

Eksperymentalne badanie odkształceń elastycznych przewodów metodą cyfrowej anemometrii obrazowej

WŁADYSŁAW CIERNIAK, MAREK GAWOR, JERZY GORGOŃ, KATARZYNA MNICH-MEDOŃ,
MARTA TICHORUK

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki eksperymentów dotyczących badania odkształceń elastycznych przewodów. W pomiarach odkształceń elastycznych przewodów wykorzystano cyfrową anemometrię obrazową, która została zastosowana do wyznaczenia dwuwymiarowych pól prędkości przepływu. Odkształcenia modelu (lateksowa nakładka na palec) były wywoływane poprzez upuszczanie ciężarka na plastikowy worek, co prowadziło do zmiany jego objętości.

W celu analizy odkształcenia w różnych fazach wykonywano serię kilkudziesięciu zdjęć opóźniając wykonanie pierwszego zdjęcia względem sygnału wyzwajającego. Rejestracja momentu wykonanych zdjęć (błysk diody) oraz ciśnienia umożliwiła korelację wartości ciśnienia i odkształcenia modelu.

Analizie poddano odkształcenia modelu w zależności od ilości wody wypełniającej lateksową nakładkę na palec. Zaobserwowano różne profile odkształceń w zależności od ilości wody. Zbadano także korelacje ciśnienia gazu i odkształcenia modelu obrazujące ewolucję ciśnienia w trakcie eksperymentu.

Analiza wyników pomiarowych prowadzi do wniosku, że zaproponowane eksperymenty dostarczają cennych informacji dotyczących odkształceń i szybkości tych odkształceń w modelach elastycznych.

Słowa kluczowe: cyfrowa anemometria obrazowa, odkształcenia w przewodach elastycznych

1. Wstęp

Mechanizmy przepływu krwi w układzie krążenia przypominają pod pewnymi względami analogiczne procesy transportu płynów jednorodnych i zawiesin. Przepływ w naczyniach krwionośnych odbywa się w skomplikowanej geometrycznie i topologicznie sieci elastycznych kanałów. Poznanie mechanizmu przepływu krwi jest możliwe poprzez:

- badanie właściwości przepływowych rzeczywistych naczyń lub ich fizycznych modeli,
- eksperymentalne badanie pól prędkości metodą anemometrii obrazowej,
- numeryczne rozwiązywanie równań ruchu cieczy w modelach segmentów naczyniowych o znanej geometrii.

Powszechnie przyjmuje się, że 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).

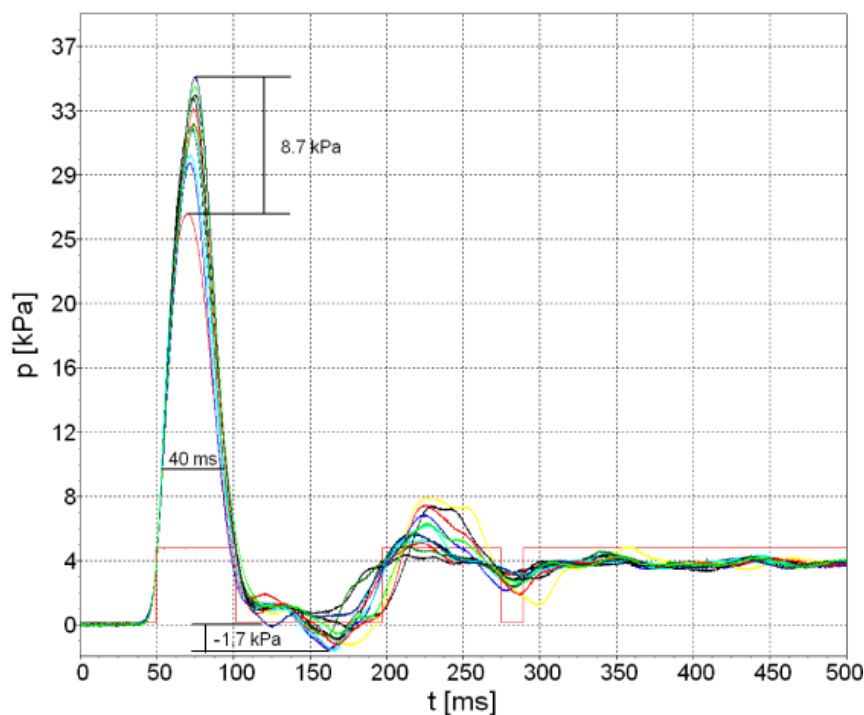
Przeprowadzono zatem doświadczenia dotyczące pomiaru odkształcenia i prędkości odkształcenia elastycznych ścianek lateksowej nakładki na palec wypełnionej wodą. Odkształcenia modelu zostały wywołane tak, aby ciśnienie w nim panujące było bliskie ciśnieniu tętniczemu (ok. 30 kPa, 225 mmHg). Czas trwania impulsu ciśnienia wynosił ok. 50 ms, a więc również był zbliżony do czasu tętna w układzie krwionośnym.

Badanie odkształceń elastycznych ścian zostało zrealizowane metodą analizy obrazu znaczników (kropek) naniesionych na zewnętrzną stronę ścianki modelu. Wykonanie dwóch zdjęć w znanym odstępnie

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 otwarcia migawki (Gawor 2000). Dało to możliwość obserwacji procesów odkształcania modelu w różnych fazach.

2. Analiza przebiegu ciśnienia w modelu

Schemat eksperymentu przedstawiono w pracy (Cierniak i in., 2010). Model naczynia elastycznego stanowiła lateksowa nakładka na palec – „walec” o wysokości 74 mm i średnicy 20 mm (Gawor, 2008). Skok ciśnienia w modelu został wymuszony poprzez upuszczenie ciężarka o masie 0.94 kg na plastikowy worek. Wymuszone oddziaływanie, poprzez przewody wypełnione powietrzem o zadanym ciśnieniu, powodowało powstanie skokowej zmiany ciśnienia w modelu wypełnionym wodą. Zmiany ciśnienia wywoływane przez ciężarek upadający na plastikowy worek nie są powtarzalne. Jest to spowodowane siłami tarcia ciężarka o ścianki rury. Siły te zmieniają się w zależności od sposobu upuszczania ciężarka. Na rys. 1 przedstawiono przebiegi ciśnienia zarejestrowane podczas jednego cyklu eksperymentu. Różnica pomiędzy maksymalną (34.8 kPa), a minimalną (26.2 kPa) wynosi 8.7 kPa co stanowi ok. 30%. Trudno odnieść się do problemu jak tak duża różnica maksymalnej wartości ciśnienia wpływa na odkształcenie modelu. Wybór takiego sposobu wymuszenia zmian ciśnienia spowodowany był tym, że uzyskiwane maksymalne ciśnienie jest zbliżone do ciśnienia tętniczego podczas skurczu serca. Czas trwania impulsu, wyznaczony w połowie wysokości impulsu wynosi ok. 40 ms. Jak można zauważyć, analizując przebiegi ciśnień na rys. 1, w 150 ms występuje podciśnienie. Efekt ten daje się zauważyć tylko wtedy, gdy w modelu znajduje się duża ilość wody.



Rys. 1. Przebieg ciśnienia w modelu

3. Wpływ ilości wody w modelu na jego odkształcanie

3.1. Metoda pomiaru

Celem przedstawionych eksperymentów było zbadanie odkształceń i szybkości odkształceń elastycznych przewodów w zależności od ilości płynu znajdującego się w modelu.

Do analizy obrazu zostały ustalone następujące parametry eksperymentu:

- czas między zdjęciami wynosił 5 ms lub 10 ms,

- opóźnienie pierwszego zdjęcia względem sygnału wyzwalającego, które umożliwiało analizę procesu w kolejnych fazach odkształcenia $\tau = (0-655 \text{ ms})$,
- początkowe ciśnienie w modelu p_0 – okazało się, że przy małej ilości wody w nakładce lateksowej przy ciśnieniu atmosferycznym następuje „zapadanie się” modelu.

W zależności od charakteru odkształceń modelu analizę podzielono na sześć faz. W tabeli 1 zestawiono parametry charakterystyczne dla poszczególnych eksperymentów.

Tab. 1. Zestawienie parametrów eksperymentu

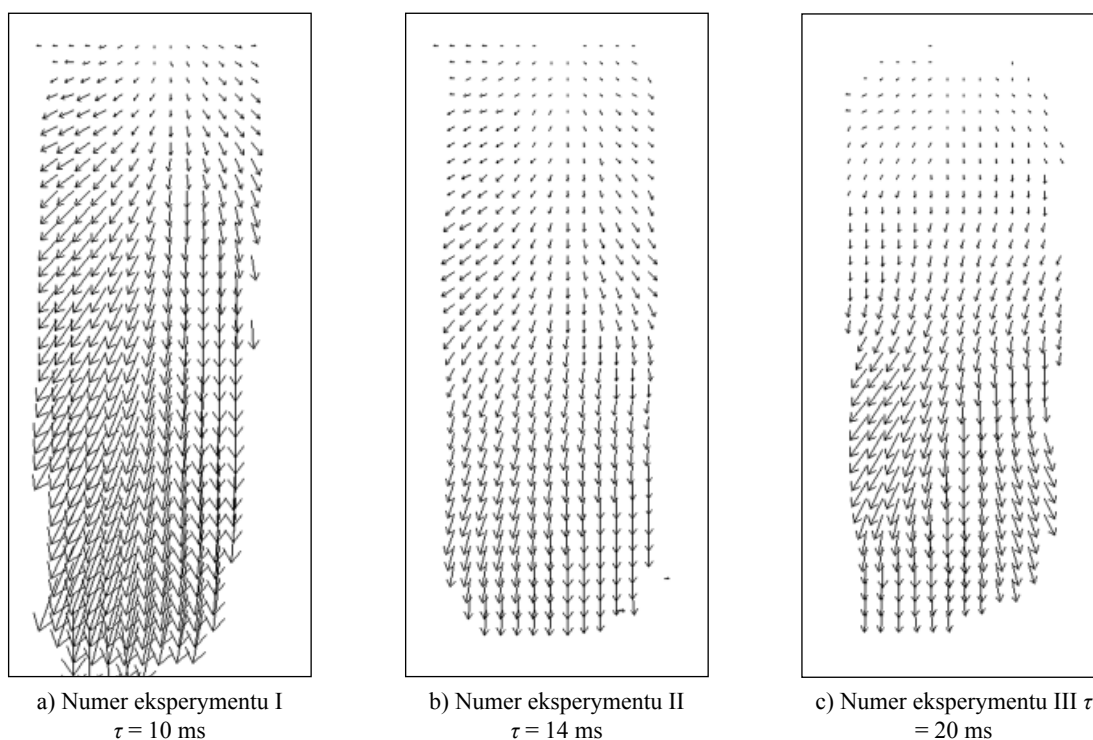
Numer eksperymentu	I	II	III
Ilość wody w modelu [mm]	47	64	74
Procentowa ilość wody [%]	64	86	100
Ciśnienie początkowe [kPa]	1.3	1.5	0
Czas między zdjęciami [ms]	10	5	5
Zakres czasowy [ms]	0-650	0-100	0-600
Ilość zdjęć	53	50	76

3.2. Opis uzyskanych rezultatów

Cechą charakterystyczną odkształceń było rozciąganie modelu w dół, a następnie pojawienie się odkształcenia poziomego w górnej części modelu. Ilość wody w modelu determinowała moment i miejsce pojawienia się odkształcenia, jego wielkość, „kształt” (rozumiany jako rozciąganie lub ściskanie w kierunku poziomym i pionowym) oraz ewolucję odkształceń w czasie. Zaobserwowano także zmianę profilu prędkości (odkształcenia) prowadzącą do lokalnego odwrócenia kierunku przepływu (podciśnienie).

Analiza składowych pionowych i poziomych prędkości pozwala na prześledzenie ewolucji czasowej odkształcenia modelu. Strzałki na przedstawionych poniżej wykresach obrazują wektory prędkości odkształcenia modelu.

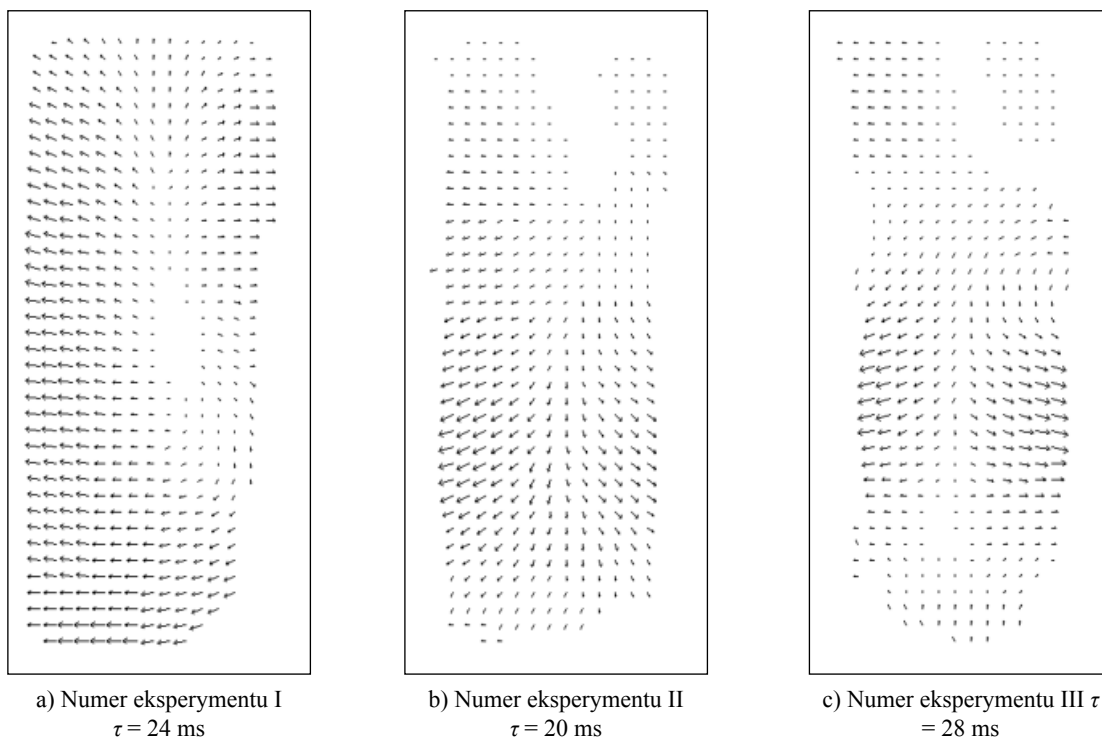
W pierwszej fazie eksperymentów następuje rozciąganie modelu w kierunku pionowym, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej składowej v_y . Na rys. 2 przedstawiono rozkłady wektorów prędkości odkształcenia w zależności od poziomu wody wypełniającej model. Rozkłady zostały tak dobrane, aby pokazać momenty maksymalnego odkształcenia modelu. Maksymalne odkształcenie modelu następowało w jego



Rys. 2. Rozciąganie modelu w kierunku pionowym (pierwsza faza eksperymentu)

dolnej części i związane było z jego rozciąganiem w kierunku pionowym. Jak można zauważyć im większa ilość wody w modelu tym później osiągnięte jest maksymalne odkształcenie w kierunku pionowym. Na rys. 2 przedstawiono profile prędkości odpowiednio dla opóźnień: eksperyment I ($\tau = 10$ ms), eksperyment II ($\tau = 14$ ms), eksperyment III ($\tau = 20$ ms). Maksymalne wartości składowej prędkości wynosiły odpowiednio: $v_{y,I} = 39.7$ cm/s, $v_{y,II} = 29.3$ cm/s, $v_{y,III} = 31.7$ cm/s.

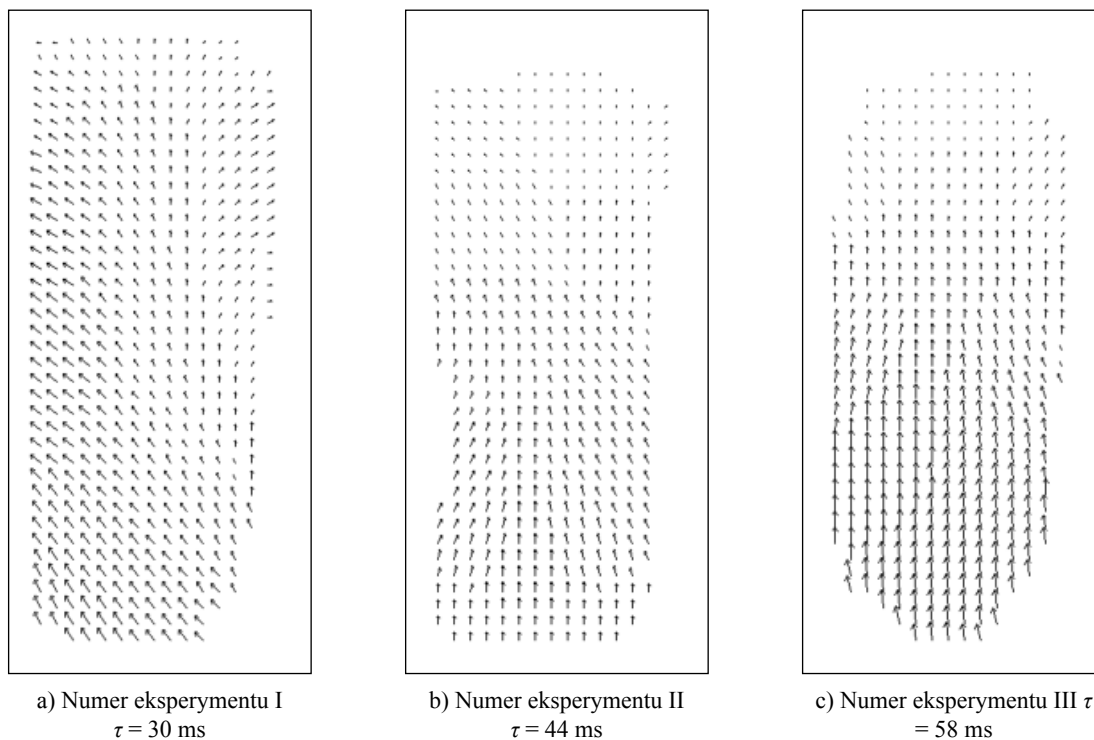
W drugiej fazie eksperymentów, tj po osiągnięciu maksymalnej wartości składowej prędkości v_y , model zaczyna się kurczyć. Maleje składowa prędkości v_y , wzrasta natomiast składowa prędkości v_x . Widoczne są odkształcenia poziome na bocznych ściankach modelu (rys. 3). Na rysunkach przedstawiono odkształcenie na ściankach bocznych modelu, odpowiednio dla eksperymentu: I ($\tau = 24$ ms), II ($\tau = 20$ ms), III ($\tau = 22$ ms). Analizując rys. 3 można zauważyć, że kiedy poziom wody w modelu stanowi około połowę całej objętości obserwujemy silne odkształcenia dolnej części modelu w lewą stronę (maksymalna wartość prędkości odkształcenia wynosi $v_x = -8.6$ cm/s, $v_y = 0$ cm/s). Odkształcenie jest silnie zorientowane tylko z lewej strony modelu. W przypadku wypełnienia wodą całości modelu, odkształcenia rozkładają się w miarę symetrycznie po obu stronach modelu.



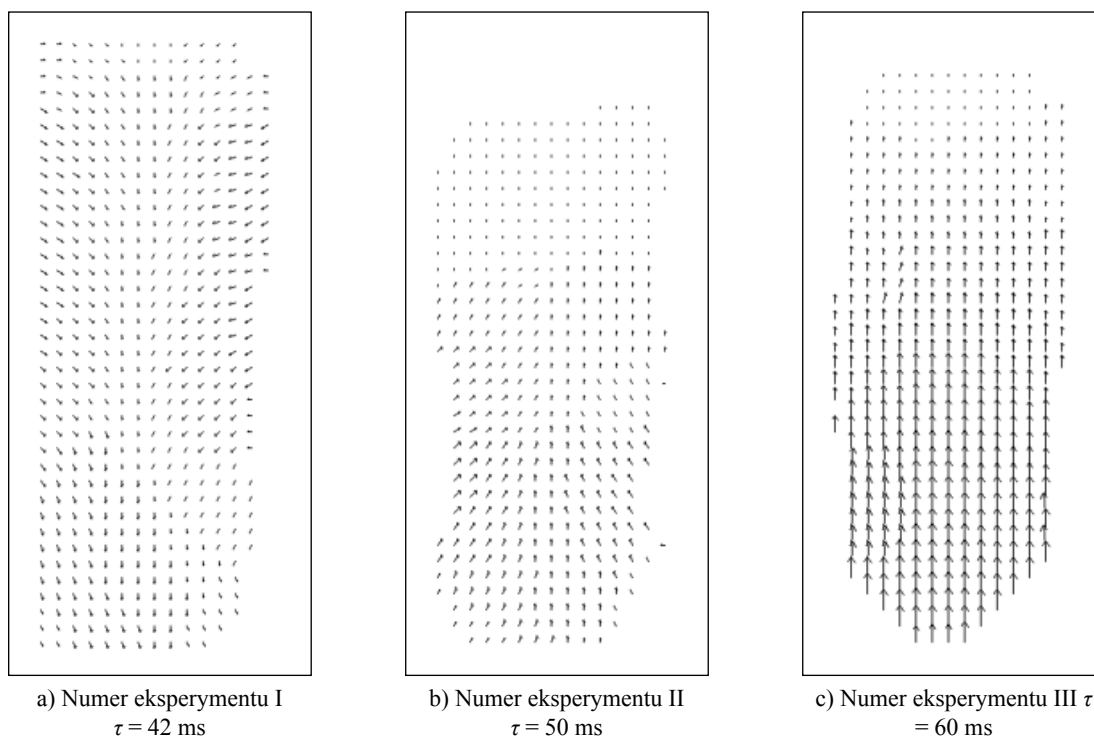
Rys. 3. Kurczenie się modelu w pionie widoczne odkształcenia poziome (druga faza eksperymentu)

W trzeciej fazie eksperymentu (rys. 4) następuje lokalne odwrócenie kierunku przepływu, widoczne jako zmiana orientacji wektorów prędkości. Wartość składowej prędkości v_y rośnie, natomiast wektor ma zwrot przeciwny (kurczenie modelu w dolnej części). Można zauważyć że, im większa ilość wody w modelu tym później zachodzi odwrócenie składowych pionowych wektorów prędkości i później osiągnięta jest wartość maksymalna v_y związana z kolejnym rozciąganiem i kurczeniem w kierunku pionowym. Ponadto wartość odkształcenia jest większa dla modelu z większą ilością wody i zorientowana bardziej jednorodnie w kierunku pionowym. Na rys. 4 przedstawiono zmianę orientacji wektorów prędkości odpowiednio dla eksperymentów: I ($\tau = 30$ ms), II ($\tau = 44$ ms), III ($\tau = 58$ ms). Maksymalna wartość składowej prędkości pionowej wynosi odpowiednio: $v_{y,I} = -7.4$ cm/s, $v_{y,II} = -12.2$ cm/s, $v_{y,III} = -21.9$ cm/s.

W czwartej fazie (rys. 5), dla eksperymentu I ($\tau = 42$ ms) i II ($\tau = 50$ ms) następuje ściskanie w kierunku poziomym, z równoczesnym zachowaniem składowych wartości prędkości v_y zorientowanych w dół (I eksperyment) i do góry (II eksperyment). W przypadku III eksperymentu ($\tau = 60$ ms) następuje stopniowe osłabianie odkształcenia pionowego z równoczesnym brakiem wystąpienia odkształceń w kierunku poziomym.



Rys. 4. Lokalne odwrócenie kierunku przepływu (trzecia faza eksperymentu)

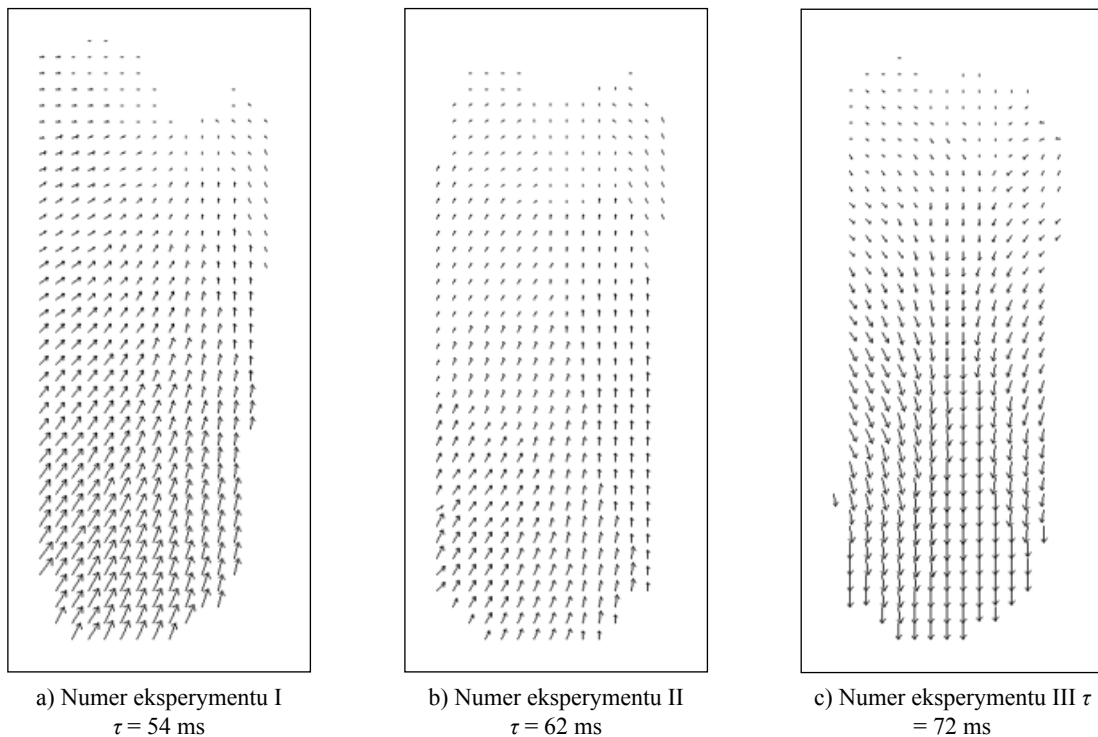


Rys. 5. Powtórne rozciąganie w kierunku poziomym (czwarta faza eksperymentu)

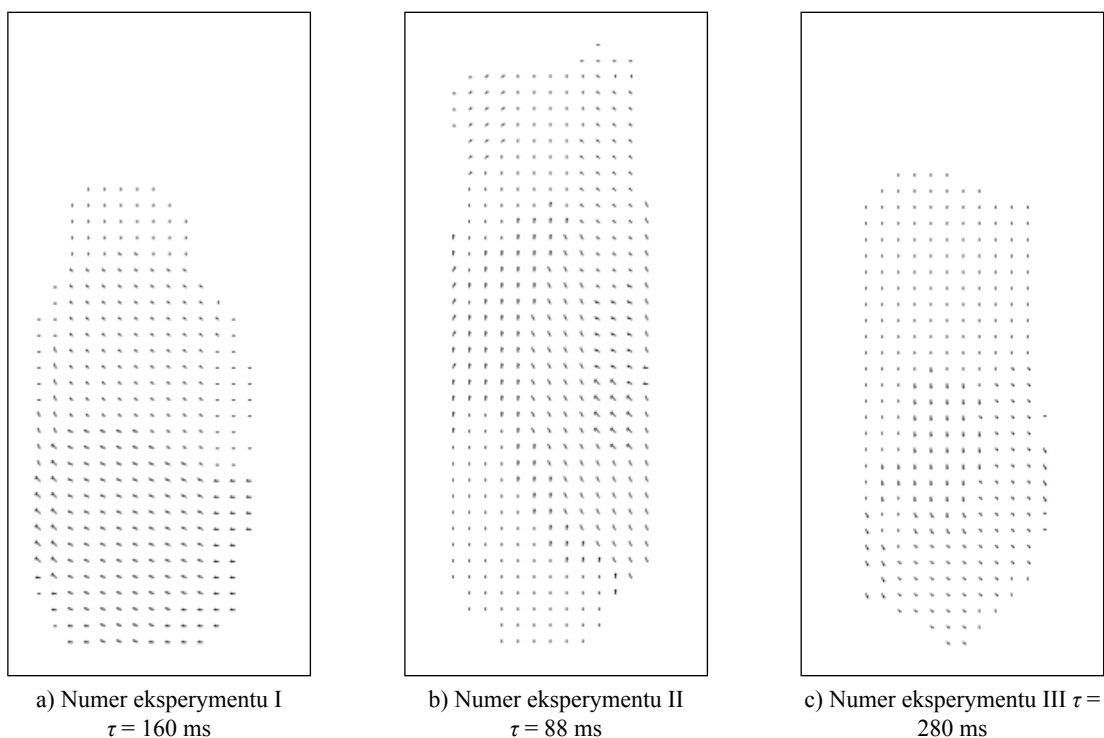
W piątej fazie eksperymentów (rys. 6) układ dąży do ponownego maksymalnego odkształcenia pionowego. Dla wypełnienia wodą nakładki na palec do wysokości 4,7 cm i 6,4 cm orientacja składowych wektorów prędkości pozostaje niezmienną, tzn. strzałki są skierowane do góry. Jedynie dla wypełnienia modelu wodą do wysokości 7,4 cm następuje powtórne odwrócenie składowych wektorów prędkości v_y i wektory zostają skierowane w dół, przy jednoczesnym braku wyraźnych odkształceń poziomych. Obser-

wuje się zatem powtórna maksymalna wartość składowej prędkości v_y odpowiednio dla eksperymentów: I ($\tau = 54$ ms), II ($\tau = 62$ ms), III ($\tau = 72$ ms).

W szóstej fazie eksperymentów (rys. 7) następuje stopniowe wygaszanie ruchu cieczy. Obserwujemy niewielkie naprzemienne kurczenie i rozciąganie pionowe z równoczesnym mieszaniem się orientacji składowych wektorów prędkości odpowiednio dla eksperymentów I ($\tau = 160$ ms), II ($\tau = 88$ ms), III ($\tau = 280$ ms).



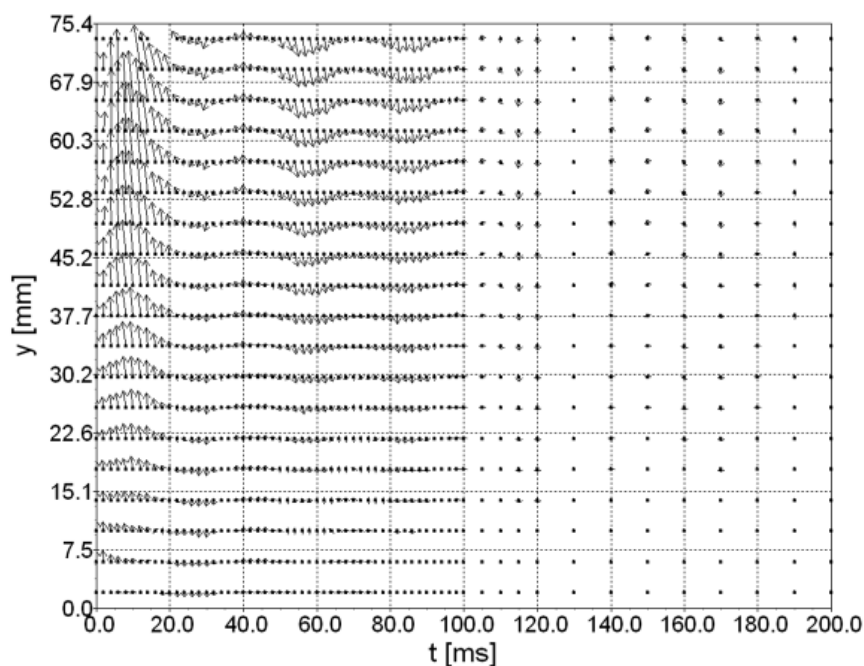
Rys. 6. Ponowne rozciąganie modelu w kierunku pionowym (piąta faza eksperymentu)



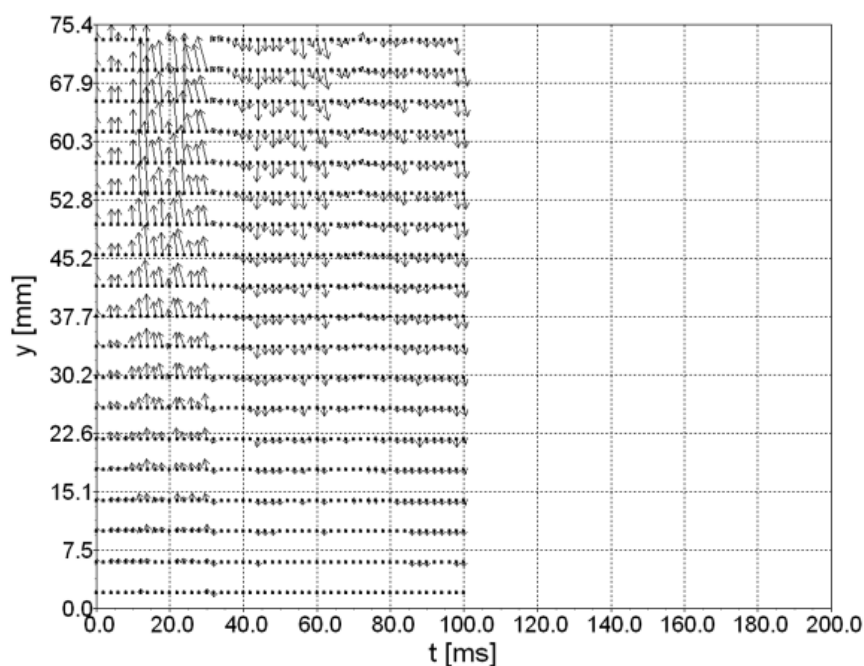
Rys. 7. Stopniowe wygaszanie ruchu w cieczy (szósta faza eksperymentu)

Na rys. 8 przedstawiono odkształcenia modelu w funkcji czasu i położenia. Jest to odkształcenie w środku modelu wzdłuż pionowej osi y . Wartość $y = 0$ umieszczona jest w górnej części modelu, a $y = 75.39$ w części dolnej. Kierunki strzałek (dokładniej – składowych wektora) odpowiadają odkształceniu modelu wzdłuż osi x i y . I tak strzałka skierowana w dół oznacza odkształcenie modelu w dół, w miejscu i chwili zamocowania strzałki (rozszerzenie modelu w kierunku pionowym). Jeśli strzałka skierowana jest do góry oznacza to kurczenie modelu w kierunku pionowym. Strzałka skierowana w prawo oznacza rozszerzenie modelu w kierunku poziomym, a w lewo kurczenie w tym kierunku.

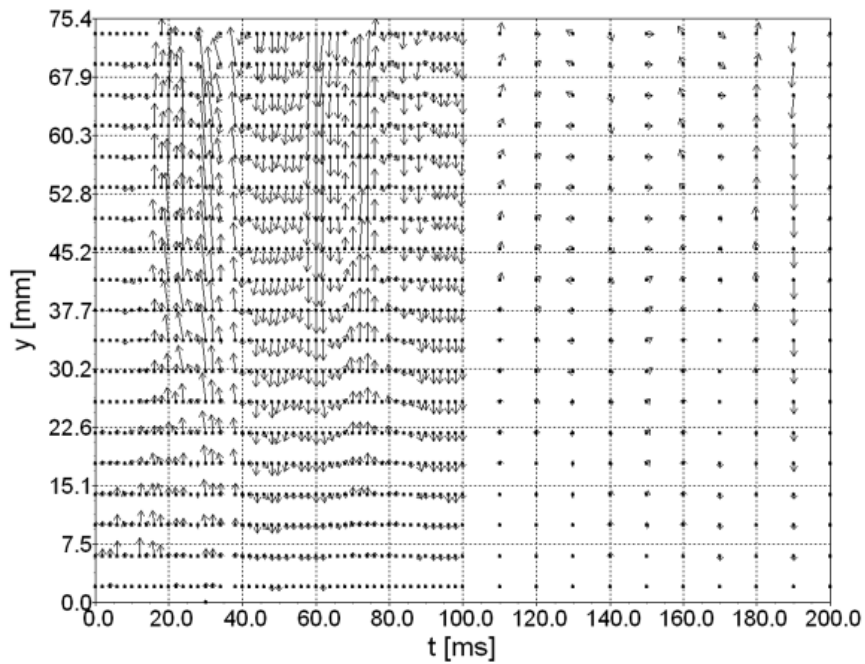
Prezentowane wykresy potwierdzają, sformułowane już stwierdzenie, że im więcej wody znajduje się w modelu tym później występuje moment maksymalnego odkształcenia. Widać również kolejne fazy rozciągania i kurczenia modelu w kierunku obu osi.



a) Eksperyment I



b) Eksperyment II

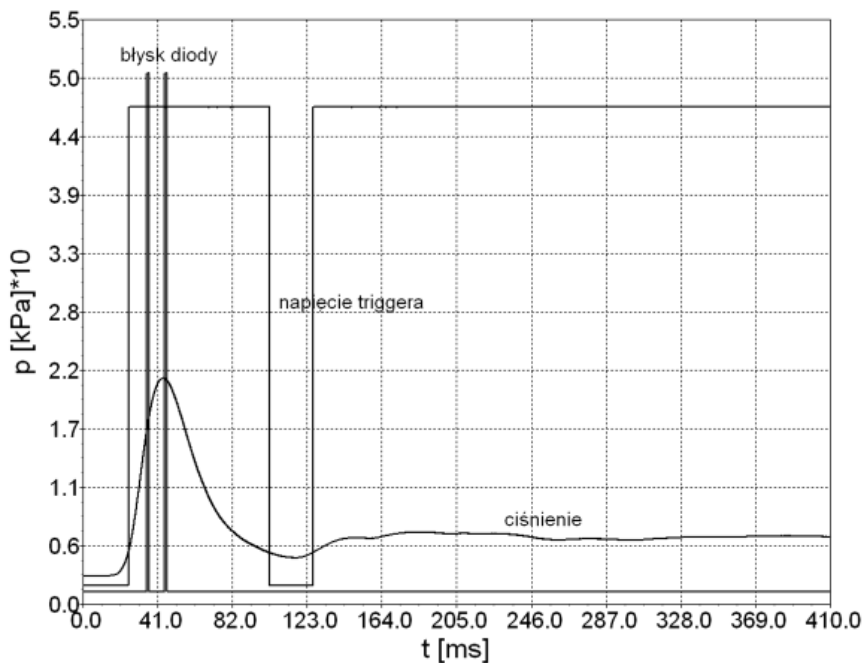


c) Eksperyment III

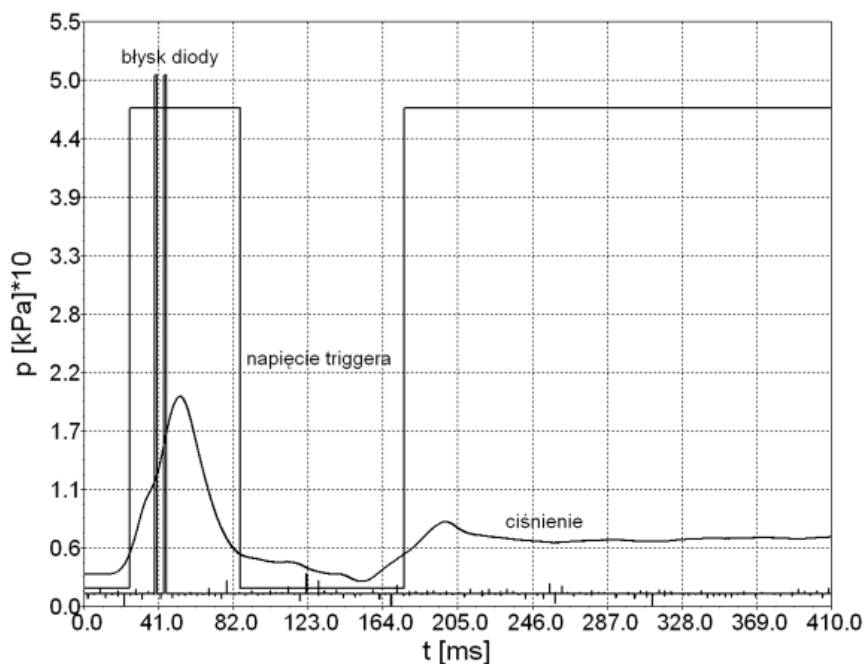
Rys. 8. Odształcenie modelu w jego środkowej części – wzdłuż pionowej osi y

4. Korelacje ciśnienia gazu i odształcenia modelu

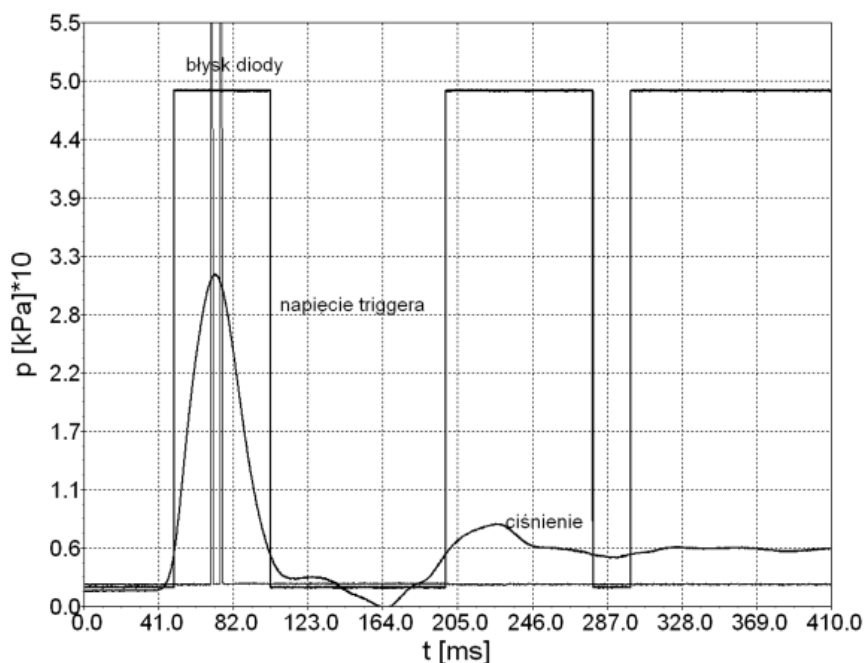
Rejestracja momentu wykonanych zdjęć (błysk diody) oraz ciśnienia umożliwiła korelacje wartości ciśnienia i odształcenia modelu. Poniżej przedstawiono wykresy obrazujące ewolucje ciśnienia w trakcie eksperymentów, odpowiednio I, II i III (rys. 9, 10, 11). Na wykresach zaznaczono ciśnienie, moment błysku diody i napięcie triggera. Jak widać z wykresów udało się wygenerować skok ciśnienia (przypominający krzywą Gaussa). Szerokość połówkowa impulsu wynosi ok. 35 ms.



Rys. 9. Przebieg ciśnienia dla eksperymentu I.
Pierwsze zdjęcie nastąpiło w 10 ms trwania eksperymentu



Rys. 10. Przebieg ciśnienia dla eksperymentu II.
Pierwsze zdjęcie nastąpiło w 14 ms trwania eksperymentu



Rys. 11. Przebieg ciśnienia dla eksperymentu III.
Pierwsze zdjęcie nastąpiło w 20 ms trwania eksperymentu

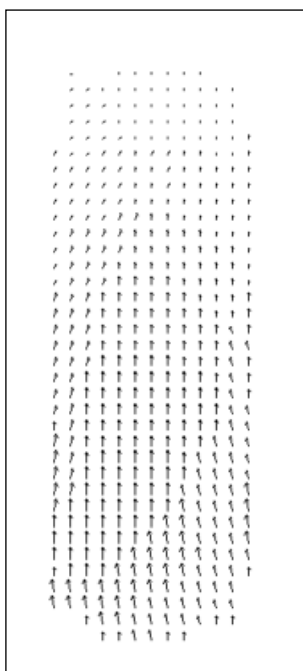
W pierwszej fazie eksperymentu ciśnienie w modelu rośnie aż do osiągnięcia maksymalnej wartości (tab. 2). Pojawienie się maksymalnej wartości ciśnienia związane jest z jednoczesnym wystąpieniem maksymalnego odkształcenia pionowego. W kolejnych fazach eksperymentu wartość ciśnienia maleje, aż do ustalenia się stałej, niezerowej wartości związanej z naciskiem ciężarka na mieszek.

Na wykresach zaznaczono blysk diody. Odpowiada on odstępowi czasu między dwoma kolejnymi zdjęciami. Dla eksperymentu I wynosił on 10 ms, co podczas procesu narastania ciśnienia odpowiadało średniej różnicy ciśnień równej 2.9 kPa. Dla eksperymentów II i III skrócono czas między zdjęciami do 5 ms, w celu zmniejszenia różnicy ciśnień w początkowej fazie eksperymentu. Uzyskano średnią wartość różnicy ciśnienia 1.4 kPa.

Tab. 2. Maksymalne wartości ciśnienia

Numer eksperymentu	I	II	II
Maksymalna wartość ciśnienia [kPa]	21.3	19.7	31.3
Końcowa wartość ciśnienia [kPa]	6.3	6.3	5.6

Ważnym pozostaje fakt, że przebiegi ciśnienia dla eksperymentów I, II i III różnią się między sobą. Jest to odzwierciedleniem odkształceń zachodzących w modelu, które są zależne od poziomu wypełnienia modelu wodą. Przy mniejszej ilości wody w modelu proces wygaszania ruchu następuje szybciej. Przy większej ilości wody w nakładce na palec ciśnienie stabilizuje się wolniej oraz pojawia się drugie maksimum przebiegu ciśnienia. Jest ono związane z odkształceniem w kierunku pionowym przy całkowitej orientacji składowych wektorów prędkości do góry (rys. 12). W tym przypadku w czasie ok. 160 ms dochodzi do zmiany znaku ciśnienia (powstaje podciśnienie).



Rys. 12. Profil składowych wektorów prędkości w eksperymencie III dla 160 ms trwania eksperymentu

5. Podsumowanie

W podsumowaniu należy podkreślić, że zaprezentowanie wyników pomiarów dotyczące odkształceń elastycznych przewodów mają charakter wstępny. Dotychczasowe stanowisko pomiarowe pozwala na obserwację odkształceń i szybkości odkształceń elastycznych przewodów przy skokowych zmianach generowanego ciśnienia. W dalszych badaniach należałoby dopracować metodę wytwarzania periodycznych zmian ciśnienia aby poprawnie modelować przepływy w układzie krwionośnym.

Ponadto należy stwierdzić, że dotychczasowe wyniki pomiarów dostarczają cennych informacji dotyczących czynników mających znaczny wpływ na przebieg ciśnienia i ewolucje czasową odkształceń elastycznych przewodów. Kolejne pomiary należałoby przeprowadzić przy całkowitym wypełnieniu modelu wodą, tj. zarówno nakładki na palec jak i przewodów doprowadzających. Tym samym układ pomiarowy byłby bardziej zbliżony do modelu fizycznego rzeczywistych naczyń przepływowych.

Pracę wykonano w ramach zadań statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN pt. „Eksperymentalne i teoretyczne badania przepływów pulsacyjnych w rozgałęzionych naczyniach elastycznych” w 2009 roku.

Literatura

- Bębenek B. (1999): *Przepływy w układzie krwionośnym*. Politechnika Krakowska, Kraków.
- Cierniak W., Gawor M., Gorgoń J., Mnich-Medoń K., Tichoruk M. (2010): *Stanowisko do pomiarów odkształceń elastycznych przewodów oraz ciśnienia przy różnych warunkach brzegowo-początkowych*. W druku, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków
- Cieśliski K. (2001): *Hydrodynamiczne uwarunkowania krążenia mózgowego*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- Gawor M. (2000): *Zastosowanie kamery CCD do badania szybkich procesów pojedynczych i periodycznych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków.
- Gawor M. (2008): *Opis metody i stanowiska pomiarowego do badania przepływów pulsacyjnych w elastycznych przewodach*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków.
- 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.

Experimental investigation of deformation in elastic channels using digital particle imaging velocimetry

Abstract

Current paper presents the experimental results concerning deformations in elastic channels. Measuring method is based on the digital particle imaging velocimetry. Deformations of the model (latex finger) were obtained by falling the weight on a small bellows. It led to change of bellows volume.

In order to analyse deformation in different phase it was taken a set of several photos. The first photo was taken after trigger signal. Correlation between pressure and model deformation was possible to investigate by recording moment of taking photo and pressure.

Model deformations were analysed in dependence on amount of water filling the latex finger. It was observed different deformation profile depending on amount of water. Correlation between gas pressure and model deformation was also analysed. It showed time evolution of pressure during experiment.

Obtained results show that conducted experiments give important information concerning elastic deformation and its velocity in elastic models.

Keywords: digital particle imaging velocimetry, deformation in elastic channels