

Pomiary fal ciśnienia oraz odkształceń w prostej sieci przewodów elastycznych

MAREK GAWOR, JERZY GORGON, KATARZYNA MNICH-MEDOŃ, JACEK SOBCZYK, MARTA TICHORUK

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

Streszczenie

Podstawowym zagadnieniem w prezentowanej pracy jest dopracowanie metodyki pomiarów przepływów cieczy oraz odkształceń elastycznych przewodów z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej.

Przeprowadzono studia literaturowe, które pozwoliły na opracowanie algorytmów umożliwiających dokładniejsze obliczenia wektorów prędkości. Algorytmy te polegały na zastosowaniu odpowiednich filtrów w czasie analizy zarejestrowanych zdjęć.

Pomiary odkształceń przewodów elastycznych przeprowadzono na modelu złożonym z przewodów wykonanych z różnych materiałów elastycznych. Wymuszano przepływ cieczy przy pomocy pompy sterowanej komputerowo zadając zmienne prędkości przepływu. Przedstawiono analizę przebiegu zmian ciśnienia w zależności od amplitudy i częstotliwości wymuszenia prędkości przepływu cieczy.

Słowa kluczowe: cyfrowa anemometria obrazowa, odkształcenia w przewodach elastycznych

1. Wstęp

Przepływ w naczyniach krwionośnych odbywa się w skomplikowanej geometrycznie i topologicznie sieci elastycznych kanałów. Mechanizm przepływu krwi podlega wielu procesom regulacyjnym, które wytworzyły się na drodze ewolucji. Procesy te sterują przepływem m.in. wpływając na właściwości mechaniczne ścianek naczyń (sztywność, pole przekroju wewnętrznego itp.).

Poznanie mechanizmu przepływu krwi odbywa się poprzez: badanie właściwości przepływowych w rzeczywistych naczyniach krwionośnych lub ich fizycznych modelach, eksperymentalne badanie pól prędkości oraz numeryczne rozwiązywanie równań ruchu cieczy w modelach elastycznych.

Naczynia krwionośne są elastyczne, zatem każdej zmianie ciśnienia krwi wewnątrz naczynia towarzyszy zmiana jego wymiarów (Cieśliski, 2001). Do ilościowej oceny elastyczności naczyń definiuje się elastyczność ścian: $C = E h/d$; E – moduł Younga, h – grubość ścianki, d – średnica rurki (Bębenek, 1999).

Eksperymenty przedstawione w niniejszym opracowaniu miały na celu opracowanie warsztatu badawczego umożliwiającego pomiary przepływów cieczy w modelach sieci naczyń elastycznych. W pracach wykorzystano najprostsze modele (opisane szerzej w rozdziałach 3 i 6), których zasadniczymi elementami były cienkościenne walce wykonane z lateksu lub gumy.

Badanie odkształceń elastycznych ścian zostało zrealizowane metodą analizy obrazu znaczników (kropek) naniesionych na zewnętrzną stronę ścianki modelu. Wykonanie dwóch zdjęć w znanym odstępzie czasu umożliwia wyznaczenie odkształceń ścianki oraz szybkości tych odkształceń (Hiller i in., 1996). Zdjęcia wykonywane były za pomocą kamery z regulowanym odstępem czasu pomiędzy zdjęciami oraz regulowanym czasem oświetlenia obiektu (Gawor, 2000). Dało to możliwość obserwacji procesów odkształcania modelu w różnych fazach.

Analityczny opis zjawisk hydrodynamicznych i mechanicznych występujących w układzie krwionośnym jest złożony i wymaga stosowania zaawansowanego aparatu matematycznego. Wynika to z nieliniowości równań mechaniki płynów, reologicznych właściwości krwi, konieczności uwzględnienia współoddziaływania

przepływu ze ściankami naczyń (Wetterer i Kenner, 1968). Dlatego w wielu przypadkach wykorzystuje się rozwiązania przybliżone za pomocą metod numerycznych (Cieśliski, 2001). W celu weryfikacji wyników obliczeń numerycznych konieczne jest wykonywanie eksperymentów. Eksperymenty dostarczają również danych materiałowych koniecznych do rozwiązywania konkretnych zagadnień teoretycznych.

Dotychczasowe wyniki badań przepływów o wyżej przedstawionych właściwościach są niezbyt liczne i czasem sprzeczne ze sobą.

2. Sposoby wymuszania przepływu cieczy

Do wytwarzania w badanych modelach periodycznie zmiennego natężenia przepływu wykorzystano sterowaną z komputera pompę zmiennego wydatku. Opracowano oprogramowanie umożliwiające sterowanie prędkością tłoka pompy, tak aby jego położenie zmieniało się w sposób sinusoidalny.

Analiza wstępnych eksperymentów wykazała, że program sterujący pompą powinien zawierać następujące parametry:

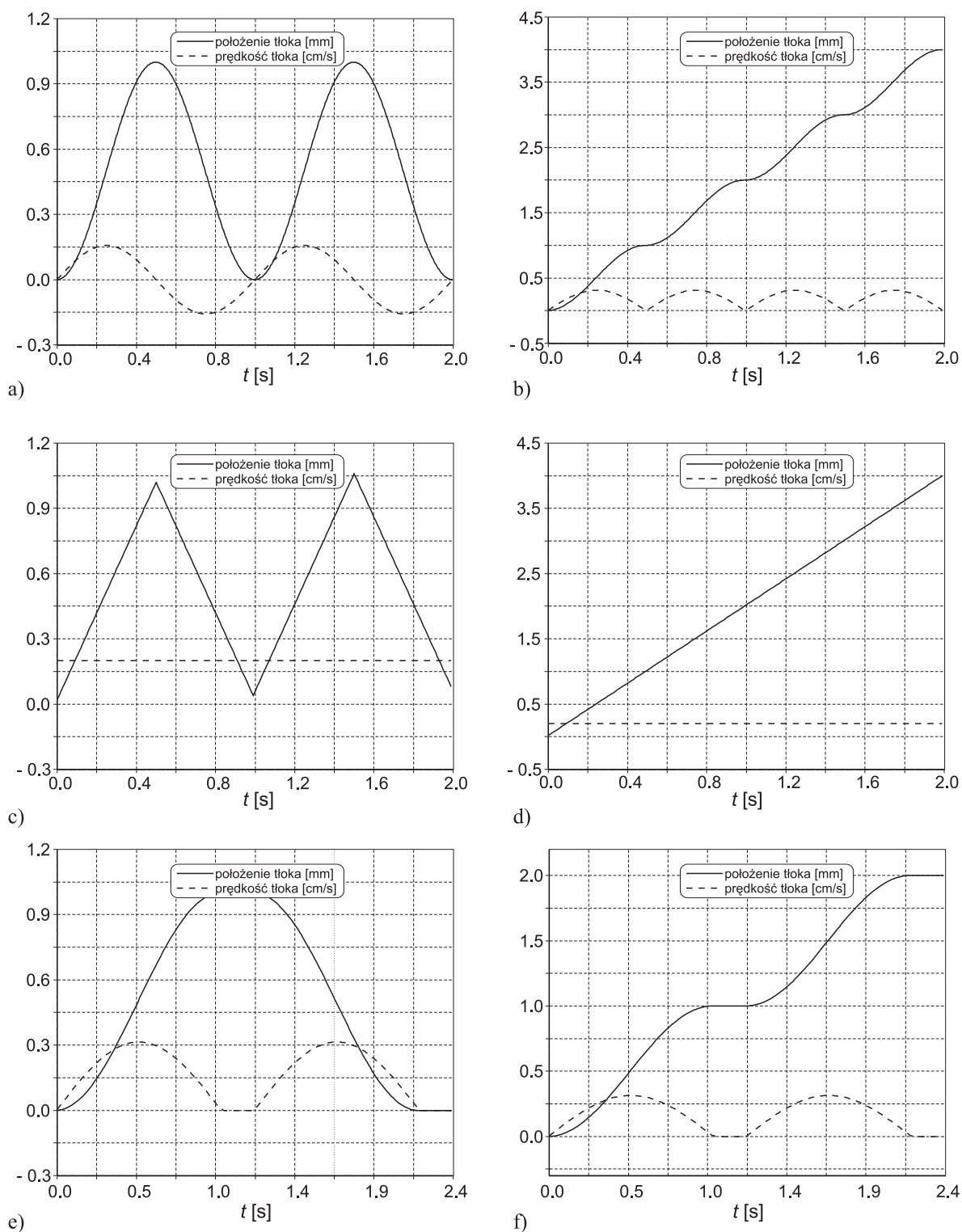
1. wymuszenie:
 - a. sinusoidalne ze zmianą kierunku ruchu tłoka (rys. 1.a),
 - b. sinusoidalne bez zmiany kierunku ruchu tłoka (rys. 1.b),
 - c. trójkątne ze zmianą kierunku ruchu tłoka (rys. 1.c),
 - d. trójkątne bez zmiany kierunku ruchu tłoka (rys. 1.d),
2. regulację:
 - a. częstotliwości ruchu tłoka pompy,
 - b. amplitudy ruchu tłoka,
3. zadawanie:
 - a. ilości okresów ruchu tłoka,
 - b. ilości podziałów okresu w celu generacji impulsów silnika,
 - c. czasu zatrzymania ruchu tłoka (umożliwia to wymuszanie przepływów w taki sposób, że po zakończeniu każdego okresu następuje zatrzymanie ruchu tłoka).

Na rysunku 1 przedstawiono wykresy położenia tłoka i jego prędkości w zależności od typu wymuszenia. Częstotliwość ruchu tłoka wynosiła 1 Hz, amplituda 1 mm, generowane były 2 okresy, a ilość podziałów w każdym okresie wynosiła 100 punktów.

Pomiary czasowych przebiegów ciśnienia oraz odkształceń modelu wykonywano w różnych warunkach brzeżno-początkowych, które zależały od sposobu pracy pompy. Przesuw tłoka w funkcji czasu miał charakter periodyczny – *quasi*-sinusoidalny (rys. 2), ponieważ odbywał się tylko w jednym kierunku. Realizowano go poprzez wielokrotne, sekwencyjne odtwarzanie połowy okresu funkcji sinus. Takie sterowanie pracą pompy było konieczne ze względu na niewielką sztywność ścianek modelu (por. rozdz. 3 i 6), które w przypadku ruchu tłoka w obu kierunkach zapadały się, zaburzając przepływ i uniemożliwiając jego analizę. Z powodu zmian poziomu cieczy w naczyniu buforowym ciśnienie statyczne oscylowało w granicach 5.0 ± 0.3 kPa.

Rzeczywisty sygnał wymuszający ruch pompy, który wysyłany jest z komputera na jej sterownik, różni się kształtem od założonego (teoretycznego – krzywe przerywane rys. 2), ponieważ jego przebieg jest wynikiem kwantyzacji funkcji ciągłej oraz dodatkowo podlegał niezamierzonemu zaburzaniu wynikającemu ze specyfiki działania systemu operacyjnego MS Windows XP. Analiza fourierowska tego sygnału wskazuje, że kwantyzacja nie jest źródłem żadnych poważnych zakłóceń w ruchu tłoka w porównaniu do przebiegu teoretycznego. Natomiast fakt ruchu w jednym kierunku wprowadza do spektrum tego sygnału oprócz częstotliwości zasadniczej również jej harmoniczne.

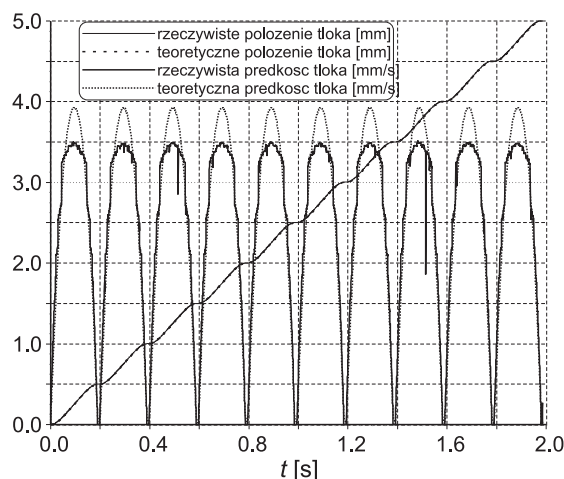
Źródłem zaburzeń niecyklicznych, które nieraz znacząco wpływają na przepływ są chwilowe zatrzymanie pompy w momentach zwiększonego obciążenia procesora komputera (program sterujący nie pracuje w czasie rzeczywistym). Widoczne są one na rysunku 2 jako pionowe szpilki skierowane w dół w kilku przypadkowych miejscach zapisu szybkości posuwu tłoka.



Rys. 1. Różne sposoby wymuszania ruchu tłoka

3. Badania modelu złożonego z lateksowych walców

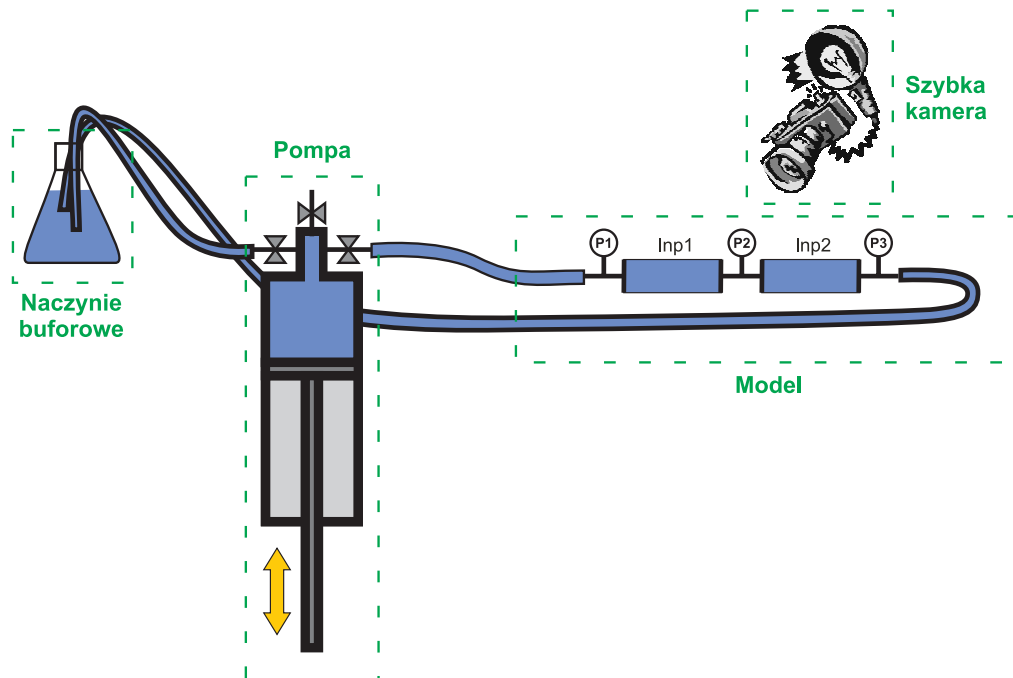
Wstępne badania przeprowadzane były na modelu złożonym z kolejno położonych (rys. 3): manometru (p_1), lateksowej nakładki na palec (lnp_1), manometru (p_2), lateksowej nakładki na palec (lnp_2), manometru (p_3) oraz zbiornika z cieczą. Lateksowe nakładki na palec miały średnicę 20 mm, i długość 50 mm (Cierniak i in., 2009a). Rurki doprowadzające ciecz do manometrów miały średnicę 6 mm i długość ok. 60 mm. W celu dopasowania nakładek lateksowych do średnicy rurek z manometrów zostały wykonane specjalne tuleje.



Rys. 2. Przykładowy zapis rzeczywistego sygnału wysyłanego z komputera na sterownik pompy (linie ciągłe). Na wykres naniesiono również informacje o teoretycznym (założonym) przebiegu tego sygnału (linie przerywane)

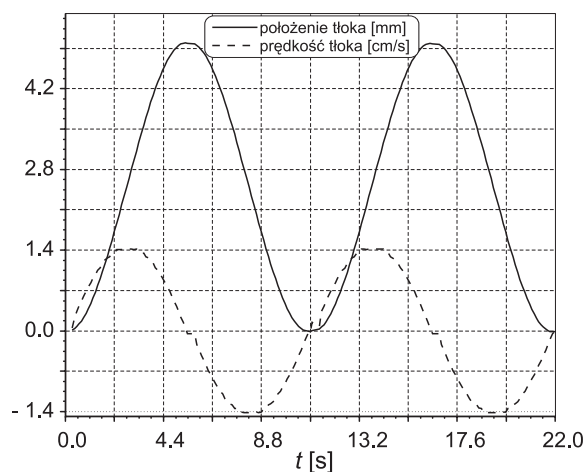
Wybór lateksowej nakładki na palec podyktowany był tym, że poprzednie badania dotyczące odkształceń elastycznych przewodów na skutek gwałtownej zmiany ciśnienia prowadzone były na takim modelu.

Na rysunku 4 pokazano zadawane położenie tłoka (krzywa ciągła) oraz jego prędkość (krzywa przerywana) w funkcji czasu. Wymuszano falę sinusoidalną ze zmianą kierunku posuwu tłoka (tłoczenie-ssanie) o następujących parametrach przepływu: częstotliwość fali 0.1 Hz, amplituda fali 5 mm. Ciśnienie początkowe, wynikające z położenia zbiornika wyrównawczego z cieczą względem położenia modelu i czujników ciśnienia, wynosiło 1.1 kPa. Wykonywano zdjęcia pierwszej nakładki (lnp_1) z częstotliwością 1 Hz.

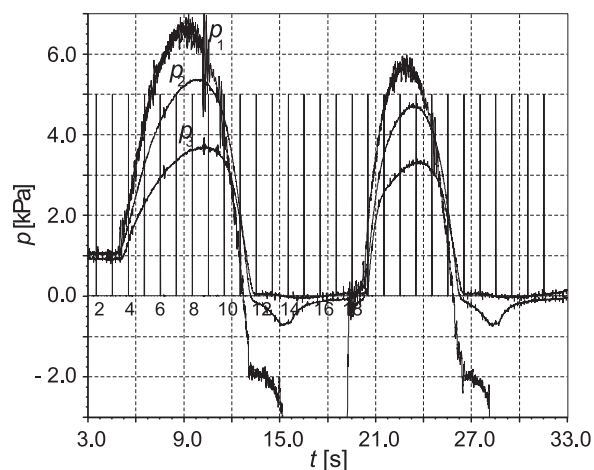


Rys. 3. Schemat eksperymentu z lateksowymi walcami

Na rysunku 5 przedstawiono zmiany ciśnień oraz momenty wykonania zdjęć (numer zdjęcia oznaczono liczbami). Ciśnienia na poszczególnych manometrach maleją ze względu na opory przepływu cieczy wzdłuż modelu. Pomiedzy 13 i 16 sekundą następuje gwałtowny spadek ciśnienia na manometrze (p_1). Występuje to w czasie gdy pompa zasysa ciecz. Ze względu na dużą elastyczność ścian nakładki oraz występujące opory przepływu cieczy następuje zatkanie rurki manometru.



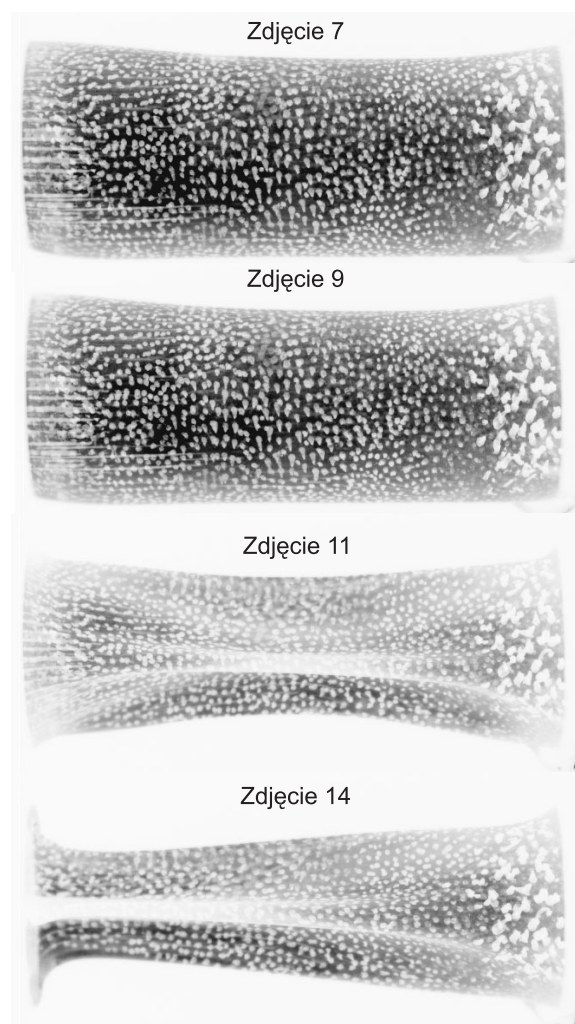
Rys. 4. Położenie i prędkość tłoka



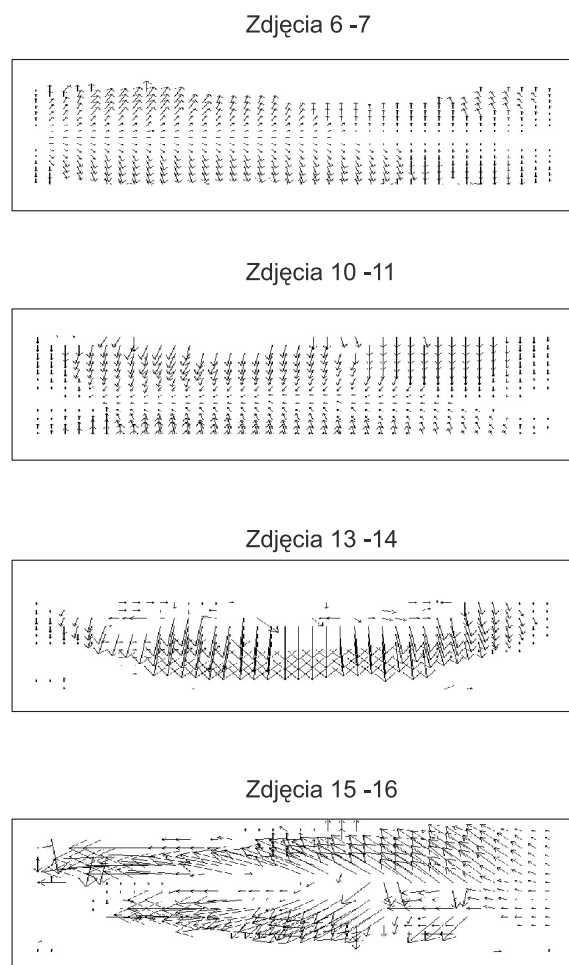
Rys. 5. Zapis ciśnień oraz i momentów wykonywania zdjęć

Przy przepływie zwrotnym (ssanie tłoka) na manometrze (p_I) rejestrowane jest podciśnienie. Na rysunku 6 przedstawiono zdjęcia modelu ($\ln p_I$) w różnych fazach odkształcania. Jak widać na zdjęciu 14 rozpoczyna się zapadanie się modelu, które wyraźnie widoczne jest na zdjęciu 16 (rys. 6).

Przeprowadzono również ilościową analizę wykonanych zdjęć za pomocą cyfrowej anemometrii obrazowej (rys. 7) (Gawor, 2008). Pomiędzy zdjęciem 6 i 7, w początkowym etapie eksperymentu (faza



Rys. 6. Zdjęcia modelu



Rys. 7. Wektory przemieszczeń modelu

wzrostu ciśnienia), następuje rozciąganie modelu. Następnie ciśnienie spada (etap ssania pompy) i następuje zapadanie się modelu (analiza zdjęć 10 i 11). Pomiędzy 13 i 14 sekundą następuje gwałtowne kurczenie modelu; widoczne są praktycznie tylko przemieszczenia radialne. Następny etap – 17 i 18 sekunda – dochodzi składowa osiowa kurczenia się modelu, co w konsekwencji powoduje zamknięcie przepływu do manometru p_1 .

Obserwowane zaciskanie się modelu było efektem niepożądanym. Aby go uniknąć spróbowano zwiększyć początkowe ciśnienie statyczne. Jednak sztywność ścianek modelu okazała się zbyt mała, aby takie postępowanie było racjonalne. Niewielki wzrost ciśnienia statycznego powodował znaczne początkowe odkształcenie modelu.

Dodatkowym celem eksperymentów było odtworzenie warunków panujących w układzie krwionym. Badany model miał nieodpowiedni stosunek średnicy do długości oraz małą sztywność ścianek.

Na tym etapie analizy wyników eksperymentów okazało się, że istotnym parametrem programu sterującego pompą jest możliwość wymuszania zmiennego w czasie przepływu tylko w jedną stronę (tłoczenie). Stwierdzono również, że zamiast modelu opartego na lateksowych walcach należy użyć modelu o większej długości, mniejszej średnicy i większej sztywności ścianek.

W dalszych badaniach wykorzystano elastyczne przewody gumowe o długości 25 cm i średnicy zewnętrznej 10 mm („baloniki modelinowe”). Sztywność ścian nowego modelu była większa od sztywności poprzednio badanych modeli.

4. Zastosowanie filtrów cyfrowych do poprawy jakości obrazu

Do wyznaczania dwuwymiarowego pola prędkości przepływu płynu lub odkształcenia przewodów elastycznych wykorzystano cyfrową anemometrię obrazową. Podstawą tej metody jest wykonywanie dwóch zdjęć w znanym odstępie czasu. Wektory przemieszczenia wyznaczane są za pomocą funkcji korelacji intensywności pikseli tworzących te zdjęcia.

Dokładność wyznaczenia przemieszczenia zależy od jakości zdjęć tj. ich ostrości, kontrastu, ilości refleksów itp. Ponieważ wykonanie idealnych zdjęć jest zadaniem trudnym, a czasem wręcz niemożliwym, do „poprawy” ich jakości niejednokrotnie konieczne jest zastosowanie metod przetwarzania obrazu, a w szczególności technik filtracyjnych (Boliner, 1990).

Na ogół w rejestrowanym obrazie mogą istnieć przypadkowe zakłócenia, które należy usunąć lub zmniejszyć ich wpływ na wyznaczanie wektorów przemieszczenia. Stosowana w badaniach filtracja obrazu polega na wzmocnieniu lub osłabieniu intensywności pikseli wpływających na jakość wyznaczania wektorów (Wojnar, 2002). Działanie filtru polega na modyfikacji poszczególnych elementów obrazu w zależności od ich otoczenia. Oznacza to, że działanie filtru jest wynikiem pewnych działań algebraicznych na liczbach opisujących kolor lub stopień szarości punktów obrazu, leżących w sąsiedztwie analizowanego punktu. Z matematycznego punktu widzenia filtr jest pewną funkcją przekształcającą jeden obraz w drugi metodą „piksel po pikselu”. Właściwości filtru wynikają wprost z analitycznych własności realizującej go funkcji (Tadeusiewicz i Korohoda, 1997).

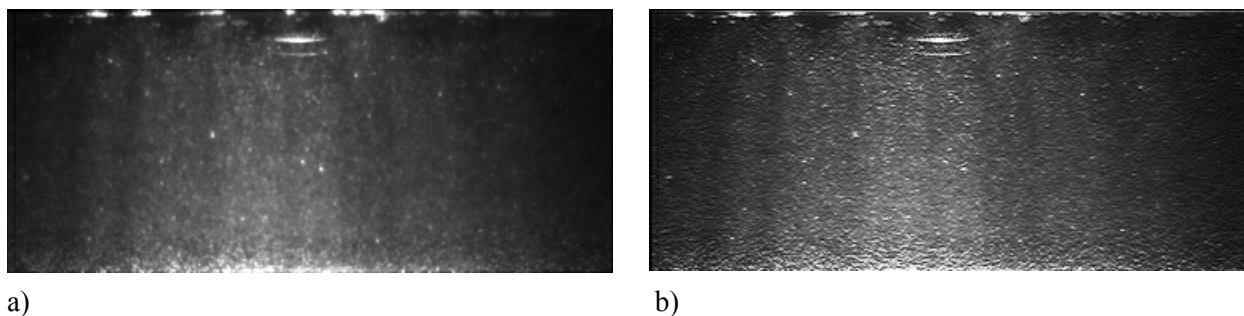
Na potrzeby niniejszej pracy, do istniejącego już programu obliczeniowego PIV (opracowanego przez autorów artykułu), zostały dopisane algorytmy realizujące poszczególne filtry:

- dolnoprzepustowe (uśredniający, kwadratowy, kołowy, piramidalny, stożkowy Gaussa),
- górnoprzepustowe (usuń średnią, przesuwania i odejmowania, gradienty kierunkowe, laplasjany)
- statystyczne (medianowy, minimalny, maksymalny).

Wymienione algorytmy były testowane na zdjęciach pochodzących z eksperymentu dotyczącego przepływu zawiesiny (woda i pyłki roślinne) w szklanej, poziomej rurce o średnicy 20mm.

Zastosowanie filtrów dolnoprzepustowych spowodowało rozmycie obrazu. Filtry tłumiły drobne szczegóły co powodowało, że cząsteczki zawiesiny stały się nierozróżnialne. Rozmycie obrazu utrudniło wyliczenie dwuwymiarowej funkcji korelacji wzajemnej, której maksimum wskazuje przesunięcie wektora w dwuwymiarowej płaszczyźnie.

Natomiast zastosowanie filtrów górnoprzepustowych pozwoliło wydobyć większą ilość informacji ze zdjęcia. W wyniku działania filtrów górnoprzepustowych otrzymano wyostrenie obrazu, w szczególności krawędzi obiektów. Pozwoliło to na obliczenie większej ilości wektorów korelacji. Na rysunku 8 przedstawione zostało działanie filtra górnoprzepustowego.



Rys. 8 Działanie filtru Laplace'a. a) zdjęcie oryginalne; b) zdjęcie po filtracji obrazu oryginalnego

W wyniku zastosowania filtru Laplace'a (Tadeusiewicz i Korohoda 1997) o masce przedstawionej na rysunku 9 otrzymujemy obraz wyostrzony. Dzięki temu kontury znaczników w wodzie są wyraźniejsze.

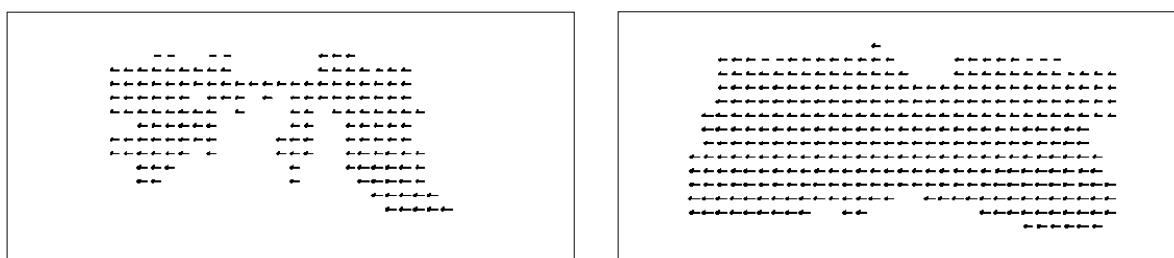
-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

Rys. 9. Maska filtru Laplace'a

W celu określenia jakościowego znaczenia filtrów w cyfrowej anemometrii obrazowej, wyznaczono pole prędkości przepływu zawiesziny pyłków kwiatowych w wodzie przez poziomą rurkę. Strzałki na rysunku 10 obrazują wektory prędkości przepływu cieczy.

Jakościowa analiza pozwala stwierdzić że zastosowanie filtru Laplace'a o masce przedstawionej na rysunku 9 daje dobre wyniki. Dzięki znacznemu wyostreniu szczegółów obrazu, jakimi są m.in. cząstki pływające w wodzie, możemy uzyskać pełniejszy profil wektorów prędkości przepływu.

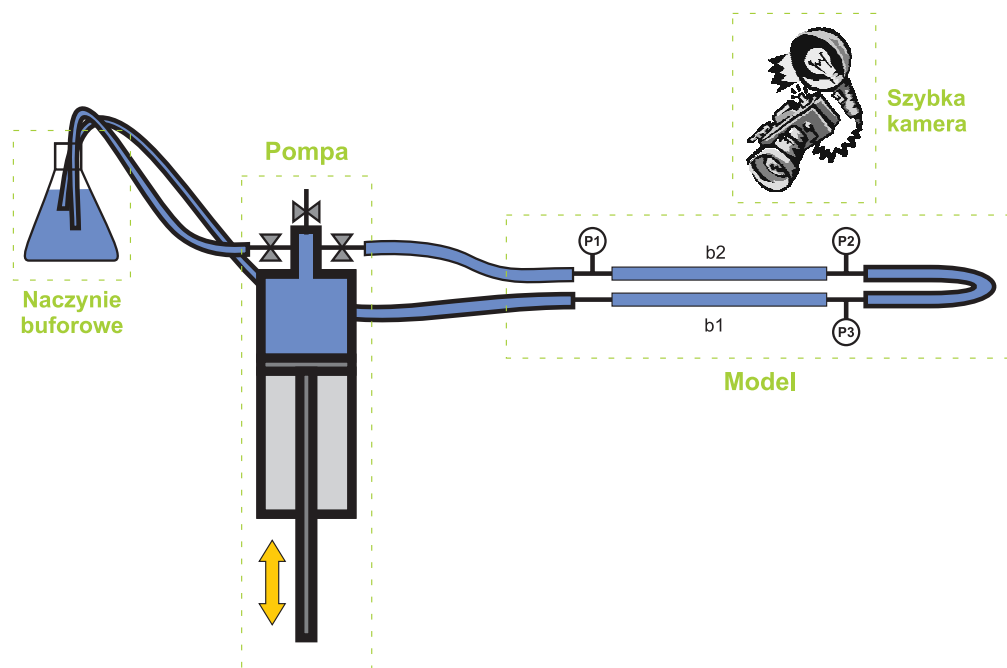
W dalszych badaniach zostanie przeprowadzona ilościowa analiza znaczenia filtrów w metodzie cyfrowej anemometrii obrazowej.



Rys. 10. Wektory prędkości wyznaczone metodą PIV. a) wektory prędkości przepływu dla obrazu oryginalnego, b) wektory prędkości przepływu dla obrazu po zastosowaniu filtru Laplace'a

5. Opis stanowiska pomiarowego

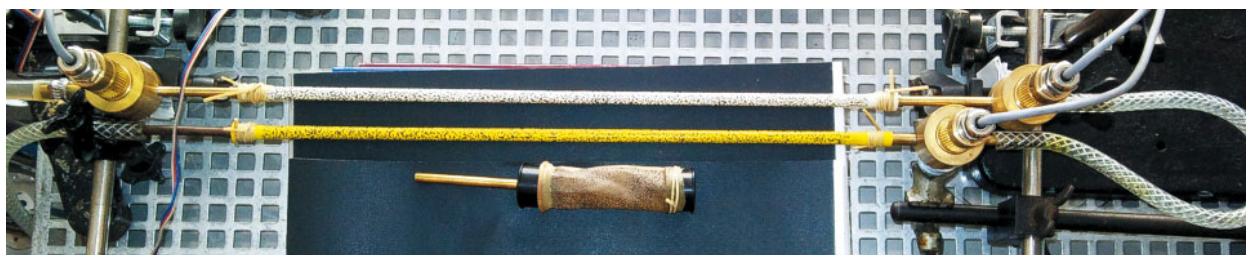
Po analizie wyników eksperymentów z elastycznymi walcami o małej smukłości (Cierniak i in., 2009b) postanowiono zmienić elastyczne elementy w modelu. W celu lepszego odwzorowania przepływu krwi w naczyniach krwionośnych jako modele tych naczyń wybrano baloniki modelinowe. Baloniki modelinowe (gumowe zabawki umożliwiające po nadmuchaniu kształtowanie różnych form) mają kształt walca o początkowych parametrach: średnica ok. 10 mm i długość ok. 30 cm. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 11 (na rysunku wyróżniono trzy grubości linii elementów modelu co symbolizuje faktyczne różnice w średnicy i sztywności ich ścianek).



Rys. 11. Schemat stanowiska pomiarowego – długie elastyczne walce

Badany model stanowiły dwa baloniki modelinowe (b_1 i b_2). Baloniki połączono rurką igelitową, którą zgięto pod kątem 180° . Dzięki temu baloniki były ułożone równolegle (Fot. 1), co umożliwiała ich jednoczesne fotografowanie.

Przepływ wytwarzany był przez pompę zmiennego wydatku. Mierzono ciśnienia przed balonikiem b_1 (p_1) za balonikiem b_1 (p_2) i przed balonikiem b_2 (p_2). Początkowe ciśnienie statyczne p_{st} zależało od położenia naczynia buforowego względem modelu (ciśnienie hydrostatyczne).

Fot. 1. Zdjęcie modelu
(do zdjęcia dołączono widok nakładki lateksowej na palec)

Zdjęcia odkształceń modelu wykonywane były przy pomocy szybkiej kamery cyfrowej (Gawor, 2000). Model oświetlano dwoma układami liniowo ułożonych diod świecących, każdy zawierał 6 diod. Moc każdej diody wynosiła 0.3 mW.

W eksperymencie wykorzystano dwa komputery typu PC. Jeden sterował pracą pompy zmiennego wydatku. Drugi komputer służył do akwizycji danych pomiarowych.

Rejestracja danych pomiarowych polegała na:

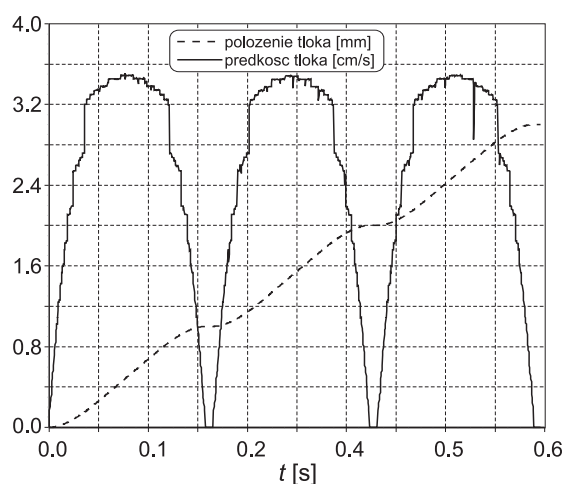
1. wykonaniu zadanej liczby zdjęć, z zadaną częstotliwością i w określonych momentach czasowych (program obsługi cyfrowej kamery MARCO),
2. rejestracji napięć poprzez przetwornik analogowo/cyfrowy (WaveBook 516) – rejestrowe były ciśnienia wskazywane przez manometry, momenty wykonania zdjęć, moment przyjscia triggera.

W celu synchronizacji zmian ciśnienia oraz momentów wykonywania zdjęć wykorzystano układ komparatora. W chwili przekroczenia ciśnienia na manometrze (p_1) powyżej 6 kPa wyzwalał on rejestrację napięć z czujników ciśnienia oraz wykonywanie zdjęć przez kamerę. Rejestracja momentów wykonanych zdjęć (błyski diod) oraz przebiegów ciśnienia umożliwiła korelację wartości ciśnienia i odkształcenia modelu.

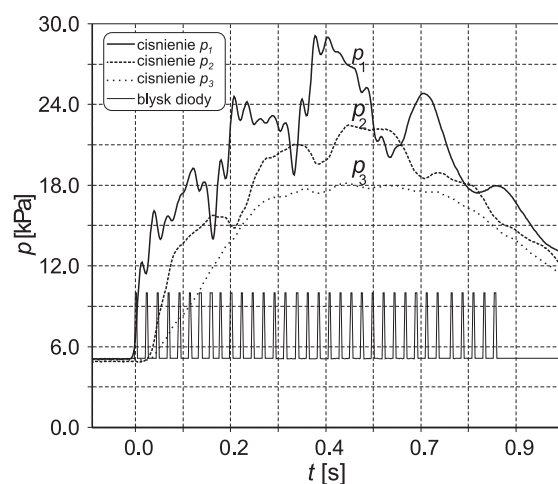
6. Opis przeprowadzonych eksperymentów

Wykonano eksperyment, w którym wywoływano przepływ wody w modelu w taki sposób, że tłok pompy poruszał się w jednym kierunku. Generowano trzy połówki okresu funkcji sinus. Położenie tłoka (krzywa przerywana) i jego prędkość (krzywa ciągła) przedstawiono na rysunku 12. Częstotliwość ruchu tłoka wynosiła 4 Hz, a amplituda tłoka 1 mm, co w przeliczeniu na prędkość przepływu w baloniku b_1 wynosi¹: 0–66 cm/s. W eksperymencie rejestrowano pięć napięć: sygnał triggera, ciśnienia p_1 , p_2 , p_3 , napięcie na diodach (dynamika wejściowa napięć przetwornika A/C wynosiła ± 5 V). W każdym kanale rejestrowane było 8192 16-to bitowych próbek; ilość próbek pretiggera wynosiła 500. Częstotliwość próbkowania wynosiła 0.4 kHz. Poziom wyzwalał triggera przeliczony na wartość ciśnienia wynosił 6 kPa.

Na rysunku 13 przedstawiono zarejestrowane zmiany ciśnienia. Dolny wykres przedstawia moment wykonania zdjęć (napięcia na diodach).



Rys. 12. Położenie tłoka i jego prędkość



Rys. 13. Ciśnienia i moment wykonania zdjęć

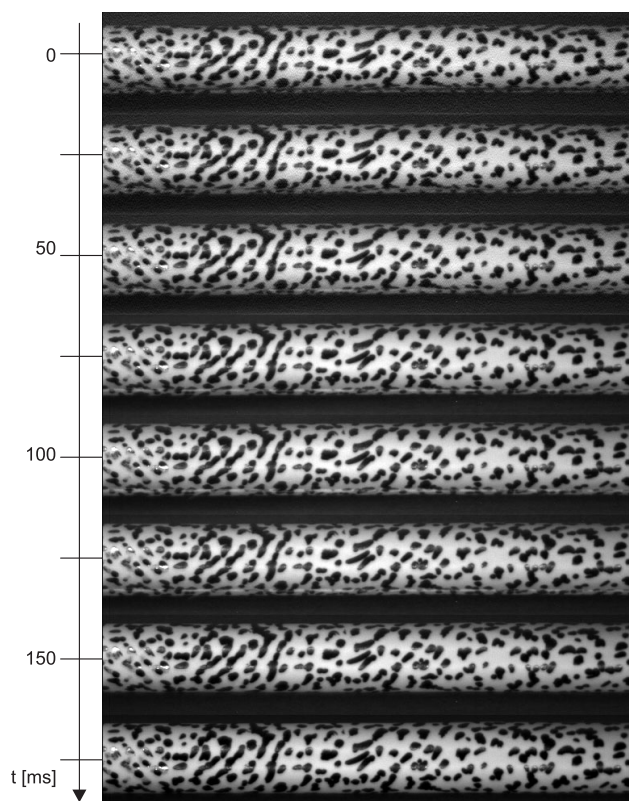
Kamerą wykonywano serie 8 zdjęć co 25 ms. Rysunek 14 przedstawia pierwszą serię zdjęć wykonaną w czasie od 0 do 175 ms. Fotografowano pierwszy balonik (b_1) w środkowej jego części na długości 7.7 cm. Czas błysku diod wynosił 6 ms. Opóźnienie triggera ustawiano na: 0, 171, 348, 524, 654 ms. Tak ustawiane opóźnienie pierwszego zdjęcia względem sygnału wyzwalającego pozwoliło na wykonanie zdjęć modelu w czasie od 0 do 850 ms.

Rysunek 15 przedstawia, wyznaczone za pomocą cyfrowej anemometrii obrazowej, przemieszczenia fragmentów fotografowanego obiektu. Analizy dokonano wybierając zdjęcia wykonane z interwałem czasu 50 ms. Czas wykonania zdjęć, liczony od momentu przyjscia sygnału wyzwalającego, podano w legendzie rysunku. Wymuszony przepływ następował z prawej strony do lewej.

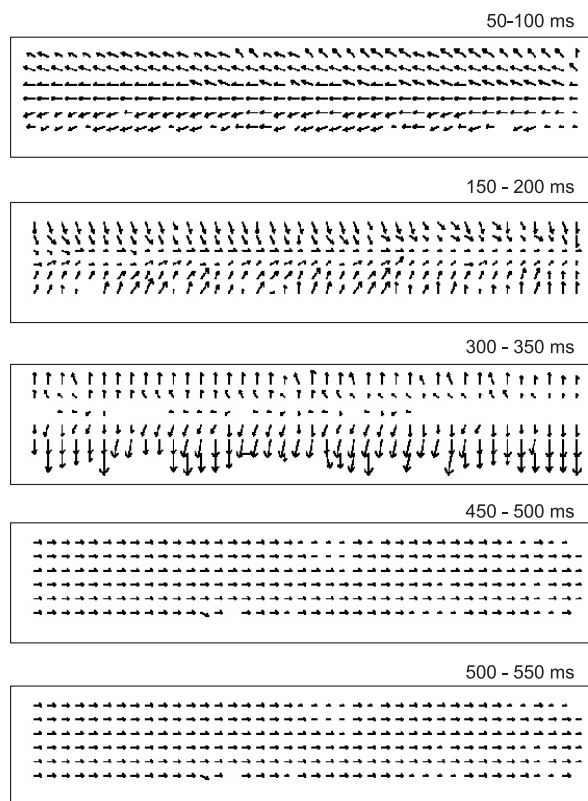
Przedstawiono odkształcenie balonika w wybranych momentach czasowych. W fazie początkowej (50 – 100 ms) następuje przemieszczenie obserwowanego fragmentu w kierunku przepływu z niewielkim odkształceniem radialnym („puchnięcie” balonika). Kolejna faza (150 – 200 ms) przedstawia przemieszczenie obserwowanego fragmentu w kierunku przeciwnym do przepływu z wyraźnym „zapadaniem” balonika. Następnie pomiędzy czasem 300 do 350 ms następuje wyraźne odkształcenie radialne (rozszerzanie) praktycznie bez odkształcenia osiowego. Dwa kolejne przykłady (450 – 500 i 500 – 550 ms) obrazują przypadek odwrotny – odkształcenia osiowe i niemal brak radialnych.

¹ Przyjęto, że spoczynkowa, wewnętrzna średnica przekroju poprzecznego balonika wynosi 9 mm.

Prezentowane przykłady ilustrują ewolucję odkształceń osiowych i radialnych w modelu. Wraz z upływem czasu zmieniają one kierunek (rozszerzanie i kurczenie) i wartość. Zaobserwowane odkształcenia przyjmują wartości maksymalne od 0.1 do 0.6 mm z szybkością od 0.2 do 1.2 cm/s. Niestety na podstawie wykonanych zdjęć i dalszej ich analizy nie można określić prędkości fali odkształcenia propagującej wzdłuż modelu.



Rys. 14. Zdjęcia modelu (pierwszy balonik b_1)



Rys. 15. Przemieszczenia powierzchni modelu

7. Analiza wyników pomiarów

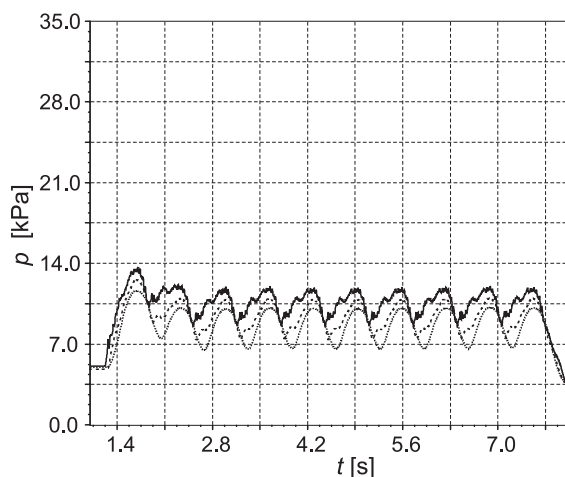
Wykonano serię eksperymentów, w których wymuszano przepływ wody w modelu. W eksperymentach zmieniano częstotliwość posuwu tłoka pompy oraz amplitudę jego ruchu. Ze względu na występujące w modelu opory przepływu objawiające się m.in. zmianami średnicy przewodów oraz fakt, że model stanowi układ elastycznych przewodów, częstotliwość i amplitudę pompy dobierano tak, aby nie nastąpiło znaczne odkształcenie modelu. I tak, przy małej częstotliwości ruchu tłoka wynoszącej 0.2 Hz amplituda wynosiła 10, 5, i 2 mm, a przy większych częstotliwościach 0.5 mm. W ustalonym przekroju o średnicy $\varphi = 9 \text{ mm}^2$ przekłada się to na prędkość przepływu w zakresie od 6.6 do 82 cm/s.

Wstępnej analizie poddano zapisy ciśnień cieczy w wybranych punktach modelu oraz odkształcenia jednego z naczyń elastycznych.

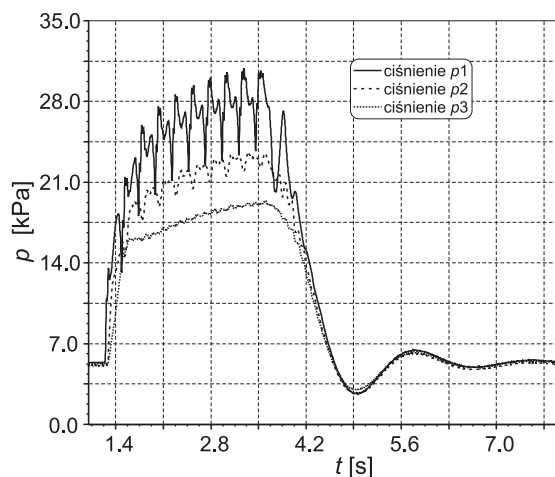
Na rysunku 16 przedstawiono zmiany ciśnienia rejestrowane manometrami p_1 , p_2 i p_3 w jednym z eksperymentów. Generowany był przepływ o częstotliwości 1 Hz i amplitudzie 1 mm. Z wykresów widać, że na początku ciśnienie rośnie od wartości równej ciśnieniu statycznemu, czyli ok. 5 kPa do wartości 13.5 kPa. Następnie wartości ciśnienia oscylują wokół średnich, wynoszących odpowiednio dla kolejnych manometrów: 10.5, 9.4 i 8.7 kPa. Zmniejszanie się średniego poziomu ciśnienia w modelu związane jest z występowaniem w nim oporów przepływu. Amplituda oscylacji jest podobna dla wszystkich manometrów i wynosi 3.3 kPa.

² Przyjęto, że jest to spoczynkowa, wewnętrzna średnica przekroju poprzecznego balonika.

Rysunek 17 przedstawia zmiany ciśnienia w eksperymencie, w którym częstotliwość ruchu tłoka wynosiła 5 Hz. Średnie wartości ciśnień w stanie ustalonym wynoszą 26.7, 21.6 i 17.8 kPa. Amplitudy ciśnienia rejestrowane przez kolejne manometry maleją i wynoszą odpowiednio dla manometru p_1 6.1 kPa, p_2 1.7 kPa i p_3 0.4 kPa. Następuje więc niemal całkowite wygaszenie oscylacji. Można zauważyć złożoną strukturę częstotliwościową zmian ciśnienia. Analiza fourierowska pokazała, że dla manometrów p_1 i p_2 amplitudy transformaty Fouriera dla składowej podstawowej i jej pierwszej harmonicznej są zbliżone.



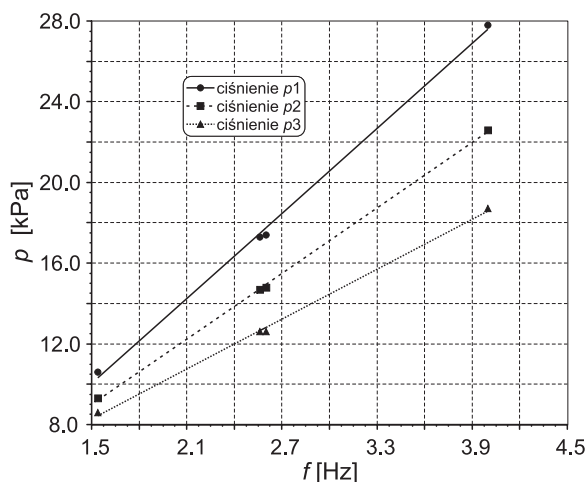
Rys. 16. Ciśnienia na manometrach p_1 , p_2 i p_3 (częstotliwość 1 Hz, amplituda 1 mm)



Rys. 17. Ciśnienia na manometrach p_1 , p_2 i p_3 (częstotliwość 5 Hz, amplituda 1 mm)

Obserwowany spadek średniego poziomu ciśnienia wzdłuż modelu świadczy o występowaniu znacznych oporów przepływu związanych z: lepkością cieczy, oddziaływaniem cieczy ze ściankami przewodów oraz ze zmianami średnicy hydraulicznej przewodów. Natomiast wygaszanie się oscylacji ciśnienia należy wiązać przede wszystkim z mechanicznym współoddziaływaniem przepływającej cieczy i elastycznych ścianek przewodów. Ścianki te ulegały odkształceniom zarówno radialnym, jak i osiowym. Wzbogacały tym samym spektrum wymuszonych częstotliwości przepływu o nowe składowe – z jednej strony oraz buforowały maksima zmian ciśnienia – z drugiej.

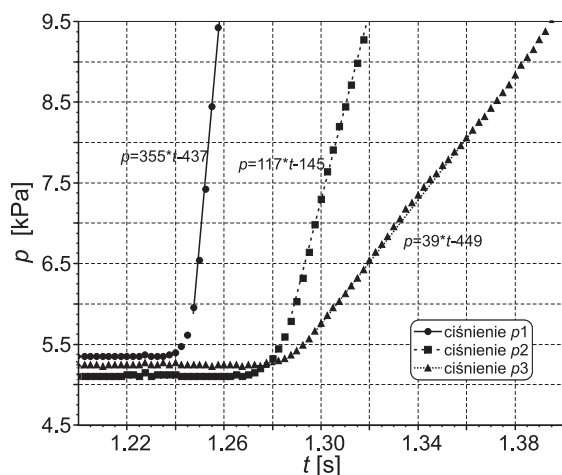
Na rysunku 18 przedstawiono zbiorczą zależność średniego ciśnienia od częstotliwości w eksperymentach, w których amplituda ruchu tłoka wynosiła 1 mm. Wynika z niego, że wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie średnia wartość ciśnienia, a więc wrasta opór przepływu.



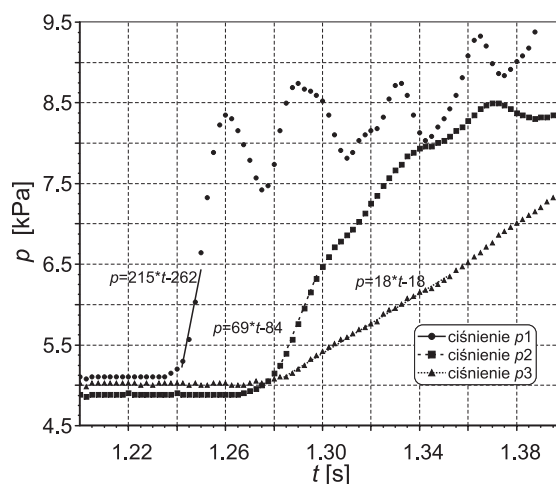
Rys. 18. Zależność średniego poziomu ciśnienia od częstotliwości ruchu tłoka

Na rysunkach 19 i 20 przedstawiono zmiany ciśnienia w początkowej fazie jego narastania dla dwóch wybranych eksperymentów. Wyznaczając czas pomiędzy momentami początku wzrostu ciśnienia obserwowanymi przez sąsiadujące manometry oraz znając odległości pomiędzy nimi można oszacować prędkość propagacji fali ciśnienia na tych odcinkach (prędkość dźwięku).

Uzyskane wyniki wskazują, że prędkość propagacji fali ciśnienia nie zależy od częstotliwości i wynosi – pomiędzy manometrem p_1 i p_2 (jest to odległość związana z długością pierwszego balonika) 10 m/s. W przypadku manometrów p_2 i p_3 (wzdłuż zbrojonej, zakrzywionej rurki igelitowej) prędkość dźwięku wynosiła 24 m/s.



Rys. 19. Początek zmian ciśnienia w jednym z zarejestrowanych eksperymentów



Rys. 20. Początek zmian ciśnienia w jednym z zarejestrowanych eksperymentów

Na wykresach z rysunków 19 i 20 widoczne są różnice w szybkości narastania ciśnienia. Miarą tej szybkości może być współczynnik kierunkowy α prostej dopasowanej do punktów reprezentujących początkowe zmiany ciśnienia. W szczególności widać wyraźnie, że wykres z rysunku 19 reprezentuje eksperyment, w którym wymuszenie przepływu odbyło się dynamicznej, niż w przypadku wykresu z rysunku 20.

Opory przepływu w modelu oraz sposób współoddziaływania elastycznych ścianek z cieczą warunkują propagację sygnałów ciśnieniowych. Gdyby przepływ następował w prostoliniowych przewodach sztywnych wszystkie manometry rejestrowałyby zbliżoną szybkość narastania ciśnienia. Tu tak nie jest – stosunki współczynników α odnoszących się do sąsiadujących manometrów (a więc α_1/α_2 i α_2/α_3) przyjmują różne wartości w jednym i drugim eksperymencie (rys. 19 i 20). Świadczy to o tym, że charakterystyka dynamiczna analizowanego modelu jest zależna od częstotliwości wymuszenia.

Pracę wykonano w ramach zadań statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN pt. „Eksperymentalne i teoretyczne badania przepływów pulsacyjnych w rozgałęzionych naczyniach elastycznych” w 2010 roku.

Literatura

1. Bębenek B., 1999. *Przepływy w układzie krwionośnym*. Politechnika Krakowska, Kraków.
2. Boliner J., 1990. *On the accuracy of digital particle image velocimetry system*. Institutionen För Värme-och Kraftteknik Strömningsteknik, Lunds Tekniska Högskola. Technical Raport.
3. Cierniak W., Gawor M., Gorgoń J., Mnich-Medoń K., Tichoruk M., 2009a. *Eksperymentalne badanie odkształceń elastycznych przewodów metodą cyfrowej anemometrii obrazowej*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków.
4. Cierniak W., Gawor M., Gorgoń J., Mnich-Medoń K., Tichoruk M., 2009b. *Stanowisko do pomiarów odkształceń elastycznych przewodów oraz ciśnienia przy różnych warunkach brzegowo – początkowych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków.
5. Cieśliski K., 2001. *Hydrodynamiczne uwarunkowania krążenia mózgowego*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.

6. Gawor M., 2000. Zastosowanie kamery CCD do badania szybkich procesów pojedynczych i periodycznych. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków.
7. Gawor M., 2008. *Opis metody i stanowiska pomiarowego do badania przepływów pulsacyjnych w elastycznych przewodach*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków.
8. Hiller W.J., Kowalewski T.A., Tatarczyk Th., 1996. *High speed imaging with a frame-transfer CCD*. Int. Cong. High-Speed-Photography Victoria, Canada, 21-25 Sept. 1992.
9. Tadeusiewicz R., Korohoda P., 1997. *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Kraków.
10. Wetter E., Kenner Th., 1968. *Grundlagen der Dynamic des Arterienpulses*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York.
11. Wojnar J., 2002. *Praktyka analizy obrazu*. Kraków.

Measurements of pressure waves and strains in the simple net of elastic tubes

Abstract

Main goal of the presented work was to elaborate methodics of measurements of flows of fluids and strains of elastic tubes. Particle image velocimetry (PIV) method was used in this research.

Literature study was conducted allowing development of enhanced image analysis algorithms. These algorithms were applied to pictures taken during PIV measurements and resulted in more precise velocity vectors calculations.

Measurements of strains of elastic tubes were conducted with use of a model made of various types of elastic materials. Periodically changeable flows of water inside of tubes were induced by means of a computer controlled piston pump. Pressure evolution analysis was carried out in respect to velocity of flow and frequency of its changes.

Keywords: particle image velocimetry, strains of elastic tubes