

Stanowisko do badań zmiennych rozpliwów płynów w węzle

WŁADYSŁAW CIERNIAK, KATARZYNA MNICH, JERZY GORGON

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

W artykule zostały omówione elementy składowe stanowiska pomiarowego do badania zmiennych w czasie przepływów w rozgałęzieniach. Tymi elementami są: pompa tłokowa o zmiennej wydajności sterowanej z komputera, magnetoelektryczny miernik strumienia cieczy oraz elementy rozgałęzień. Elementem stanowiska jest również platforma wykonana z perforowanej blachy, pod którą znajduje się misa zbierająca rozlaną ciecz. Jest również omawiane urządzenie do wykonywania elastycznych modeli naczyń krwionośnych.

Słowa kluczowe: mechanika płynów, badania eksperymentalne

Wstęp

Od kilku lat budujemy elementy stanowiska do badania zjawisk występujących w rozgałęzieniach oraz krętych przewodach. W technice zwykle spotyka się przewody sztywne a lepkość cieczy jest zazwyczaj niezależna od gradientu prędkości. Przepływy z reguły mają duże liczby Reynoldsa. Struktury sieci w których występują przepływy są stosunkowo proste z małą liczbą rozgałęzień.

W organizmach zwierząt i ludzi przewody są elastyczne a lepkość (o ile pojęcie lepkości jest uzasadnione składem krwi) jest funkcją gradientu prędkości. Struktury sieciowe są bardzo skomplikowane z olbrzymią liczbą rozgałęzień.

Podobnie skomplikowane są struktury sieciowe w ośrodkach porowatych jakimi są skały. W organizmach żywych i w skałach przepływy zachodzą przy małych i bardzo małych liczbach Reynoldsa.

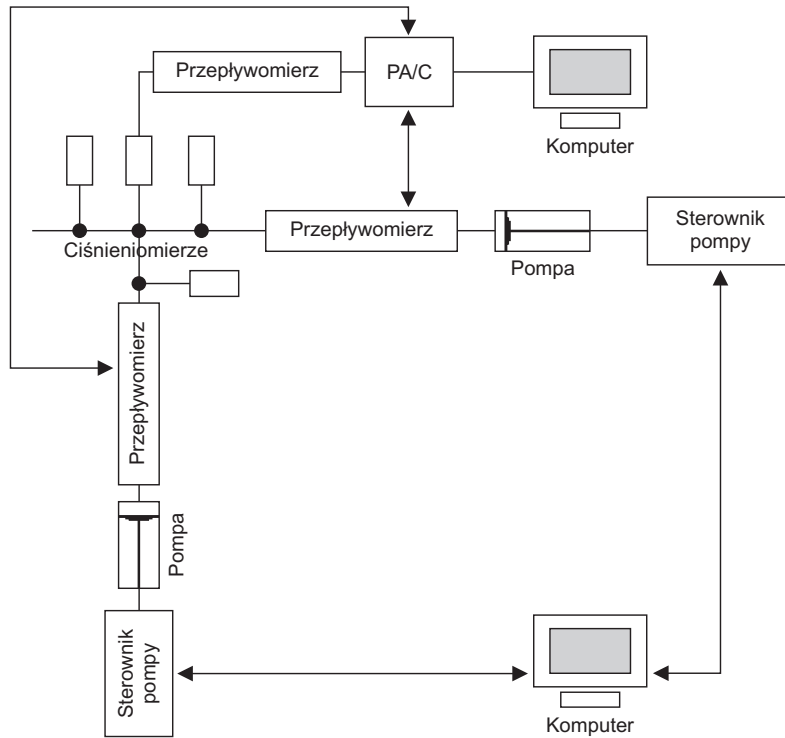
Badania nad przepływami w modelach elementów układu krwionośnego w IMG PAN zostały zapoczątkowane przez. Cieślkiego, Lasowską i Smolarskiego, [Cieślcki i in., 2000a; 2000b; Cieślcki].

Dwie pierwsze wymienione prace omawiają wpływ na spadek ciśnienia w funkcji strumienia przepływu niejednorodności średnic kanałów i ich krętości. Ostatnia z wymienionych prac omawia szeroki krąg zagadnień związanych z problematyką krążenia w organizmie człowieka.

Wstępne pomiary przeprowadzone dla przepływów ustalonych [Cierniak, Mnich] oraz obliczenia przeprowadzone przez J. Brandeisa (praca wykonana w IMG PAN i jeszcze nie opublikowana) [Brandeis] pokazały, że w niesymetrycznych rozgałęzieniach istotną rolę w rozkładzie ciśnień mają zmiany pędu. Najważniejszym jakościowym spostrzeżeniem jest to, że na początku przewodu odpływowego, ciśnienie może być większe niż na końcu przewodu dopływowego. Ponieważ ten efekt jest dosyć duży to przy obliczeniach w skomplikowanych sieciach, w których rozgałęzienia są gęste nie można go pomijać. W węzłach zachodzą również straty energii. Powoduje to znaczne komplikacje w modelach opisujących takie przypadki. Zmusza to do prowadzenia badań przy pomocy obliczeń komputerowych jak i eksperymentalnych. Eksperymenty są w szczególności konieczne przy badaniu rozpliwu cieczy o własnościach nie niutonowskich oraz zmiennych w czasie.

Stanowisko badawcze

Docelowe stanowisko badawcze powinno się składać z dwu pomp mogących wytwarzać zmienne w czasie strumienie synchronicznie sterowanych z komputera oraz dwu mierników zmiennych strumieni płynu. W przypadku rozgałęzienia, jedna z pomp i szeregowo połączony z nią przepływomierz, powinny doprowadzać płyn do jednego ramienia rozgałęzienia (rys. 1), a druga i połączony z nią szeregowo przepływomierz odprowadzać.

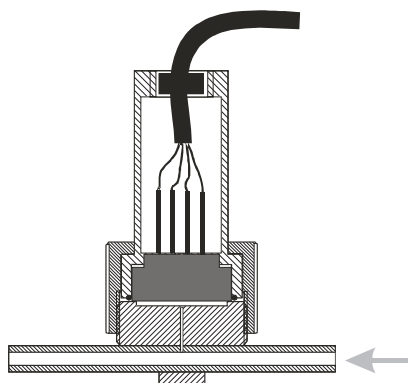


Rys. 1. Schemat docelowego stanowiska badawczego w przypadku rozdziału strumieni

Do węzła, w którym następuje połączenie strumieni, obie pompy i szeregowo połączone z nimi przepływomierze mogą być podłączone do gałęzi dopływowych. W trzeciej gałęzi strumień będzie wyznaczany z zasady zachowania masy.

Dopiero zastosowanie takich dwóch kompletów (pompa – przepływomierz) umożliwi prowadzenie pomiarów z dowolnie (w granicach możliwości technicznych) nastawianymi wartościami strumieni. Stosowanie jednego zestawu pompy i miernika przepływu oraz regulowanie rozpyływu oporami ma istotne ograniczenia spowodowane zawsze istniejącymi nieliniowościami związanymi ze zmianami średnic przewodów. Przykładowo wymuszenie sinusoidalnego przepływu w przewodzie dopływowym nie gwarantuje takich przepływów w przewodach odpływowych obciążonych na końcach różnymi oporami. W tym przypadku opory służą do ustalenia rozdziału płynu. Najczęściej stosowanymi oporami w zakresie małych liczb Reynoldsa są kapilary, które mają słabo nieliniowe charakterystyki. Stosowanie bardzo długich a co za tym idzie prawie liniowych kapilar powoduje istotny wzrost sił bezwładności [W. Cierniak]. Przy stosunkowo dużej objętości pompy, już ściśliwość samego płynu przy bezwładności cieczy zawartej w przewodzie (bo w przewodzie występują duże prędkości i przyspieszenia) musi spowodować powstanie rezonansu o niskiej częstotliwości. W poprzednim modelu pompy o objętości około 6-ciu litrów, z rurką średnicy 3 mm i długości około 1 m częstotliwość rezonansowa wynosiła około 1.4 Hz. Występowanie rezonansów znacznie ogranicza możliwości eksperymentowania.

Koniecznym składnikiem stanowiska są mierniki różnicy ciśnień. Ze względu na małe strumienie przepływającej cieczy muszą to być czujniki o bardzo małych zmianach objętości. Odpowiednimi są czujniki krzemowe z membraną izolującą. Do budowanych modeli adaptowano stare czujniki zmieniając im obudowy w taki sposób by mogły być montowane bezpośrednio na modelach rozgałęzień (rys. 2).



Rys. 2. Sposób połączenia czujnika różnicy ciśnień z modelem

Aby zmniejszyć długości przewodów doprowadzających ciśnienia z modelu do mierników zastosowano pomiar różnicy ciśnień pomiędzy modelami rozgałęzień i atmosferą. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność stosowania czujników na większe zakresy. Zwiększa to względną niepewność pomiarów. Zaletą jest to, że możliwe są jednoczesne pomiary różnic ciśnień pomiędzy punktem rozgałęzienia i punktami położonymi w różnych miejscach na ramionach rozgałęzienia. Takie rozwiązanie bardzo ułatwia odpowietrzanie układu pomiarowego. Przy zmiennych przepływach wszystkie połączenia mierników do układu hydraulicznego muszą być sztywne gdyż w przeciwnym razie pomiary zostaną obciążone dużymi błędami. Odpowietrzanie układu pomiarowego z długimi sztywnymi przyłączami mierników różnicy ciśnień jest niezwykle trudne. Jeśli przyłącza są nieprzezroczyste to nigdy nie istnieje pewność czy zostało to dobrze wykonane.

Przy pomiarach zmiennych przepływów całkowite odpowietrzenie układu jest warunkiem koniecznym do uzyskania poprawnych wyników, gdyż ściśliwość nawet niewielkiego pęcherza powietrza w istotny sposób może zmienić chwilowe rozptywy.

Elementy stanowiska badawczego

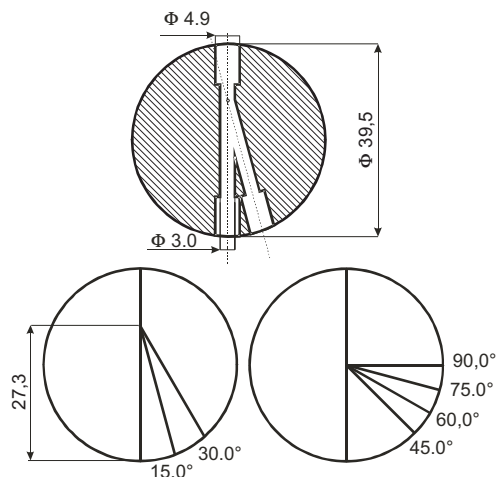
Obecnie istnieje jedna pompa dająca zmienny strumień sterowany o możliwości sterowania jego wielkością przy pomocy komputera. Jej maksymalna wydajność wynosi ponad 40 cm^3 na sekundę. Przyrost wydajności od 0 do 10 cm^3 może się odbywać w czasie nie dłuższym niż 10 ms. Oczywiście gdy w układzie istnieje przepływ to szybkie przyrosty muszą być mniejsze. Ich wielkość zależy od ciśnienia wytwarzanego przez pompę.

Z pompą szeregowo jest połączony przepływomierz magnetoelektryczny o zakresie pomiarowym $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ o rozróżnialności $0.1 \text{ cm}^3/\text{s}$ i paśmie przenoszenia 25 Hz. Ograniczeniem rozróżnialności są okresowe sygnały o częstotliwości 60 i 10 Hz. Są one wynikiem przemiany częstotliwości 110 Hz z którą to częstotliwością zmienia się pole magnetyczne w kanale przepływomierza o powierzchni przekroju 5 mm^2 z pierwszą i drugą harmoniczną napięcia zasilającego. W układzie przyrządu istnieją trzy źródła nieliniowości, które mogą być przyczynami powstawania przemiany częstotliwości. Jednym z nich jest żelazny rdzeń elektromagnesu wytwarzającego pole magnetyczne w kanale przepływowym. Następnym źródłem mogą być nieliniowe właściwości płynu w kanale. Jak wiadomo przy przepływie prądu przez elektrolity na elektrodach powstaje napięcie polaryzacji, które przy bardzo małych prądach jest od nich mało zależne. To jest źródłem nieliniowości. Trzecim źródłem nieliniowości jest układ detektora synchronicznego. Szumy miernika są o około dziesięć razy mniejsze. Zastosowanie uśredniania fazowego pozwoli około dziesięciokrotnie poprawić rozdzielczość. Opracowana pompa generuje w tym celu specjalny sygnał.

Uzyskane przy budowie doświadczenia pozwalają na zbudowanie przepływomierza magnetoelektrycznego o rozdzielczości poniżej $1 \text{ mm}^2/\text{s}$. Wymaga to jednak zastosowania bardzo drogich materiałów do budowy kanału przepływowego.

Zaprojektowane i wykonane modele sztywnych rozgałęzień zostały pokazanych na rys. 3.

Przy ich konstrukcji zwrócono szczególną uwagę na sposób przyłączania mierników różnicy ciśnień umożliwiając podłączenie ich bez pozostawienia pod nimi pęcherzy powietrza. Podłączanie mierników będzie się odbywać przy wypływie płynu przez otwór łączący czujnik różnicy ciśnień z punktem rozdziału płynu.



Rys. 3. Modele rozgałęzień

Trudnym zagadnieniem, któremu poświęcono dużo czasu jest budowa elastycznych modeli naczyń krwionośnych. Po literaturowej analizie i wizycie w Unimilu postanowiono wytwarzać modele naczyń z lateksu. Technologia polega na zanurzeniu sztywnego modelu w roztworze lateksu, wyciągnięciu go i obracaniu nim względem dwu osi w powietrzu. Takie czynności należy powtórzyć kilkadziesiąt razy. Grubość ścianek dobiera się ilością zanurzeń. Po uzyskaniu odpowiedniej grubości należy przeprowadzić nagrzewanie. Czas nagrzewania silnie zależy od temperatury. Po nagrzewaniu gdy model uzyska pożądaną wytrzymałość należy go zdjąć z formy. Unimil, aby zmniejszyć przyleganie produktu do formy przed jego zdjęciem, poddaje go moczeniu w gorącym roztworze zasadowym.

W przypadku modeli elementów układu krwionośnego trudnym problemem jest opracowanie technologii ściągania ich z rozgałęzionej formy. Istnieją tylko dwie możliwości. Pierwsza to wykonanie formy z elementami rozłączalnymi a druga wykonanie formy ulegającej stopieniu lub rozpuszczeniu.

Do powlekania formy lateksem zostało opracowane i zaprojektowane urządzenie powtarzające zaplanowaną ilość czynności zanurzenia i wyciągania.

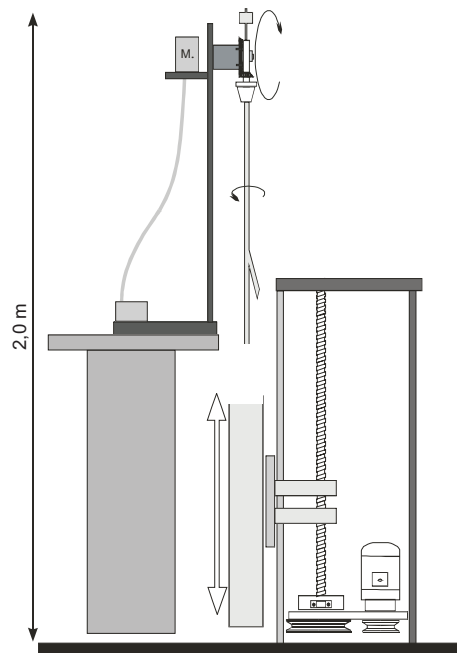
Jeszcze nie został rozwiązany problemem podłączanie mierników różnicy ciśnień do elastycznego modelu. Problem polega na tym, że w elastycznych przewodach rozchodzą się wolne fale (zmianie ulega średnica przewodu), które na rozgałęzieniach ulegają odbiciom. Wykonanie przyłącza będzie powodowało zmiany odbić. Na rys. 4 pokazano szkic urządzenia do wytwarzania elastycznych modeli przewodów.

Modele będą montowane na platformie wykonanej z perforowanej blachy, pod którą znajduje się duża misa zbierająca rozlewany w czasie montażu i odpowietrzania płyn. Z misy płyn jest odprowadzany do zbiornika zasilającego pompę.

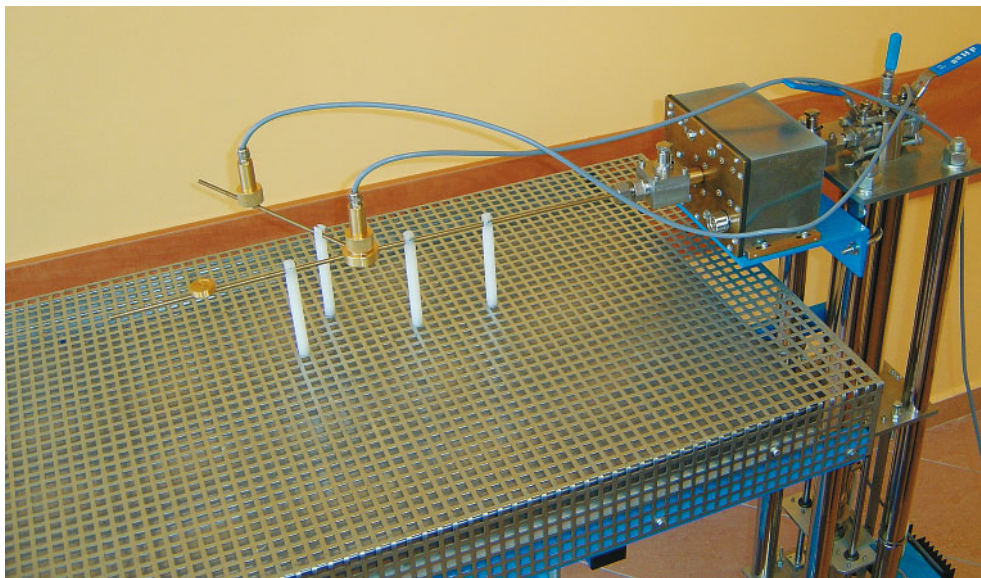
Platforma i pompa mogą być połączone na sztywno. Sygnały z przepływomierza (przepływomierzy), mierników różnic ciśnień oraz wyjścia synchronizującego pompy będą podłączane do szesnastokanałowego przetwornika analogowo-cyfrowego, z którego będą transmitowane do komputera. Zdjęcie stanowiska zostało pokazane na rysunku 5.

Literatura

1. J. Brandeis, *Flow of fluid in bifurcating tube geometries*, Praca nie opublikowana wykonana w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN. Kraków 2005.
2. K. Cieśllicki, A. Lasowska, A.Z. Smolarski, 2000a, *Pressure-Flow Relation of Arterial Segments of Variable Geometry*, Pol. J. Med. Phys. Eng. 6, 55-67.
3. K. Cieśllicki, A. Lasowska, A.Z. Smolarski, (2000b); *The influence of channel tortuosity on hydraulic resistance*, Bul. Pol. Acad. S: Earth Sc. 48, 161-173.
4. K. Cieśllicki, *Hydrodynamiczne uwarunkowania krążenia mózgowego*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.



Rys. 4. Szkic urządzenia do wykonywania elastycznych modeli elementów układu krwionośnego



Rys. 5. Widok stanowiska pomiarowego do badania rozpyłów w rozgałęzieniach

5. W. Cierniak, K. Mnich, *Laboratoryjne badanie rozpyływu cieczy w rozgałęzieniu z krętym dopływem*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie, tom 3-4 2004, s. 159-170, s. 219-223.
6. W. Cierniak, *Pompa sterowana komputerem jako zadajnik strumienia cieczy*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie, tom 1 2003 r.
7. W. Cierniak, K. Mnich, *Badanie przepływów cieczy w rozgałęzieniu*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie, tom 2, 2003 r.

Test bed for investigation of fluid propagation in a node**Abstract**

This article presents the elements of measuring stand designed for an experimental research to analyze unsteady fluid flow in junction. Those elements were: computer controlled piston pump of a variable discharge, magnetic flow meters and the elements of junction. There was also a platform which was made from perforated steel sheet and a dish placed under the platform for collection of fluid. A conception of a device for construction of models of vessels was presented.

Keywords: fluid mechanics, experimental investigations

Recenzent: prof. dr hab. inż. *Jan Kielbasa*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN