

Krystyna JEŻOWIECKA-KABSCH, Henryk SZEWCZYK, Zdzisław BECHTOLD,
Wiesław WĘDRYCHOWICZ, Anatolij GRIGORIEW
Politechnika Wrocławska

WIZUALIZACJA STREFY RECYRKULACJI ZA KRYŻĄ W RURZE W PRZEPIŹYWIE USTALONYM I PULSUJĄCYM

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań wizualizacyjnych przeprowadzonych dla kryż o przewężeniach od 0,35 do 0,75 w warunkach ustalonego i nieustalonego przepływu, wywołanego przez nałożenie na przepływ główny sinusoidalnych pulsacji (liczba Reynoldsa od 1000 do 6000, liczba Strouhala od 0,91 do 10,9).

VISUALIZATION OF A RECIRCULATION ZONE IN A PIPE DOWNSTREAM OF AN ORIFICE FOR UNSTEADY AND PULSATING FLOWS

Summary. The paper presents results of visualization studies carried out for orifices with constrictions ranging from 0.35 to 0.75 for steady and unsteady flows; unsteady flow was induced by superimposing sinusoidal pulsations on the main flow (Reynolds number ranging from 1000 to 6000, Strouhal number ranging from 0.91 to 10.9).

1. Wstęp

Rozważania teoretyczne, oparte przede wszystkim na wynikach obliczeń numerycznych, wskazują na istotny wpływ początkowego profilu prędkości oraz niestacjonarności przepływu w rurze (np. pojawiających się w postaci pulsacji) na strukturę strug za przewężeniem, a także na wynikające z tego zmiany właściwości metrologicznych zwęzek pomiarowych [1]. Należy bowiem podkreślić, że pulsacja wprowadza do przepływu zmienną wartość prędkości chwilowej, a liczba Reynoldsa nie odnosi się do przepływu w danej chwili, ale do średniego strumienia objętości. Intensywność zmian prędkości zależy od liczby Reynoldsa oraz częstotliwości i przy niskich ich wartościach można zaobserwować w rurze ruch powrotny. W czasie cyklu pulsacji przepływ powrotny przemieszcza się od ściany ku osi rury [7],

w wyniku czego chwilowa prędkość w osi osiąga wyższe wartości niż w ruchu ustalonym (dla tych samych wartości Re i β).

Przepływ przez rurę z zainstalowaną w niej kryzą, a szczególnie przepływ niestacjonarny, jest więc na tyle złożony, że nie daje się opisać teoretycznie, a w prowadzonych eksperymentach numerycznych stosuje się uproszczenia, które opierają się przede wszystkim na intuicji. Podstawą weryfikacji obliczeń numerycznych przepływu przez rurę z zainstalowaną w niej kryzą może być wizualizacja strugi. Umożliwia ona uzyskanie obrazu pola przepływu przed i za kryzą, a przede wszystkim obserwację i ocenę występujących w takim przepływie struktur wirowych.

2. Metoda badań wizualizacyjnych i jej ocena

Do wizualizacji ustalonego i niestacjonarnego (pulsującego) przepływu wody przez rurę z kryzą zastosowano metodę pęcherzyków wodorowych [2, 4, 6, 8], w której znacznikiem są pęcherzyki wodoru uzyskane w czasie elektrolizy wody. Pęcherzyki wodorowe, wytworzone na bardzo cienkim drucie (katodzie), są zmywane i unoszone przez płynącą wodę i przy odpowiednim oświetleniu zewnętrznym, ich drogi mogą być obserwowane oraz rejestrowane. W metodzie tej w przepływie ustalonym pęcherzyki wodorowe są równomiernie zmywane z elektrody po osiągnięciu wymiarów krytycznych [2].

Przepływ pulsujący zmienia warunki wizualizacji, bowiem ze względu na zmienną prędkość chwilową pęcherzyki wodorowe są okresowo zmywane z elektrody po osiągnięciu wymiarów krytycznych. W czasie gdy prędkość jest minimalna, na elektrodach gromadzą się pęcherzyki, po czym wzrastająca prędkość zmywa je cyklicznie tworząc prążki. W dalszej części cyklu pęcherzyki, ze względu na dużą prędkość, są drobniejsze, ale o mniejszej gęstości rozkładu, a zatem słabiej widoczne. Z tych powodów obraz daje nieco mniej informacji o zjawisku, zostaje on rozmyty na krótszej drodze, niż uzyskany dla przepływu ustalonego.

Zastosowana metoda wizualizacji przepływu w rurze z kryzą, połączona z rejestracją techniką video, komputerową obróbką i wydrukiem obrazu [6], pozwoliła jednak ocenić kształty oraz rozmiary i zasięgi struktur wirowych powstających za kryzą w obu tych przepływach.

3. Cel i zakres badań

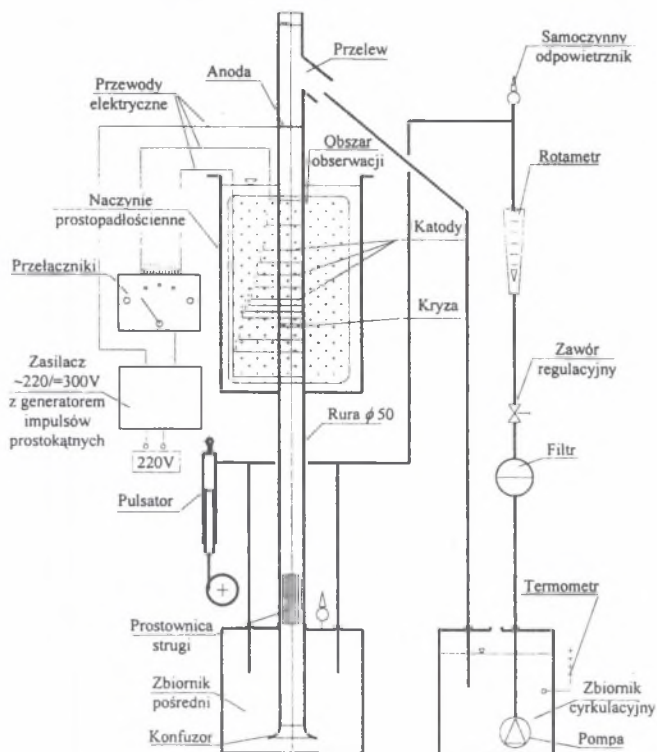
Celem prezentowanej analizy (powstałej w wyniku prac realizowanych w ramach projektu badawczego nr 7 T07G 017 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych) jest porównanie kształtów struktur wirowych oraz zasięgów stref recyrkulacji za kryzami o przewężeniach $\beta = d/D^* = 0,35; 0,50; 0,63$ i $0,75$. Badania wizualizacyjne przeprowadzono dla ustalonego i pulsującego przepływu, wywołanego przez nałożenie na przepływ główny sinusoidalnych pulsacji o częstotliwościach $n = 2,5; 3,75$ i $5,0$ Hz. Przepływom tym odpowiadały okresy pulsacji strumienia przepływu $0,4; 0,267$ i $0,2$ s oraz liczby Strouhala ($St = nD/v$) w zakresie $0,91$ do $10,9$ [5]. Mierzone strumienie objętości od $0,045$ do $0,27$ dm³/s odpowiadały liczbom Reynoldsa $Re = 1000, 2000, 4000$ i 6000 (odniesionym do średnich strumieni objętości i średnicy rury), co odpowiadało odpowiednio większym wartościom liczb Reynoldsa odniesionym do średnicy otworów kryz ($Re_d \in [1300, 17100]$), a zatem zarówno przepływ w rurze, jak i wypływ z otworu kryzy był laminarny, słabo turbulentny i turbulentny.

4. Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska doświadczalnego przedstawiono na rys. 1. Obszar obserwacji stanowi rura ze szkła organicznego o średnicy $D = 50$ mm, z odpowiednio ukształtowanym odcinkiem wstępnym [3, 10], na którym następuje uformowanie się profilu prędkości, oraz wbudowaną kryzą o średnicy otworu d . W rurze, w polu obserwacji, zainstalowano 4 elektrody w odległościach: $2 D, 1 D, D/2$ i $D/4$ przed kryzą oraz 10 elektrod za kryzą (4 elektrody co $D/4, 4$ elektrody co $D/2$ i 2 elektrody co D). Wszystkie elektrody wykonane z drutu platynowego o średnicy $40 \mu\text{m}$ zasilano prądem o napięciu regulowanym w zakresie $200 \div 300$ V z zasilacza sterowanego generatorem impulsów o przebiegach prostokątnych. W celu zlikwidowania efektu soczewki, na całym odcinku obserwacji, rurę obudowano przezroczystym prostopadłościennym naczyniem wypełnionym wodą destylowaną. Obszar obserwacji oświetlono lampami halogenowymi. Badano przepływ przez 4 kryzy o przewężeniach $\beta = 0,35; 0,50; 0,63$ i $0,75$ wykonane z tarnamidu. Nieustalony przepływ wody przez układ pomiarowy generowano za pomocą specjalnego pulsatora [5], którego

* d - średnica otworu kryzy, D - średnica rury

wymiary geometryczne dobrano tak, że przebieg strumienia objętości w czasie różnił się od przebiegu sinusoidalnego co najwyżej o 0,2%.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus

5. Rezultaty i analiza badań wizualizacyjnych

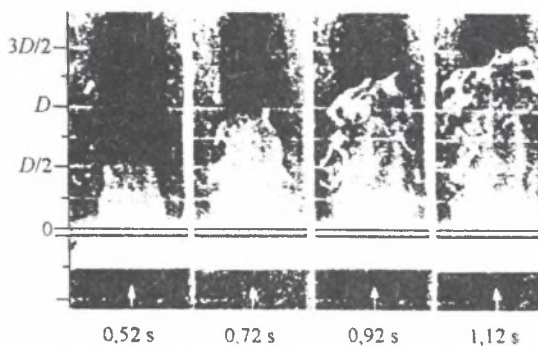
Analiza filmów rejestrujących przepływ przez rurę z kryzami o wybranych przewężeniach z zakresu dopuszczalnego przez normę [10] oraz oddzielnych kadrów tych filmów, umożliwiła znalezienie pewnych prawidłowości lub ogólnych tendencji występujących w badanych przepływach. W szczególności zaś pozwoliła określić wpływ charakteru przepływu w rurze na obraz przepływu za kryzą, kształty powstających struktur wirowych oraz zasięgi stref recyrkulacji.

5.1. Ustalony przepływ w rurze

Rysunki 2 i 3 przedstawiają, przykładowo wybrane [11], obrazy uzyskane podczas ustalonego przepływu przez rurę z kryzą, zarejestrowane w podanych na rysunkach odstępach

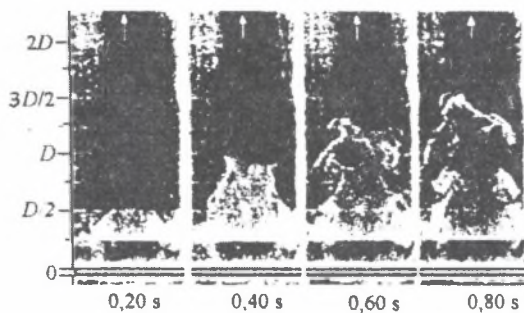
czasu liczonych od momentu wytworzenia pęcherzyków wodorowych na elektrodzie znajdującej się w odległości $D/4$ przed kryzą (rys. 2) oraz w odległości $D/4$ za nią (rys. 3).

Na obrazach przepływu za kryzą widoczna jest granica między strefą recyrkulacji a strugą wypływającą z otworu kryzy. Jej zarys jest niepowtarzalny, co świadczy o przestrzennym charakterze struktur wirowych, występujących w strefie recyrkulacji.



Rys. 2. Ewolucja strugi wizualizowanej pęcherzykami wodorowymi wytwarzanymi na katodzie znajdującej się w odległości $D/4$ przed kryzą ($Re = 2000$, $\beta = 0,63$)

Fig. 2. Development of the jet, visualized using hydrogen bubbles produced by the cathode fitted at the distance of $D/4$ upstream of the orifice ($Re=2000$, $\beta=0.63$)

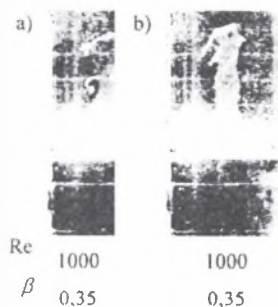


Rys. 3. Ewolucja strugi wizualizowanej pęcherzykami wodorowymi wytwarzanymi na katodzie znajdującej się w odległości $D/4$ za kryzą ($Re = 2000$, $\beta = 0,63$)

Fig. 3. Development of the jet, visualized using hydrogen bubbles produced by the cathode fitted at the distance of $D/4$ downstream of the orifice ($Re=2000$, $\beta=0.63$)

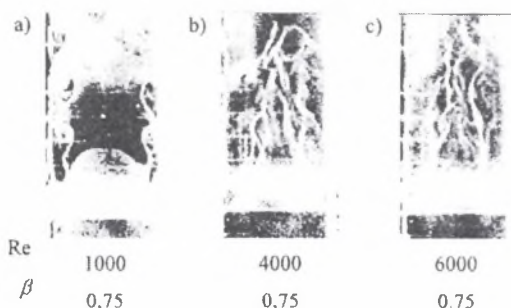
Widać, że te struktury mają kształty zbliżone do torusów, których średnice jednak zmieniają się w czasie w kierunku obwodowym i promieniowym lub tylko w kierunku osiowym. W związku z tym obserwowane obrazy strugi są symetryczne i te przeważają (rys.4a), albo niesymetryczne (rys.4b). Ze wzrostem liczby Reynoldsa obrazy strug

komplikuja się, bo przepływ w strudze wypływającej z otworu kryzy przechodzi w przepływ turbulentny (rys. 5).



Rys. 4. Obraz strugi: a – symetryczny, b – niesymetryczny

Fig. 4. Image of the stream: a – symmetrical, b – asymmetrical



Rys. 5. Zależność obrazu strugi od liczby Reynoldsa

Fig. 5. Dependence of the stream image on the Reynolds number

W tabeli 1 i na rys. 6 podano średnie długości (zasięgi) stref recyrkulacji w przepływie ustalonym w zależności od Re i przewężenia β [5].

Tabela 1

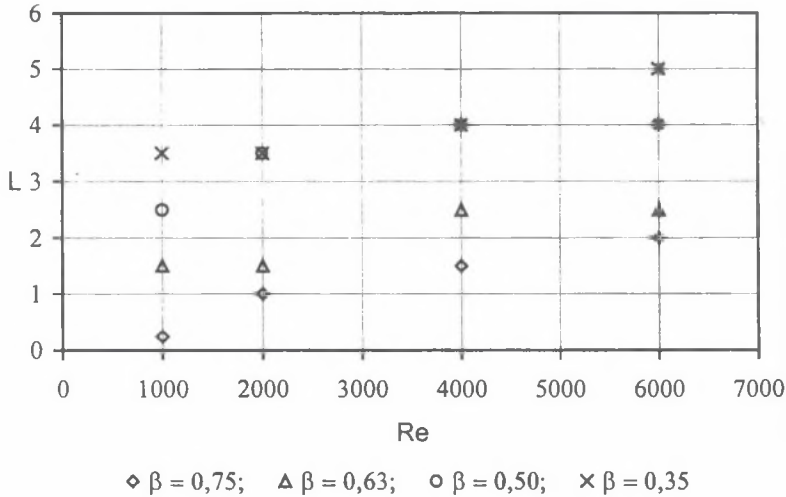
Długość strefy recyrkulacji za kryzą w przepływie ustalonym

Występ ($D - d$)/2 D	Liczba Reynoldsa Re				Kryza β
	1000	2000	4000	6000	
0,125	0,25 D	1 D	1,5 D	2 D	0,75
0,185	1,5 D	1,5 D	2,5 D	2,5 D	0,63
0,250	2,5 D	3,5 D	4 D	4 D	0,50
0,325	3,5 D	3,5 D	4 D	5 D	0,35

Zasięg strefy recyrkulacji za kryzą zależy przede wszystkim od charakteru przepływu w jej otworze i rośnie wraz z wysokością występu (zdefiniowanego jako $(D - d)/2 D$). Dla laminarnego i słabo turbulentnego wypływu z otworu ($Re_d \leq 3000$) zasięg strefy recyrkulacji wynosi od 8 do 10 $(D - d)/2$, a dla wypływu turbulentnego $Re_d > 3000$ – od 12 do 15 $(D - d)/2$.

Zasięgi stref recyrkulacji za kryzą o przewężeniu $\beta = 0,63$ są zgodne z wartościami obliczonymi numerycznie [1] (wynoszącymi 1,6 D) jedynie dla laminarnego i słabo turbulentnego przepływu; przy wyższych liczbach Reynoldsa długości tych stref przekraczają

cytowane w [1] wartości wynoszące $1,9 D$. Wyniki wizualizacji potwierdzają również, że podczas przepływu przez tę kryżę z liczbą $Re_d = 3000$ długość strefy recyrkulacji jest zgodna z wartością doświadczalną [9], która wynosi $10 (D - d)/2$.



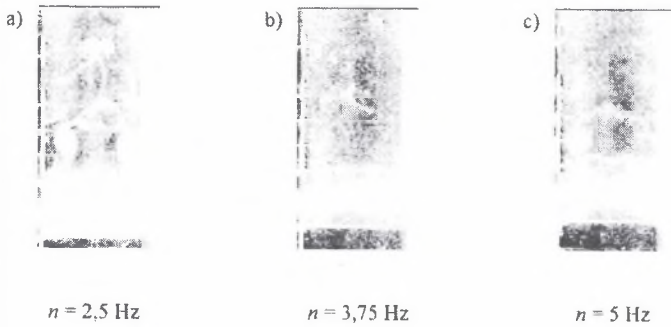
Rys. 6. Względna długość L (odniesiona do średnicy rury) strefy recyrkulacji za kryżą w zależności od liczby Reynoldsa Re w przepływie ustalonym

Fig. 6. Relative length L (related to a pipe diameter) of the recirculation zone downstream of an orifice as a function of the Reynolds number Re for a steady flow

5.2. Pulsujący przepływ w rurze

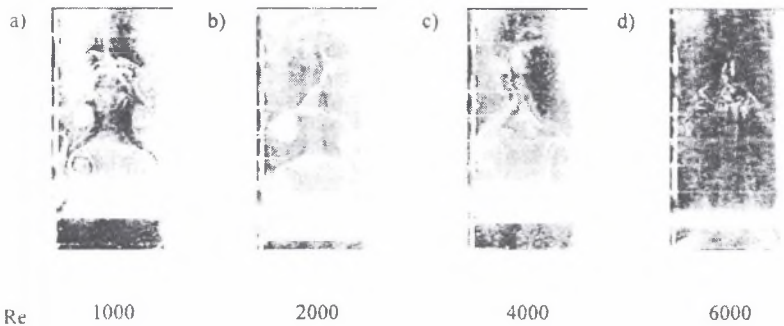
Przepływ pulsujący w rurze zmienia obraz przepływu za kryżą. Struktury wirowe powstają wówczas w określonej chwili każdego cyklu pulsacji. Są to struktury w postaci torusów, których średnice podziałowe zmieniają się w czasie [5].

Z porównania obrazów (rys. 7) uzyskanych dla tej samej kryży ($\beta = 0,63$) i tej samej liczby Reynoldsa ($Re = 2000$) oraz po upływie tego samego czasu ($t = 0,24$ s) wynika, że wzrost częstotliwości pulsacji powoduje wzrost intensywności ruchu fluktuacyjnego za kryżą. Dla częstotliwości $n = 2,5$ Hz (rys. 7a) możemy obserwować kolejne struktury, które stopniowo się rozmywają. Dla $n = 3,75$ Hz (rys. 7b) wyraźnie widać tylko strukturę, która właśnie się kształtuje i resztki niewyraźnej, rozmytej poprzedniej struktury. Przy częstotliwości $n = 5$ Hz (rys. 7c) widać, słabiej niż poprzednio, zarysowaną strukturę i bardzo rozmyte struktury wcześniejsze. Zauważa się, że średnica strugi tuż za kryżą maleje, a struga zostaje wydłużona. Ogólnie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem częstotliwości charakter przepływu nie zmienia się, maleją natomiast wymiary kolejno powstających torusów.



Rys. 7. Obrazy strugi ($Re = 2000$, $\beta = 0,63$, $t = 0,24$ s) przy zmieniającej się częstotliwości pulsacji
 Fig. 7. Images of the stream ($Re = 2000$, $\beta = 0,63$, $t = 0,24$ s) for a varied pulsation frequency

Obserwując z kolei kryzę o przewężeniu $\beta = 0,63$, podczas przepływu z pulsacją o częstotliwości $n = 2,5$ Hz, zauważa się wpływ liczby Reynoldsa na obraz strugi (rys.8).



Rys. 8. Obrazy strugi pulsującej ($n = 2,5$ Hz, $\beta = 0,63$) przy zmieniającej się liczbie Reynoldsa
 Fig. 8. Images of the pulsating stream ($n = 2,5$ Hz, $\beta = 0,63$) for a varied Reynolds number

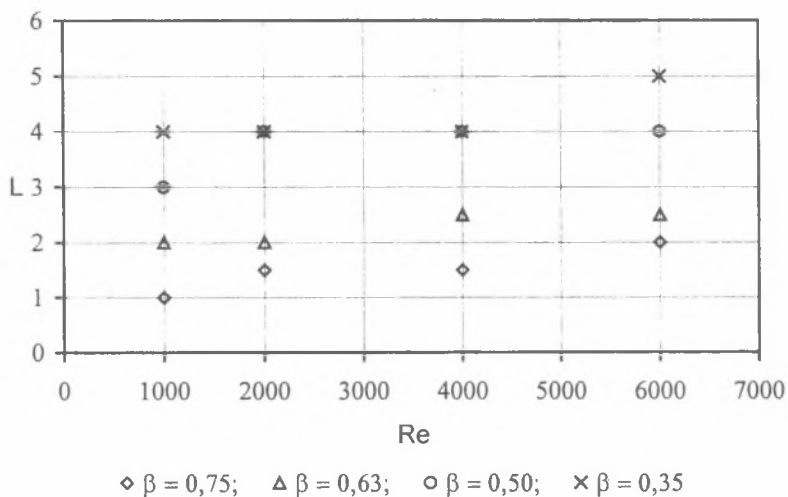
Na rysunku 8a widać regularną strukturę torusów. Po zwiększeniu Re (rys. 8b) struktury pozostają wyraźne, ale odległość między torusami wzrasta w porównaniu z przepływem o $Re = 1000$. Dalszy wzrost Re (do 4000) sprawia, że widać tylko jedną strukturę (rys. 8c) rozciągniętą, w porównaniu z poprzednią, w kierunku przepływu. Widoczne na rysunkach *a* i *b* kołowe przekroje poprzeczne struktur wirowych, na rysunku *c* stają się eliptyczne. Przepływ z $Re = 6000$ powoduje silne rozciągnięcie struktury, która nie tworzy już torusa, lecz raczej ma kształt grzyba. Sam obraz jest słabo widoczny ze względu na dużą prędkość i silniejsze rozmywanie znacznika (rys.8d).

Mimo, iż zasięg strefy recyrkulacji w przepływie pulsującym zmienia się podczas cyklu, można określić jej maksymalny zasięg (tabela 2 i rys. 9).

Tabela 2

Długość strefy recyrkulacji za kryzą w przepływie pulsującym ($n = 2,5$ Hz)

Występ ($D - d$)/ $2D$	Liczba Reynoldsa Re				Kryza β
	1000	2000	4000	6000	
0,125	1 D	1,5 D	1,5 D	2 D	0,75
0,185	2 D	2 D	2,5 D	2,5 D	0,63
0,250	3 D	4 D	4 D	4 D	0,50
0,325	4 D	4 D	4 D	5 D	0,35

Rys. 9. Względna długość L (odniesiona do średnicy rury) strefy recyrkulacji za kryzą w zależności od liczby Reynoldsa Re w przepływie pulsującymFig. 9. Relative length L (related to a pipe diameter) of the recirculation zone downstream of an orifice as a function of the Reynolds number Re for a pulsating flow

6. Podsumowanie

W laminarnym i słabo turbulentnym przepływie ustalonym można wyróżnić wyraźnie przepływ główny i występujące na jego obrzeżu torusy o charakterze przestrzennym.

W przepływie przez rurę z kryzą o jego strukturze decyduje liczba Reynoldsa odniesiona do średnicy otworu kryzy. Wraz z jej wzrostem zmienia się obraz przepływu za kryzą, przechodząc od osiowosymetrycznego do przestrzennego chaotycznego.

Pulsacja zmienia obraz przepływu przez rurę z kryzą, przyczyniając się do poszerzenia obszaru przepływu głównego, nie powoduje natomiast istotnych, w stosunku do przepływu ustalonego, zmian rozmiarów struktur wirowych i odległości między nimi.

Wraz ze wzrostem częstotliwości pulsacji charakter przepływu nie zmienia się, maleją natomiast wymiary kolejno powstających torusów.

Częstotliwość pulsacji ma niewielki wpływ na zasięg strefy recyrkulacji. Właściwie jedynie dla laminarnego przepływu w rurze ($Re < 2000$), zasięg tej strefy jest w przepływie pulsującym nieznacznie większy niż w przepływie ustalonym.

LITERATURA

1. Dobrowolski B., Kabza Z.: Teoretyczna analiza wpływu osiowosymetrycznej deformacji pól prędkości i zawirowania strugi na właściwości metrologiczne zwęzłok mierniczych, Wyd. WSI w Opolu, Studia i Monografie z. 59, Opole 1992.
2. Goldstein R.: Fluid Mechanics Measurements, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, New York, London 1983.
3. ISO 5167-1, Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices, part 1, ISO, Geneva 1991.
4. Jankowski J.: Określanie prędkości chwilowych cieczy metodą pęcherzyków wodorowych, Raporty Inst. Konstr. i Ekspl. Masz., PWr., seria PRE nr 016, Wrocław 1996, s. 106.
5. Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H., Bechtold Z., Wędrychowicz W., Grigoriew A.: Wizualizacyjne studium formowania się i ewolucji struktur wirowych w przepływie przez przewężenia, Pr. nauk. Inst. Techn. Ciepln. PWr. nr 54, Monografie nr 30, Wrocław 1999, s. 86.
6. Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H.: La verification visuelle de quelques resolution numeriques de l'écoulement plat autour des obstacles, Model. Meas. & Control. B, vol. 57, nr 1, 1995, s. 23-32.

7. Lojcyanskij L. G.: *Miechanika żidkosti i gaza*, Nauka, Moskwa 1978.
8. Merzkirch W.: *Flow Visualisation*, Academic Press, New York–London 1987.
9. Nazarczuk M.M., Panczenko W.N.: *Ograniczennye strui*, Naukowa Dumka, Kiew 1981.
10. PN-93/M-53950/01, *Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwęzek pomiarowych*, Wydawnictwa Normalizacyjne Alfa-Wero Sp. z o.o., Warszawa 1994.
11. Szewczyk H., Jeżowiecka-Kabsch K., Bechtold Z., Grigoriew A., Wędrychowicz W., *Visualization of Flow Through a Pipe With an Orifice*, 8th International Symposium on Flow Visualization, Sorrento 1998.

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Czesław Oleśkowicz-Popiel

Abstract

Theoretical analyses concerning flows through a pipe with an orifice show that there is a significant influence of the initial velocity profile and of the flow unsteadiness in a pipe on the structure of a stream downstream of a constriction, as well as on consequent changes in metrological properties of measurement reducers.

The paper presents results of visualization studies carried out for orifices with constrictions ranging from 0.35 to 0.75 for steady and unsteady flows; unsteady flow was induced by superimposing sinusoidal pulsations on the main flow (Reynolds number ranging from 1000 to 6000, Strouhal number ranging from 0.91 to 10.9).

The analysis of films used to record a flow through a pipe with orifices as well as of their individual frames made it possible to find certain regularities or general tendencies occurring in the studied flows. In particular, it allowed to determine the influence of the flow nature in a pipe on the flow pattern downstream of an orifice, the shapes of emerging vortex structures and the reach of recirculation zones.