8	116,8	29503	28180	26824	28842	27502	28169
622	-	0,00227	0,01073	20,8	118,4	32659	31022	29821	31840	30421	31167
623	-	0,00249	0,01174	20,8	120,8	36754	35429	33961	36092	34695	35382
624	-	0,00265	0,01286	20,7	122,6	40071	38678	37209	39375	37944	38653
625	-	0,00271	0,01386	20,8	124,3	43670	42181	40595	42925	41388	42149
626	-	0,00166	0,00529	21,0	111,7	19187	17448	15201	18318	16325	17279
627	-	0,00180	0,00636	21,0	113,8	22685	20996	18860	21841	19928	20847
628	-	0,00224	0,00747	20,9	116,1	26730	25094	23393	25912	24243	25072
629	-	0,00249	0,00854	20,9	117,0	29974	28316	25938	29145	27127	28076
630	-	0,00277	0,00962	20,9	118,9	33292	31583	29663	32437	30623	31513
631	-	0,00323	0,01075	20,9	122,4	39925	38606	36505	39265	37555	38345
632	-	0,00379	0,01287	20,9	127,1	45915	45875	45005	45895	45440	45598
633	-	0,00166	0,00424	21,1	110,7	17896	15463	13143	16680	14303	15501
634	-	0,00210	0,00530	21,0	113,7	23128	20992	18323	22060	19658	20815
635	-	0,00249	0,00636	20,9	115,7	27055	24315	21719	25685	23017	24363
636	-	0,00297	0,00748	20,9	118,1	31302	28190	26420	29746	27305	28637
637	-	0,00333	0,00856	20,8	120,6	37119	34985	32633	36052	33809	34913
638	-	0,00382	0,00962	20,8	122,8	41295	39090	36803	40193	37947	39063
639	-	0,00418	0,01074	20,8	125,6	45909	44294	41942	45101	43118	44048
640	-	0,00149	0,00312	21,2	109,1	14382	12781	10648	13582	11715	12604
641	-	0,00226	0,00424	21,0	112,8	21578	19281	16650	20430	17965	19170
642	-	0,00270	0,00529	20,9	115,3	26680	23445	20732	25062	22088	23619
643	-	0,00321	0,00636	20,9	118,1	31728	28114	25905	29921	27010	28582
644	-	0,00372	0,00748	20,9	120,9	37958	34676	32559	36317	33617	35064
645	-	0,00434	0,00855	20,8	123,9	43944	40554	38525	42249	39539	41008
646	-	0,00133	0,00212	21,2	107,7	11860	10288	8253	11074	9271	10134
647	-	0,00205	0,00313	21,1	111,2	18834	15844	13974	17339	14909	16217
648	-	0,00264	0,00424	21,0	114,2	24294	21566	18941	22930	20254	21600
649	-	0,00323	0,00531	20,9	116,9	29708	26217	23837	27963	25027	26588
650	-	0,00397	0,00636	20,8	120,6	37301	34309	31576	35805	32943	34396
651	-	0,00467	0,00748	20,8	124,6	44697	42246	39437	43471	40841	42126
652	-	0,00150	0,00212	21,3	108,0	12625	10341	9213	11483	9777	10726
653	-	0,00247	0,00312	21,1	112,2	21145	17282	15792	19213	16537	18073
654	-	0,00333	0,00424	21,0	115,9	27915	23769	21990	25842	22880	24558
655	-	0,00416	0,00530	20,8	120,0	35114	31427	29386	33270	30406	31975
656	-	0,00500	0,00636	20,8	123,7	43849	40168	37762	42008	38965	40593
657	-	0,00192	0,00212	21,3	109,8	16201	12757	11797	14479	12277	13585
658	-	0,00302	0,00312	21,1	113,9	24313	19770	18288	22042	19029	20790
659	-	0,00412	0,00424	20,9	118,4	32681	27801	26027	30241	26914	28836
660	-	0,00535	0,00530	20,8	122,7	42546	37719	35666	40132	36692	38644
661	-	0,00133	0,00099	20,9	106,4	8784	7729	7318	8257	7524	7944

Tabela Z.2. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
662	-	0,00249	0,00212	20,8	110,4	18022	13737	12724	15879	13230	14828
663	-	0,00355	0,00312	20,6	114,6	26028	21079	19714	23553	20397	22274
664	-	0,00486	0,00424	20,4	119,9	35639	30318	28950	32978	29634	31636
665	-	0,00616	0,00531	20,3	124,7	45416	41816	39664	43616	40740	42298
666	-	0,00149	0,00100	20,8	107,9	11560	9581	7905	10570	8743	9682
667	-	0,00302	0,00212	20,9	112,5	22368	17392	15365	19880	16378	18375
668	-	0,00450	0,00312	20,7	117,8	31871	26443	25122	29157	25783	27812
669	-	0,00606	0,00424	20,6	122,8	42435	38096	36369	40265	37232	38966
670	-	0,00192	0,00100	20,9	107,9	12105	10289	8969	11197	9629	10454
671	-	0,00388	0,00212	20,7	113,8	24606	19594	18885	22100	19239	21028
672	-	0,00553	0,00312	20,6	120,4	36577	30724	30275	33651	30500	32525
673	-	0,00745	0,00424	20,5	125,7	45913	43176	42105	44545	42640	43731
674	-	0,00225	0,00100	20,9	108,7	14289	11381	10179	12835	10780	11950
675	-	0,00456	0,00212	20,7	116,1	28803	23225	22583	26014	22904	24870
676	-	0,00678	0,00312	20,5	122,0	40684	35223	35018	37954	35121	36975
677	-	0,00252	0,00100	20,9	109,5	15990	12812	11783	14401	12297	13528
678	-	0,00553	0,00212	20,7	117,6	31346	25468	25810	28407	25639	27541
679	-	0,00858	0,00313	20,5	125,9	45917	42463	43944	44190	43203	44108
680	-	0,00354	0,00100	21,2	111,5	20071	15951	15452	18011	15702	17158
681	-	0,00744	0,00212	20,8	121,1	38270	33323	34764	35797	34043	35452
682	-	0,00466	0,00100	21,2	113,5	23680	18480	18640	21080	18560	20267
683	-	0,01024	0,00212	20,8	126,0	45495	42376	45025	43936	43700	44299
684	-	0,00650	0,00100	20,7	116,0	29128	24745	25797	26937	25271	26557

Tabela Z.3.

Dane pomiarowe dla piany Ni20

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
1	-	0,01770	-	27,0	143,0	26498	25211	28331	25854	26771	26680
2	-	0,01692	-	27,0	141,9	24316	24062	25318	24189	24690	24565
3	-	0,01604	-	26,9	141,0	22698	22835	22588	22767	22712	22707
4	-	0,01504	-	28,2	139,6	20268	20717	20439	20492	20578	20475
5	-	0,01428	-	28,2	138,9	18547	19194	19114	18870	19154	18952
6	-	0,01335	-	28,3	138,4	17539	18576	18919	18058	18748	18345
7	-	0,01252	-	28,2	136,7	14802	14084	14837	14443	14461	14574
8	-	0,01144	-	28,3	135,9	13159	12845	13816	13002	13331	13274
9	-	0,00974	-	28,2	136,3	11443	10944	12382	11194	11663	11590
10	-	0,00890	-	28,2	135,5	9171	8708	8831	8939	8769	8903
11	-	0,00848	-	28,2	134,7	7811	7287	7489	7549	7388	7529
12	-	0,00691	-	28,3	133,8	5973	5594	5840	5783	5717	5802
13	-	0,00694	-	28,2	133,6	5595	5244	5501	5420	5372	5447
14	-	0,00544	-	27,0	133,0	5053	3975	4480	4514	4228	4503
15	-	0,01728	-	27,0	136,6	25385	22489	23120	23937	22805	23665
16	-	0,01638	-	26,9	135,5	22133	19684	20457	20908	20071	20758
17	-	0,01522	-	26,8	134,9	20791	18949	19864	19870	19406	19868
18	-	0,01456	-	26,8	135,1	20011	18531	18441	19271	18486	18994
19	-	0,01435	-	26,8	134,3	21273	20521	20465	20897	20493	20753
20	-	0,01365	-	26,8	133,7	19808	19223	19566	19516	19394	19532
21	-	0,01216	-	26,7	135,9	14897	13848	13938	14373	13893	14228
22	-	0,01086	-	26,7	136,3	13787	12038	12215	12913	12127	12680
23	-	0,01065	-	26,6	136,2	13094	11992	12090	12543	12041	12392
24	-	0,00923	-	26,6	135,0	10829	9749	10129	10289	9939	10236
25	-	0,00818	-	26,6	134,1	9024	8256	8624	8640	8440	8634
26	-	0,00734	-	26,6	133,4	7606	6938	7325	7272	7131	7290
27	-	0,00657	-	26,6	132,8	6427	5829	6262	6128	6045	6173
28	-	0,00584	-	26,5	132,2	5281	4782	5142	5031	4962	5068
29	-	0,00548	-	26,5	131,9	4791	4331	4766	4561	4549	4629
30	-	0,00459	-	26,5	131,2	3601	3218	3564	3410	3391	3461
31	-	0,00425	-	26,5	131,0	3131	2795	3170	2963	2982	3032
32	-	0,00365	-	26,4	130,7	2540	2221	2543	2381	2382	2435
36	-	0,02122	-	23,5	148,1	33568	-	-	36060	-	37496
37	-	0,01971	-	23,8	144,1	29010	27300	29517	28155	28409	28609
38	-	0,01966	-	24,3	144,0	28785	27205	29401	27995	28303	28464
39	-	0,01852	-	24,2	142,5	25711	24429	26791	25070	25610	25644
40	-	0,01757	-	24,1	141,5	23651	22556	25089	23103	23822	23765
41	-	0,01573	-	24,0	139,1	18930	18151	20438	18541	19294	19173
42	-	0,01536	-	23,9	138,9	18236	17569	20061	17902	18815	18622
43	-	0,01485	-	23,8	138,4	17191	16645	19180	16918	17913	17672
44	-	0,01877	-	23,8	142,5	28602	29220	27731	28911	28476	28518
45	-	0,01868	-	23,5	140,6	27501	28341	29431	27921	28886	28425

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
46	-	0,01777	-	23,5	144,1	24841	26503	28567	25672	27535	26637
47	-	0,01695	-	23,7	143,0	22669	24422	26611	23546	25517	24567
48	-	0,01641	-	23,7	142,4	21373	23274	25789	22324	24531	23479
49	-	0,01544	-	23,8	141,3	19275	21182	23630	20229	22406	21362
50	-	0,01399	-	23,9	139,8	16132	18654	21548	17393	20101	18778
51	-	0,01316	-	24,0	139,1	14634	17231	20156	15932	18693	17340
52	-	0,01436	-	24,1	140,9	19191	19808	22252	19500	21030	20417
53	-	0,01200	-	25,2	138,0	13871	15542	16043	14707	15793	15152
54	-	0,01156	-	25,2	137,7	13090	14449	16528	13770	15489	14689
55	-	0,01021	-	25,2	136,9	10975	13094	15429	12034	14261	13166
56	-	0,00947	-	25,2	136,1	10078	11627	13556	10853	12592	11754
57	-	0,00848	-	25,2	134,7	8332	9845	10365	9089	10105	9514
58	-	0,00718	-	25,2	133,7	7200	7651	8282	7426	7966	7711
59	-	0,00600	-	25,1	133,1	5207	5941	6594	5574	6267	5914
60	-	0,00548	-	25,1	132,7	4896	5027	5620	4961	5324	5181
61	-	0,00452	-	25,0	132,2	3769	3670	4124	3719	3897	3854
62	-	0,00382	-	25,0	132,6	2281	2951	3188	2616	3070	2807
63	-	0,00268	-	24,9	132,1	1271	1733	1855	1502	1794	1619
64	-	0,00210	-	24,9	131,8	896	1228	1295	1062	1262	1140
65	-	0,00181	-	24,8	131,7	-	1014	1023	847	1018	905
66	-	0,00133	-	24,7	131,4	-	679	646	523	662	564
67	-	-	0,02030	18,4	154,0	45927	43435	45618	44681	44527	44993
68	-	-	0,01930	18,6	152,9	43573	40721	42999	42147	41860	42431
69	-	-	0,01817	18,6	151,5	41202	38601	40751	39901	39676	40185
70	-	-	0,01717	18,9	150,9	38300	35787	38118	37044	36953	37402
71	-	-	0,01603	19,0	148,5	34138	31943	34052	33041	32997	33378
72	-	-	0,01504	19,0	147,6	30852	28999	30796	29925	29897	30215
73	-	-	0,01390	19,1	145,2	28011	26383	27997	27197	27190	27464
74	-	-	0,01291	19,1	144,2	26142	24655	26218	25399	25437	25672
75	-	-	0,01291	19,2	143,3	24643	23222	24719	23932	23970	24194
76	-	-	0,01177	19,2	142,9	23853	22474	23871	23164	23173	23400
77	-	-	0,01078	19,3	141,3	20965	19753	20999	20359	20376	20572
78	-	-	0,00965	19,3	140,2	18947	17848	18940	18398	18394	18578
79	-	-	0,00856	19,3	139,2	17070	16135	17150	16603	16643	16785
80	-	-	0,00751	19,3	137,9	14721	13950	14829	14335	14389	14500
81	-	-	0,00638	19,4	136,1	11600	11005	11756	11303	11381	11454
82	-	-	0,00533	19,5	135,4	10241	9737	10430	9989	10083	10136
83	-	-	0,00425	19,5	134,8	7618	-	7832	7438	7545	7569
84	-	-	0,00313	19,6	134,3	6663	6619	6824	6641	6721	6702
85	-	-	0,00213	19,7	133,0	4745	4444	4336	4594	4390	4508
86	-	-	0,00099	19,8	132,3	3500	3159	3070	3330	3115	3243

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
87	-	-	0,01980	19,8	151,9	43544	40743	43344	42144	42044	42544
88	-	-	0,01928	19,9	151,0	41751	39125	41594	40438	40360	40823
89	-	-	0,01815	20,0	149,5	38933	36467	38849	37700	37658	38083
90	-	-	0,01715	20,0	148,5	37147	34772	37131	35959	35952	36350
91	-	-	0,01602	20,0	146,1	32717	30672	32796	31695	31734	32062
92	-	-	0,01503	20,1	145,5	31694	29704	31867	30699	30785	31088
93	-	-	0,01389	20,2	144,2	29287	27499	29459	28393	28479	28748
94	-	-	0,01289	20,3	142,1	25485	23899	25759	24692	24829	25048
95	-	-	0,01176	20,3	140,4	22557	21208	22755	21882	21981	22173
96	-	-	0,01077	20,3	138,8	19843	18607	19962	19225	19284	19471
97	-	-	0,00964	20,4	139,4	17474	16401	17580	16938	16990	17152
98	-	-	0,00801	20,5	137,9	14719	13860	14889	14289	14374	14489
99	-	-	0,00638	20,5	136,9	12928	12056	13340	12492	12698	12775
100	-	-	0,00532	20,5	135,1	10402	8995	9686	9699	9341	9694
101	-	-	0,00425	20,6	135,8	10510	9689	9979	-	9834	10059
102	-	-	0,00314	20,6	133,9	7127	6750	7348	6938	7049	7075
103	-	-	0,00213	20,7	132,7	5513	4915	5059	5214	4987	5162
104	-	-	0,01926	20,7	153,8	43694	40856	43410	42275	42133	42653
105	-	-	0,01814	20,7	152,0	40491	37896	40255	39194	39076	39548
106	-	-	0,01714	20,7	150,2	37160	34755	37065	35958	35910	36327
107	-	-	0,01601	20,8	148,9	34850	32656	34862	33753	33759	34123
108	-	-	0,01501	20,8	147,0	31477	29459	31544	30468	30502	30827
109	-	-	0,01388	20,8	145,2	28255	26524	28383	27390	27454	27721
110	-	-	0,01289	20,7	144,3	26615	24965	26723	25790	25844	26101
111	-	-	0,01176	20,7	142,1	22853	21435	23047	22144	22241	22445
112	-	-	0,01076	20,6	141,3	21333	19984	21502	20658	20743	20940
113	-	-	0,00964	20,7	139,4	18055	16920	18301	17488	17611	17759
114	-	-	0,00749	20,6	137,6	14860	13986	15409	14423	14698	14752
115	-	-	0,00638	20,7	136,1	12237	11543	12769	11890	12156	12183
116	-	-	0,00532	20,6	135,5	10908	10519	11929	10713	11224	11119
117	-	-	0,00425	20,6	135,3	8531	8136	8754	8334	8445	8474
118	-	-	0,00312	20,5	134,4	6890	6514	7115	6702	6815	6840
119	-	-	0,00213	20,5	133,8	6489	5279	6221	5884	5750	5996
120	-	-	0,02026	20,6	154,4	44911	41846	44255	43378	43050	43670
121	-	-	0,01927	20,6	154,0	44151	41137	43493	42644	42315	42927
122	-	-	0,01814	20,7	152,8	41857	38973	41241	40415	40107	40690
123	-	-	0,01714	20,7	150,9	38243	35553	37720	36898	36636	37172
124	-	-	0,01601	20,7	148,3	33475	31191	33086	32333	32138	32584
125	-	-	0,01501	20,7	146,9	30906	28735	30624	29820	29679	30088
126	-	-	0,01389	20,7	146,2	29720	27667	29383	28693	28525	28923
127	-	-	0,01289	20,7	144,6	26799	24936	26538	25867	25737	26091
128	-	-	0,01176	20,6	143,0	23736	22066	23466	22901	22766	23089
129	-	-	0,01076	20,6	141,5	21093	19592	20871	20343	20232	20519

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
130	-	-	0,00964	20,6	140,5	19376	17937	19152	18656	18545	18822
131	-	-	0,00856	20,5	138,5	15896	14715	15728	15306	15221	15446
132	-	-	0,00859	20,3	138,9	15777	14777	15817	15277	15297	15457
133	-	-	0,00749	20,3	137,7	13637	12828	13801	13233	13314	13422
134	-	-	0,00638	20,3	137,0	12343	11599	12495	11971	12047	12146
135	-	-	0,00533	20,4	135,4	9649	9101	9761	9375	9431	9504
136	-	-	0,00425	20,4	135,1	7482	7857	9176	7670	8516	8172
137	-	-	0,00312	20,3	134,2	5990	6192	7443	6091	6818	6542
138	-	-	0,00213	20,3	133,2	4110	4703	5289	4406	4996	4701
139	-	-	0,00099	20,2	132,4	3109	3503	3509	3306	3506	3374
140	0,00004	-	-	17,9	130,3	-	288	-	-	-	-
141	0,00006	-	-	18,4	130,3	381	376	342	378	359	366
142	0,00007	-	-	18,8	130,5	552	518	491	535	504	520
143	0,00011	-	-	18,9	130,6	972	900	887	936	893	920
144	0,00012	-	-	19,0	130,8	1203	1123	1128	1163	1126	1151
145	0,00014	-	-	19,1	130,9	1442	1356	1419	1399	1387	1406
146	0,00015	-	-	19,3	131,1	1716	1641	1719	1678	1680	1692
147	0,00017	-	-	19,4	131,3	2061	1959	2003	2010	1981	2007
148	0,00019	-	-	19,5	131,4	2385	2225	2269	2305	2247	2293
149	0,00020	-	-	19,6	131,6	2747	2588	2649	2667	2618	2661
150	0,00022	-	-	19,7	131,9	3159	2993	3098	3076	3045	3083
151	0,00024	-	-	19,7	132,1	3563	3376	3453	3469	3414	3464
152	0,00025	-	-	19,8	132,3	3993	3765	3811	3879	3788	3856
153	0,00027	-	-	19,9	132,5	4351	4143	4230	4247	4186	4241
154	0,00029	-	-	20,0	132,7	4754	4536	4665	4645	4601	4652
155	0,00030	-	-	20,0	133,0	5225	4951	5073	5088	5012	5083
156	0,00032	-	-	20,1	133,2	5688	5333	5487	5510	5410	5503
157	0,00034	-	-	20,2	133,5	6200	5853	6060	6027	5957	6038
158	0,00036	-	-	20,2	133,8	6802	6433	6581	6617	6507	6605
159	0,00037	-	-	20,3	134,1	7327	6953	7115	7140	7034	7132
160	0,00039	-	-	20,4	134,5	7883	7492	7735	7688	7613	7703
161	0,00041	-	-	20,4	134,8	8462	8018	8239	8240	8128	8240
162	0,00043	-	-	20,5	135,1	9053	8584	8891	8819	8738	8843
163	0,00045	-	-	20,6	135,5	9760	9298	9561	9529	9430	9540
164	0,00046	-	-	20,7	135,8	10356	9884	10190	10120	10037	10143
165	0,00048	-	-	20,7	136,2	11016	10537	10859	10776	10698	10804
166	0,00050	-	-	20,8	136,6	11741	11202	11506	11471	11354	11483
167	0,00052	-	-	20,9	137,0	12506	11987	12408	12247	12198	12300
168	0,00054	-	-	20,9	137,4	13212	12670	13061	12941	12865	12981
169	0,00056	-	-	20,9	137,9	14069	13526	13970	13798	13748	13855
170	0,00058	-	-	21,0	138,3	14822	14264	14720	14543	14492	14602
171	0,00060	-	-	21,0	138,9	15707	15121	15644	15414	15382	15491
172	0,00062	-	-	21,1	139,4	16584	16005	16610	16294	16307	16399

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{ol}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
173	0,00064	-	-	21,1	139,9	17519	16841	17470	17180	17156	17277
174	0,00066	-	-	21,2	140,4	18310	17650	18425	17980	18037	18128
175	0,00068	-	-	21,2	140,9	19404	18700	19541	19052	19121	19215
176	0,00070	-	-	21,2	141,5	20490	19767	20620	20129	20194	20292
177	0,00072	-	-	21,3	142,1	21319	20640	21609	20980	21125	21189
178	0,00074	-	-	21,3	142,7	22499	21797	22893	22148	22345	22396
179	0,00077	-	-	21,4	143,5	23871	23153	24428	23512	23790	23817
180	0,00004	-	-	21,9	130,3	249	273	228	261	250	250
181	0,00006	-	-	21,9	130,3	369	384	328	377	356	360
182	0,00007	-	-	21,9	130,4	557	534	467	546	500	519
183	0,00009	-	-	21,9	130,5	717	674	640	695	657	677
184	0,00010	-	-	22,0	130,6	962	904	861	933	883	909
185	0,00030	-	-	22,4	132,7	-	-	4653	4619	4581	-
186	0,00032	-	-	22,4	133,0	5188	4951	5016	5070	4984	5052
187	0,00034	-	-	22,4	133,2	5679	5399	5513	5539	5456	5530
188	0,00035	-	-	22,4	133,5	6172	5877	6056	6024	5967	6035
189	0,00037	-	-	22,5	133,8	6716	6375	6518	6546	6446	6536
190	0,00039	-	-	22,5	134,2	7353	7011	7153	7182	7082	7173
191	0,00041	-	-	22,5	134,4	7848	7483	7709	7665	7596	7680
192	0,00042	-	-	22,5	134,8	8506	8061	8249	8283	8155	8272
193	0,00044	-	-	22,6	135,1	9077	8659	8919	8868	8789	8885
194	0,00046	-	-	22,6	135,5	9777	9325	9585	9551	9455	9562
195	0,00048	-	-	22,6	135,8	10368	9893	10184	10131	10038	10148
196	0,00050	-	-	22,6	136,2	11079	10590	10923	10834	10757	10864
197	0,00052	-	-	22,7	136,6	11742	11225	11561	11484	11393	11509
198	0,00053	-	-	22,7	137,1	12578	12048	12469	12313	12258	12365
199	0,00055	-	-	22,7	137,4	13268	12724	13128	12996	12926	13040
200	0,00057	-	-	22,8	137,9	14048	13503	13952	13775	13727	13834
201	0,00059	-	-	22,8	138,4	14907	14332	14815	14619	14573	14684
202	0,00061	-	-	22,8	138,9	15780	15192	15720	15486	15456	15564
203	0,00063	-	-	22,8	139,4	16639	16033	16664	16336	16348	16445
204	0,00065	-	-	22,9	139,9	17552	16892	17509	17222	17201	17318
205	0,00067	-	-	22,9	140,4	18514	17807	18579	18160	18193	18300
206	0,00069	-	-	22,9	141,0	19553	18884	19704	19219	19294	19380
207	0,00072	-	-	22,9	141,7	20735	20029	20942	20382	20486	20569
208	0,00074	-	-	22,9	142,2	21633	20947	21906	21290	21426	21495
209	0,00076	-	-	22,9	143,0	22923	22268	23341	22596	22804	22844
210	0,00004	0,00221	-	21,5	131,7	2546	2369	2498	2458	2434	2471
211	0,00004	0,00381	-	22,2	132,9	4637	3943	4673	4290	4308	4417
212	0,00004	0,00612	-	23,2	136,2	10387	9140	9907	9764	9524	9811
213	0,00004	0,00757	-	23,7	138,0	13813	13521	13027	13667	13274	13454
214	0,00004	0,00866	-	23,9	139,1	15464	15252	15169	15358	15211	15295
215	0,00004	0,00959	-	24,3	139,9	17824	17000	17314	17412	17157	17379

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
216	0,00004	0,00990	-	24,5	140,8	19445	18484	18425	18965	18455	18785
217	0,00004	0,01077	-	24,7	142,3	22116	21661	21506	21889	21584	21761
218	0,00004	0,01159	-	24,9	143,1	23091	22321	22650	22706	22486	22687
219	0,00005	0,01250	-	25,1	145,3	27662	26372	27597	27017	26985	27210
220	0,00005	0,01341	-	25,3	146,6	29986	28244	29903	29115	29074	29378
221	0,00005	0,01413	-	25,5	148,7	33392	31777	34508	32585	33142	33226
222	0,00005	0,01484	-	25,7	149,9	35594	32534	35275	34064	33905	34468
223	0,00005	0,01593	-	25,8	151,5	39056	35549	38477	37303	37013	37694
224	0,00005	0,01656	-	25,9	152,3	40832	38008	40371	39420	39189	39737
225	0,00005	0,01743	-	26,0	153,1	43164	38551	42871	40857	40711	41529
226	0,00006	0,00351	-	26,4	132,3	3298	3261	3407	3279	3334	3322
227	0,00006	0,00447	-	25,8	133,6	5207	5591	6916	5399	6253	5904
228	0,00006	0,00500	-	27,1	135,4	7494	7559	9430	7527	8495	8161
229	0,00006	0,00580	-	28,0	136,0	8115	8664	11228	8390	9946	9336
230	0,00006	0,00668	-	27,9	137,4	11602	10950	13877	11276	12414	12143
231	0,00006	0,00717	-	27,8	138,3	12429	12717	16001	12573	14359	13716
232	0,00006	0,00757	-	27,8	139,3	14283	14603	17671	14443	16137	15519
233	0,00006	0,00836	-	27,6	140,3	16275	16914	18535	16595	17724	17241
234	0,00006	0,00881	-	27,5	140,8	18169	17803	19461	17986	18632	18478
235	0,00006	0,00906	-	27,4	141,2	18541	18482	19817	18512	19149	18947
236	0,00006	0,00968	-	27,3	142,1	20798	20548	21507	20673	21027	20951
237	0,00006	0,01003	-	27,3	142,8	22826	21902	22121	22364	22012	22283
238	0,00006	0,01061	-	27,1	144,7	25028	24428	25822	24728	25125	25093
239	0,00006	0,01167	-	27,1	147,2	29811	27944	30395	28877	29169	29383
240	0,00006	0,01259	-	27,1	148,2	31734	29723	31655	30729	30689	31037
241	0,00007	0,01333	-	27,1	149,9	34094	31785	34566	32940	33176	33482
242	0,00007	0,01418	-	26,9	151,8	36958	34163	37300	35560	35732	36140
243	0,00007	0,01474	-	27,0	153,2	38793	35621	39178	37207	37399	37864
244	0,00007	0,01588	-	27,0	154,8	44490	40970	43945	42730	42457	43135
245	0,00007	0,00431	-	26,9	133,2	4785	4921	4783	4853	4852	4830
246	0,00007	0,00494	-	26,8	135,7	7888	8155	10602	8022	9378	8882
247	0,00007	0,00595	-	26,8	137,1	10259	11058	13600	10659	12329	11639
248	0,00007	0,00672	-	25,4	139,2	13951	14436	16705	14193	15571	15031
249	0,00007	0,00761	-	25,7	140,6	16355	16790	19914	16573	18352	17686
250	0,00007	0,00862	-	26,1	141,7	19702	19564	20300	19633	19932	19855
251	0,00007	0,00929	-	26,4	143,0	21505	21627	23080	21566	22354	22071
252	0,00007	0,01013	-	26,6	144,7	24795	24441	25293	24618	24867	24843
253	0,00007	0,01072	-	26,6	145,5	26257	24747	26571	25502	25659	25859
254	0,00008	0,01129	-	26,6	147,2	27865	26725	28423	27295	27574	27671
255	0,00008	0,01170	-	26,8	147,7	29044	28054	29276	28549	28665	28791
256	0,00008	0,01257	-	26,8	150,0	32388	30552	33167	31470	31859	32036
257	0,00008	0,01304	-	26,8	150,1	34130	32258	34209	33194	33234	33532
258	0,00008	0,01331	-	26,7	150,8	34456	31441	34304	32949	32873	33400

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
259	0,00008	0,01366	-	26,8	152,8	36139	33133	36087	34636	34610	35120
260	0,00008	0,01414	-	26,8	153,6	38089	34779	38338	36434	36558	37069
261	0,00008	0,01462	-	26,8	155,4	38982	35297	40129	37139	37713	38136
262	0,00008	0,01480	-	26,7	155,6	39305	37148	40526	38226	38837	38993
263	0,00008	0,01623	-	26,8	158,6	43332	39827	45029	41580	42428	42729
264	0,00008	0,01646	-	26,8	159,0	44136	40492	45192	42314	42842	43273
265	0,00008	0,00346	-	26,9	133,4	4929	5172	5416	5050	5294	5172
266	0,00009	0,00486	-	26,9	136,9	9979	10679	12212	10329	11445	10957
267	0,00009	0,00584	-	26,8	138,4	12320	13371	15516	12846	14444	13736
268	0,00009	0,00623	-	26,8	139,5	14055	15278	17890	14667	16584	15741
269	0,00009	0,00698	-	26,9	140,4	15861	17101	19517	16481	18309	17493
270	0,00009	0,00773	-	26,9	141,7	18928	19530	20506	19229	20018	19655
271	0,00009	0,00774	-	25,4	142,3	18724	19422	22090	19073	20756	20079
272	0,00009	0,00844	-	26,3	143,1	21212	21404	22254	21308	21829	21624
273	0,00009	0,00867	-	26,7	143,8	21947	21927	24231	21937	23079	22702
274	0,00009	0,00903	-	26,8	144,5	23286	23377	24972	23331	24175	23878
275	0,00009	0,00969	-	27,1	146,1	24973	24928	26759	24951	25844	25553
276	0,00009	0,01027	-	27,2	147,1	28061	27435	27745	27748	27590	27747
277	0,00009	0,01104	-	27,3	148,4	27302	27032	29892	27167	28462	28075
278	0,00009	0,01128	-	27,5	149,1	28999	28474	30604	28736	29539	29359
279	0,00010	0,01191	-	27,6	149,9	30927	28809	31082	29868	29946	30273
280	0,00010	0,01211	-	27,7	150,9	32579	30969	33050	31774	32010	32199
281	0,00010	0,01261	-	27,7	152,1	34208	32521	34423	33365	33472	33717
282	0,00010	0,01312	-	27,8	152,9	35459	32343	35119	33901	33731	34307
283	0,00010	0,01358	-	27,9	153,6	36792	34555	37536	35673	36045	36294
284	0,00010	0,01406	-	28,0	155,0	38162	35284	39290	36723	37287	37579
285	0,00010	0,01448	-	28,0	156,7	38684	36124	39646	37404	37885	38151
286	0,00010	0,01513	-	28,0	159,1	40605	38880	41836	39743	40358	40440
287	0,00010	0,01553	-	27,1	159,7	41281	39046	42487	40163	40767	40938
288	0,00010	0,01581	-	27,1	160,4	42779	38887	42851	40833	40869	41506
289	0,00010	0,01633	-	27,0	161,0	43253	39966	44838	41610	42402	42686
290	0,00011	0,00249	-	26,9	132,7	3940	3603	3553	3772	3578	3699
291	0,00011	0,00325	-	26,9	133,4	5262	4488	4966	4875	4727	4906
292	0,00011	0,00441	-	26,8	133,8	5797	5343	5518	5570	5430	5553
293	0,00011	0,00509	-	26,8	138,4	10456	13277	15314	11867	14296	13016
294	0,00011	0,00619	-	26,7	140,6	15206	16887	19056	16047	17972	17050
295	0,00011	0,00677	-	26,6	142,3	17600	18014	21775	17807	19894	19130
296	0,00012	0,00752	-	26,5	143,7	19706	20540	23746	20123	22143	21331
297	0,00012	0,00814	-	25,2	144,8	20492	21429	25475	20961	23452	22465
298	0,00012	0,00859	-	25,5	146,2	23072	22641	26760	22857	24701	24158
299	0,00012	0,00905	-	25,7	147,3	24807	24907	28175	24857	26541	25963
300	0,00012	0,00951	-	25,9	148,7	26556	25969	27750	26262	26860	26758
301	0,00012	0,01017	-	25,8	149,8	28876	27372	29924	28124	28648	28724

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
302	0,00012	0,01026	-	25,8	149,9	26599	26936	30532	26768	28734	28023
303	0,00012	0,01073	-	25,8	152,3	30247	30592	33820	30419	32206	31553
304	0,00013	0,01114	-	25,8	152,8	31267	30843	32942	31055	31893	31684
305	0,00013	0,01176	-	25,7	154,0	31391	32657	35014	32024	33835	33021
306	0,00013	0,01246	-	25,7	156,2	33633	33810	36847	33721	35328	34763
307	0,00013	0,01357	-	25,7	158,9	36976	37346	40140	37161	38743	38154
308	0,00013	0,01399	-	25,6	159,8	36118	36965	39908	36541	38437	37664
309	0,00014	0,01539	-	25,6	164,4	38839	38666	42579	38752	40623	40028
310	0,00014	0,01557	-	25,5	164,8	40174	39576	43817	39875	41697	41189
311	0,00014	0,01665	-	25,5	166,5	42015	41663	45418	41839	43540	43032
312	0,00014	0,00176	-	25,5	132,5	4266	3751	3516	4008	3633	3844
313	0,00014	0,00263	-	25,4	133,2	4969	4456	4425	4712	4440	4617
314	0,00014	0,00340	-	25,4	133,6	5445	5099	5139	5272	5119	5227
315	0,00014	0,00414	-	25,3	134,9	7977	7152	7561	7564	7357	7563
316	0,00015	0,00493	-	25,3	140,3	13358	14764	17429	14061	16096	15184
317	0,00015	0,00605	-	25,3	143,7	18378	20259	24335	19319	22297	20991
318	0,00015	0,00691	-	25,2	146,3	22655	23413	26341	23034	24877	24136
319	0,00016	0,00754	-	26,8	147,2	23602	24663	28771	24132	26717	25679
320	0,00016	0,00841	-	26,2	149,4	24029	25859	30654	24944	28257	26847
321	0,00016	0,00901	-	26,3	150,7	27408	28428	32127	27918	30278	29321
322	0,00016	0,00944	-	26,4	151,9	28842	30171	32984	29506	31578	30666
323	0,00016	0,00983	-	26,4	153,7	30367	31077	35237	30722	33157	32227
324	0,00017	0,00997	-	26,5	154,3	32097	32018	35586	32057	33802	33234
325	0,00017	0,01070	-	26,5	155,5	32644	32989	35589	32817	34289	33741
326	0,00017	0,01095	-	26,5	157,1	34310	34832	37077	34571	35955	35407
327	0,00017	0,01120	-	26,5	158,2	34790	35464	37556	35127	36510	35937
328	0,00017	0,01147	-	26,5	158,7	34696	35332	38418	35014	36875	36149
329	0,00018	0,01242	-	26,5	161,8	39825	40306	41255	40065	40781	40462
330	0,00018	0,01310	-	26,5	162,6	37693	38665	40959	38179	39812	39106
331	0,00018	0,01404	-	26,5	165,0	38547	39442	42807	38995	41124	40265
332	0,00018	0,01527	-	26,5	168,1	40497	41853	44038	41175	42946	42130
333	0,00016	0,00133	-	26,5	133,6	5944	5438	5295	5691	5367	5559
334	0,00017	0,00330	-	26,5	136,3	10695	9694	10107	10194	9901	10165
335	0,00017	0,00481	-	26,5	136,8	11773	10165	10896	10969	10530	10945
336	0,00018	0,00561	-	26,5	143,6	19218	21596	24197	20407	22896	21670
337	0,00018	0,00622	-	26,4	145,1	20333	21932	25736	21133	23834	22667
338	0,00019	0,00694	-	26,4	147,8	25271	26891	30123	26081	28507	27429
339	0,00019	0,00733	-	27,6	149,5	26030	27713	31066	26871	29389	28270
340	0,00019	0,00750	-	27,6	149,8	26699	27093	30548	26896	28820	28113
341	0,00019	0,00786	-	24,8	149,8	25406	28160	31284	26783	29722	28283
342	0,00019	0,00824	-	25,7	152,4	30426	31256	33868	30841	32562	31850
343	0,00020	0,00858	-	26,4	153,3	29423	31685	35122	30554	33404	32077
344	0,00020	0,00899	-	26,3	153,6	29592	31237	35062	30415	33150	31964

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
345	0,00020	0,00918	-	26,1	154,3	30900	32186	36214	31543	34200	33100
346	0,00020	0,00947	-	25,9	155,4	33160	34305	36894	33732	35599	34786
347	0,00020	0,00994	-	25,7	157,4	32104	34662	38003	33383	36332	34923
348	0,00020	0,00961	-	25,6	155,9	30439	33287	37430	31863	35359	33719
349	0,00021	0,01080	-	25,5	159,8	34265	37419	39289	35842	38354	36991
350	0,00021	0,01133	-	25,4	163,2	37379	39538	40731	38459	40135	39216
351	0,00021	0,01187	-	25,3	163,4	38025	39901	41200	38963	40551	39709
352	0,00021	0,01214	-	25,1	164,1	37358	39648	40974	38503	40311	39326
353	0,00022	0,01241	-	25,1	167,1	41973	42934	43021	42454	42978	42643
354	0,00023	0,01403	-	25,0	174,7	45064	45690	45557	45377	45623	45437
355	0,00020	0,00181	-	24,8	134,3	7651	6393	6282	7022	6337	6775
356	0,00020	0,00270	-	24,8	134,6	8081	6475	6459	7278	6467	7005
357	0,00021	0,00332	-	24,7	135,5	9148	8006	8272	8577	8139	8475
358	0,00021	0,00408	-	24,6	135,8	9699	8455	8670	9077	8563	8941
359	0,00021	0,00495	-	24,5	136,9	11638	10181	10652	10909	10416	10824
360	0,00023	0,00594	-	24,5	149,2	26807	28782	32165	27795	30474	29251
361	0,00024	0,00695	-	24,4	151,5	28098	30690	34930	29394	32810	31239
362	0,00024	0,00734	-	24,4	152,7	30436	31056	34436	30746	32746	31976
363	0,00024	0,00803	-	26,8	155,5	34538	36067	38147	35303	37107	36251
364	0,00025	0,00870	-	26,9	158,9	38083	38178	39630	38130	38904	38630
365	0,00025	0,00896	-	27,5	160,6	39119	39128	40880	39124	40004	39709
366	0,00025	0,00920	-	27,8	161,4	39861	40247	41005	40054	40626	40371
367	0,00026	0,00969	-	28,0	164,2	42028	42204	42755	42116	42479	42329
368	0,00026	0,01043	-	28,1	165,4	42179	42393	42546	42286	42470	42373
369	0,00027	0,01083	-	28,2	168,0	44111	43613	43685	43862	43649	43803
370	0,00027	0,01149	-	28,3	170,6	45366	44702	45243	45034	44973	45104
371	0,00025	0,00169	-	28,3	134,8	8430	7366	7306	7898	7336	7701
372	0,00025	0,00234	-	28,4	135,1	8513	7629	7856	8071	7742	7999
373	0,00025	0,00353	-	28,5	136,3	10256	9835	10188	10045	10012	10093
374	0,00028	0,00483	-	28,5	147,9	22971	33573	35381	28272	34477	30642
375	0,00028	0,00531	-	28,6	149,8	23360	39094	39253	31227	39173	33902
376	0,00029	0,00589	-	28,6	152,7	32621	34003	36837	33312	35420	34487
377	0,00029	0,00658	-	28,6	155,4	35319	36388	38268	35853	37328	36658
378	0,00029	0,00710	-	28,6	155,6	33768	35262	38217	34515	36739	35749
379	0,00030	0,00740	-	25,6	157,2	37418	37786	40034	37602	38910	38412
380	0,00031	0,00786	-	26,5	160,0	39497	41072	42016	40285	41544	40862
381	0,00031	0,00871	-	27,1	162,5	39894	41175	42290	40535	41733	41120
382	0,00031	0,00901	-	27,6	163,7	41769	42318	43184	42043	42751	42423
383	0,00031	0,00925	-	27,7	163,7	41549	43110	43042	42330	43076	42567
384	0,00034	0,00166	-	27,7	137,1	12671	11517	11114	12094	11315	11767
385	0,00036	0,00310	-	27,8	145,1	20263	29760	31905	25012	30832	27309
386	0,00036	0,00354	-	27,9	144,5	18349	20771	35559	19560	28165	24893
387	0,00037	0,00366	-	27,9	147,7	21178	35122	37098	28150	36110	31133

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
388	0,00038	0,00405	-	27,9	151,2	36822	37131	37634	36977	37383	37196
389	0,00038	0,00472	-	27,9	152,9	34895	35117	37420	35006	36269	35811
390	0,00040	0,00542	-	27,9	157,7	39340	39204	41197	39272	40200	39914
391	0,00041	0,00635	-	28,0	161,2	42839	41692	43760	42266	42726	42764
392	0,00042	0,00670	-	26,6	162,9	44339	43387	44332	43863	43859	44019
393	0,00044	0,00149	-	27,3	140,6	18746	16631	19427	17689	18029	18268
394	0,00044	0,00199	-	27,6	140,9	18882	17424	20033	18153	18728	18779
395	0,00045	0,00240	-	27,7	142,4	20528	21542	22899	21035	22221	21656
396	0,00045	0,00248	-	27,8	142,3	20318	21974	22424	21146	22199	21572
397	0,00047	0,00266	-	27,9	148,2	28778	34383	35814	31580	35098	32991
398	0,00048	0,00308	-	27,9	150,4	33131	37683	39530	35407	38607	36781
399	0,00049	0,00337	-	27,9	153,5	43144	40706	42423	41925	41565	42091
400	0,00050	0,00372	-	27,9	155,5	45908	43365	44896	44637	44131	44723
401	0,00055	0,00166	-	21,5	145,1	26578	25042	27877	25810	26460	26499
402	0,00056	0,00194	-	22,7	148,1	27334	33396	36634	30365	35015	32455
403	0,00057	0,00226	-	23,5	150,1	32161	37352	39479	34756	38416	36331
404	0,00058	0,00238	-	24,2	151,6	37322	38991	41674	38156	40333	39329
405	0,00059	0,00282	-	24,8	154,8	45393	42652	44929	44022	43790	44325
406	0,00065	0,00133	-	25,2	148,1	30542	31084	34811	30813	32948	32146
407	0,00066	0,00164	-	25,7	150,2	32558	36416	40149	34487	38283	36375
408	0,00068	0,00200	-	26,1	153,8	42771	41399	44258	42085	42829	42809
409	0,00069	0,00225	-	25,5	154,9	44624	43410	45618	44017	44514	44551
410	0,00078	0,00133	-	25,8	153,2	39365	40831	44556	40098	42693	41584
411	0,00078	0,00149	-	26,2	154,2	41579	42589	45618	42084	44104	43262
412	0,00004	-	0,00161	22,2	137,5	11750	13259	14197	12504	13728	13069
413	0,00004	-	0,00212	21,6	139,9	14576	16343	18122	15459	17233	16347
414	0,00004	-	0,00299	21,4	142,1	17099	20218	23069	18659	21643	20129
415	0,00005	-	0,00425	21,3	146,3	21206	26385	32309	23795	29347	26633
416	0,00005	-	0,00530	21,2	150,5	26656	32998	39918	29827	36458	33191
417	0,00005	-	0,00637	21,1	154,5	31184	37397	45572	34290	41484	38051
418	0,00005	-	0,00748	21,1	158,2	34036	43431	45618	38733	44525	41028
419	0,00005	-	0,00856	21,0	161,1	36902	45767	45618	41334	45693	42762
420	0,00005	-	0,00963	21,0	165,0	40859	45872	45618	43366	45745	44117
421	0,00008	-	0,00141	22,2	138,5	13551	14906	16902	14229	15904	15120
422	0,00008	-	0,00212	22,0	140,7	16719	18173	20354	17446	19263	18415
423	0,00008	-	0,00299	21,9	144,1	21219	23877	27045	22548	25461	24047
424	0,00008	-	0,00425	21,7	147,4	25385	29510	33537	27447	31524	29477
425	0,00009	-	0,00543	21,6	153,4	32426	37073	40970	34750	39022	36823
426	0,00009	-	0,00637	21,5	156,1	34853	39707	44664	37280	42186	39742
427	0,00009	-	0,00742	21,4	158,8	36664	42658	45618	39661	44138	41647
428	0,00010	-	0,00768	21,4	162,6	41120	45752	45618	43436	45685	44163
429	0,00010	-	0,00909	21,4	166,0	41619	45869	45618	43744	45744	44369
430	0,00011	-	0,00140	23,5	138,1	12517	13676	15474	13096	14575	13889

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
431	0,00012	-	0,00211	23,2	142,5	19460	21064	23405	20262	22235	21310
432	0,00012	-	0,00294	22,9	144,5	22240	24494	27670	23367	26082	24802
433	0,00012	-	0,00390	22,7	148,4	27749	30879	33564	29314	32222	30731
434	0,00013	-	0,00516	22,5	151,5	30022	33536	37690	31779	35613	33749
435	0,00013	-	0,00600	22,4	155,2	33259	37705	41711	35482	39708	37558
436	0,00014	-	0,00761	22,3	161,3	39740	44176	45539	41958	44857	43151
437	0,00014	-	0,00880	22,3	163,6	41392	45701	45618	43546	45660	44237
438	0,00021	-	0,00175	23,5	143,1	23733	23442	24404	23587	23923	23859
439	0,00021	-	0,00239	23,3	145,6	26235	26443	28167	26339	27305	26948
440	0,00021	-	0,00300	23,0	148,0	29383	30352	32181	29867	31267	30639
441	0,00023	-	0,00435	22,7	154,0	35301	37893	40290	36597	39091	37828
442	0,00023	-	0,00541	22,6	157,1	38386	41841	43122	40113	42481	41116
443	0,00024	-	0,00595	22,5	159,1	39201	43316	43095	41258	43205	41870
444	0,00024	-	0,00138	19,4	143,1	23897	22953	23806	23425	23380	23552
445	0,00026	-	0,00251	19,6	148,3	30676	30536	32132	30606	31334	31115
446	0,00026	-	0,00327	19,7	152,4	34133	35325	37392	34729	36359	35617
447	0,00027	-	0,00447	19,8	154,6	37278	38933	40269	38106	39601	38827
448	0,00028	-	0,00472	19,8	157,8	39720	42934	43800	41327	43367	42151
449	0,00029	-	0,00110	20,6	145,3	26010	25071	26470	25541	25771	25850
450	0,00029	-	0,00228	20,5	149,0	32050	31804	33745	31927	32774	32533
451	0,00030	-	0,00272	20,4	151,7	35503	35803	37557	35653	36680	36287
452	0,00031	-	0,00357	20,4	153,7	37624	38639	40232	38132	39435	38832
453	0,00032	-	0,00517	20,4	160,2	43821	45738	45512	44779	45625	45023
454	0,00032	-	0,00113	20,6	145,3	26010	25071	26470	25541	25771	25850
455	0,00033	-	0,00227	20,5	149,0	32050	31804	33745	31927	32774	32533
456	0,00034	-	0,00269	20,5	151,7	35503	35803	37557	35653	36680	36287
457	0,00035	-	0,00354	20,4	153,7	37624	38639	40232	38132	39435	38832
458	0,00036	-	0,00510	20,4	160,2	43821	45738	45512	44779	45625	45023
459	0,00038	-	0,00102	20,8	147,3	30696	29619	31402	30157	30510	30572
460	0,00040	-	0,00230	20,8	152,8	38716	38564	40465	38640	39515	39248
461	0,00041	-	0,00329	20,7	156,5	41157	42726	44135	41941	43431	42673
462	0,00042	-	0,00417	20,7	157,7	42757	44429	45220	43593	44824	44135
463	0,00004	-	0,00181	18,4	136,5	10350	11288	12449	10819	11868	11362
464	0,00006	-	0,00215	18,9	140,5	15721	16917	19032	16319	17974	17223
465	0,00008	-	0,00269	19,0	143,6	20299	23020	25865	21659	24442	23061
466	0,00010	-	0,00314	19,2	145,4	23148	25502	28937	24325	27219	25862
467	0,00012	-	0,00356	19,4	148,2	26985	29948	33146	28466	31547	30026
468	0,00015	-	0,00411	19,5	151,2	31154	33732	36686	32443	35209	33858
469	0,00017	-	0,00463	19,6	153,0	32784	35963	39164	34373	37563	35970
470	0,00019	-	0,00534	19,7	156,0	36665	39790	41363	38227	40577	39273
471	0,00022	-	0,00570	19,8	158,1	38825	42332	43127	40579	42730	41428
472	0,00024	-	0,00650	19,9	160,8	41692	44899	44699	43296	44799	43763
473	0,00004	-	0,00212	21,0	141,2	16925	19565	21518	18245	20541	19336

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
474	0,00006	-	0,00312	20,8	144,4	20450	23511	27410	21980	25461	23790
475	0,00009	-	0,00432	20,7	149,2	27709	31480	35341	29594	33411	31510
476	0,00011	-	0,00532	20,6	152,8	31051	35006	39623	33029	37315	35227
477	0,00013	-	0,00595	20,6	156,8	36048	40077	42994	38063	41536	39706
478	0,00016	-	0,00735	20,7	160,1	38938	42863	43860	40901	43361	41887
479	0,00018	-	0,00764	20,8	161,8	39608	44163	44044	41886	44104	42605
480	0,00005	-	0,00380	21,2	144,5	20407	24214	28475	22311	26345	24366
481	0,00007	-	0,00533	21,1	149,4	27786	32318	37302	30052	34810	32469
482	0,00009	-	0,00752	21,0	160,1	37688	43359	45618	40523	44489	42222
483	0,00012	-	0,00803	21,0	161,8	38949	44010	45564	41479	44787	42841
484	0,00005	-	0,00492	21,3	149,0	25630	30726	37085	28178	33905	31147
485	0,00007	-	0,00637	21,2	154,3	31734	36974	44037	34354	40506	37582
486	0,00010	-	0,00846	21,2	162,4	39852	45215	45618	42534	45417	43562
487	0,00005	-	0,00588	18,7	154,3	32356	37707	44877	35032	41292	38314
488	0,00007	-	0,00803	18,9	162,4	40611	45800	45618	43206	45709	44010
489	0,00005	-	0,00922	19,2	164,7	40456	45861	45618	43159	45740	43978
490	-	0,00161	0,01174	20,8	153,3	43777	39581	42111	41679	40846	41823
491	-	0,00158	0,00748	21,0	147,1	33146	28914	30707	31030	29810	30922
492	-	0,00191	0,00853	21,0	148,9	36286	32036	34027	34161	33031	34116
493	-	0,00216	0,00961	21,0	151,7	41442	36896	39153	39169	38025	39164
494	-	0,00215	0,01074	21,0	153,3	44326	39718	42155	42022	40937	42067
495	-	0,00187	0,00531	21,0	146,4	30576	26335	27448	28456	26892	28120
496	-	0,00197	0,00636	21,0	148,2	33446	29492	30714	31469	30103	31217
497	-	0,00237	0,00747	21,0	150,2	38551	33761	35087	36156	34424	35800
498	-	0,00257	0,00854	21,2	151,1	40954	36065	37471	38509	36768	38163
499	-	0,00283	0,00961	21,2	153,7	45595	40501	42217	43048	41359	42771
500	-	0,00174	0,00424	21,3	143,1	25101	20753	20907	22927	20830	22253
501	-	0,00225	0,00507	21,3	146,6	31724	26785	27318	29255	27052	28609
502	-	0,00251	0,00555	21,3	149,1	36421	31268	32257	33844	31763	33315
503	-	0,00316	0,00748	21,3	153,0	45052	39183	40335	42117	39759	41523
504	-	0,00151	0,00313	21,4	142,6	25516	20333	16268	22924	18300	20706
505	-	0,00225	0,00424	21,3	146,0	31140	25562	26404	28351	25983	27702
506	-	0,00266	0,00528	21,3	148,4	36900	31597	32469	34249	32033	33655
507	-	0,00316	0,00636	21,2	152,0	43697	38046	39370	40872	38708	40371
508	-	0,00149	0,00212	21,2	140,5	21104	16100	16784	18602	16442	17996
509	-	0,00208	0,00313	21,2	144,7	29087	23331	24165	26209	23748	25527
510	-	0,00266	0,00390	21,2	147,9	35065	29456	30374	32260	29915	31631
511	-	0,00336	0,00528	21,2	153,1	45138	39147	40146	42143	39647	41477
512	-	0,00181	0,00212	21,2	140,7	20111	17430	19339	18770	18384	18960
513	-	0,00249	0,00312	21,1	147,3	33648	28279	28837	30964	28558	30255
514	-	0,00339	0,00424	21,1	153,1	45798	40070	41224	42934	40647	42364
515	-	0,00210	0,00142	21,1	143,9	27717	22675	23329	25196	23002	24574
516	-	0,00321	0,00312	21,1	152,7	43304	38361	39183	40833	38772	40283

Tabela Z.3. cd.

Lp.	G _p	G _w	G _{oi}	T	P _p	ΔP _I /ΔL	ΔP _{II} /ΔL	ΔP _{III} /ΔL	ΔP _{I-II} /ΔL	ΔP _{II-III} /ΔL	ΔP _{I-II-III} /ΔL
	kg/s			°C	kPa	Pa/m					
517	-	0,00132	0,00100	21,2	140,3	21154	16048	16388	18601	16218	17863
518	-	0,00249	0,00212	21,2	147,4	33986	28748	29376	31367	29062	30703
519	-	0,00149	0,00099	21,4	139,9	19879	14803	15080	17341	14942	16588
520	-	0,00298	0,00212	21,3	150,7	39578	34699	35615	37139	35157	36631
521	-	0,00191	0,00100	21,3	143,2	26249	21460	21765	23855	21612	23158
522	-	0,00227	0,00100	21,3	146,3	31280	26950	28082	29115	27516	28771
523	-	0,00259	0,00099	21,2	149,6	37455	35029	37155	36242	36092	36546

Streszczenie

„Przepływ układów wielofazowych w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową”

Przepływ układów wielofazowych występuje w wielu technologiach przemysłowych, głównie w sektorze chemicznym i petrochemicznym, ale też farmaceutycznym, spożywczym lub energetycznym. Przetwarzanie takich substancji związane jest z procesami wymiany pędu, ciepła lub masy, co oznacza konieczność dysponowania jednoznacznym opisem zjawisk towarzyszących ich przepływowi.

Jednym z proponowanych w optymalizacji wymienników ciepła może być piana metalowa o komórkach otwartych, która jako wypełnienie rury przepływowej stanowi specyficzne „żebro” wymieniające ciepło z płynącą substancją.

Jednak do skutecznego projektowania, optymalizacji i eksploatacji aparatów oraz instalacji technologicznych niezbędna jest znajomość opisu zjawisk towarzyszących płynącym w nich substancji. Procesy wymiany ciepła nierzadko są związane z przepływem dwufazowym. Warto zauważyć, że poprawny opis ruchu ciepła w płynie wymaga często uwzględnienia zjawisk wynikających z hydrodynamiki jego przepływu, zwłaszcza wtedy, gdy jest to płynny układ dwufazowy.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań oraz ich analizę w odniesieniu do oporów przepływu jednofazowego oraz układów dwufazowych gaz-ciecz i ciecz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów i symulacji numerycznych dokonano rozszerzenia i uzupełnienia stanu wiedzy w wybranych obszarach hydrodynamiki przepływu tego typu substancji przez piany metalowe.

Zaproponowano nowe metody obliczania oporów przepływu jednofazowego oraz dwufazowego gaz-ciecz i ciecz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową. Wyodrębniono i opisano zaburzenia dwufazowych struktur przepływu w odniesieniu do rury pustej. Zweryfikowano też wpływ materiału, z jakiego została wykonana piana metalowa na opory przepływu. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych oporów przepływu dwufazowego gaz-ciecz przez pianę metalową, co pozwoliło lepiej zrozumieć i uzupełnić opis mechanizmu występowania wysokich strat ciśnienia podczas tego rodzaju przepływu.

Słowa kluczowe: piana metalowa, opory przepływu, przepływ jednofazowy, przepływ dwufazowy, intensyfikacja wymiany ciepła, turbulizator przepływu

Summar

„Flow of multiphase systems in a horizontal pipe filled with metal foam”

Flow of multiphase systems occurs in many industrial technologies, mainly in chemical and petrochemical sectors but also pharmaceutical, food and energy sectors of industry. Processing of such substances is related to exchange processes of momentum, heat or mass, that means disposition necessity of unequivocal description of concomitant their flow phenomena.

Opened-cell metal foam can be one of suggested solutions in heat exchangers optimalization. The metal foam as filling the flow pipe forms a specific “rib” exchanging heat with flowing substance.

However, concomitant phenomena description knowledge of flowing in apparatuses and technological installations substances is essential to efficient design, optimalization and exploitation of the apparatuses and technological installations. Heat transfer processes are not uncommon related to two-phase flow. It is worth noting that correct description of heat transfer in fluid requires often considering phenomena, that result from hydrodynamic of the substance flow, especially, if it is liquid two-phase flow.

In these papers, experiments results and the results analysis regarding pressure drop of single flow, two-phase gas-liquid flow and liquid-liquid flow in the horizontal pipe filled with metal foam were presented. As a result of conducted experiments and numerical simulations, enhancement and supplying the state of the art in chosen areas of these substances flow hydrodynamic through the metal foams were done.

New methods of pressure drop calculation of single flow and two-phase gas-liquid and liquid-liquid flow in the pipe filled with the metal foam were suggested. Perturbations of two-phase flow regimes were isolated and depicted concerning the empty pipe. Influence of metal foam material on pressure drops was verified also. Results of pressure drop numerical calculations of two-phase gas-liquid flow through metal foam were presented, that offered to better understand and supplement description of mechanism of occurring of high pressure drops during this kind of flow.

Key words: metal foam, pressure drops, single flow, two-phase flow, heat transfer intensification, flow turbulizator