

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

## OCENA WPŁYWU KRYZY NA TŁUMIENIE PULSACJI PRZEPEŁYWU CIECZY W RURZE

**Streszczenie.** Zaproponowano sposób oceny tłumienia pulsacji przez osiowo-symetryczny opór miejscowy w rurze. Polega on na wyznaczaniu przebiegów czasowych strumienia objętości przepływu pulsującego przed i za oporem. Oba przebiegi strumienia objętości uzyskiwane są poprzez graficzną analizę kolejnych kadrów filmu zarejestrowanego podczas wizualizacji przepływu wody (metodą pęcherzyków wodorowych) przez rurę z zainstalowaną w niej kryzą.

## EVALUATION OF INFLUENCE OF AN ORIFICE ON DAMPING THE PULSATION OF LIQUID FLOW IN A PIPE

**Summary.** In this paper the evaluation method of pulsation damping by axially symmetrical local resistance element in a pipe was suggested. It consists in determining time characteristics of a flux for a pulsating flow upstream and downstream of the resistance element. Both the flux characteristics are obtained through the graphic analysis of subsequent frames of the film recorded during the visualization of water flow (using the hydrogen bubble method) through a pipe with an orifice installed in it.

### Wprowadzenie

Wśród nieustalonych, periodycznych przepływów cieczy, występujących w systemach hydraulicznych, można wyróżnić przepływy: impulsowe, oscylujące lub pulsujące [5]. Według tej klasyfikacji w przepływie impulsowym wartość strumienia objętości początkowo gwałtownie wzrasta od zera do wartości maksymalnej, po czym łagodniej maleje znów do wartości zerowej. Przepływ oscylujący charakteryzuje się sinusoidalną zależnością strumienia objętości od czasu oraz zerową wartością średniego strumienia objętości. Natomiast przepływ pulsujący jest traktowany jako superpozycja przepływu ustalonego (średniego) i oscylującego.

W okresowym przepływie turbulentnym miejscowa chwilowa prędkość ciecży jest równa [2]:

$$v(x,t) = \bar{v}(x) + \langle v(x,t) \rangle + v'(x,t) \quad (1)$$

gdzie:  $\bar{v}(x)$  – średnia (czasowa) wartość prędkości w punkcie  $x$ ,  $\langle v(x,t) \rangle$  – składowa periodyczna wynikająca z okresowego charakteru przepływu,  $v'(x,t)$  – składowa fluktuacyjna w ruchu turbulentnym.

Chwilowy strumień objętości przepływu periodycznego jest natomiast sumą [6]:

$$q_v(x,t) = \bar{q}_v(x) + \langle q_v(x,t) \rangle \quad (2)$$

gdzie:  $\bar{q}_v(x)$  – średni strumień objętości,  $\langle q_v(x,t) \rangle$  – składowa periodyczna.

Strumień objętości  $q_v(t)$  w przepływie pulsującym opisują oba składniki sumy (2), zaś w przepływie oscylującym pozostaje tylko  $\langle q_v(x,t) \rangle$ .

Przepływy periodyczne występują w wielu urządzeniach stosowanych w inżynierii środowiska. Impulsowy przepływ sprężonego powietrza jest powszechnie stosowany do regeneracji workowych filtrów tkaninowych, pulsacje strugi są natomiast coraz częściej stosowane do intensyfikacji procesów wymiany ciepła i masy. W tych przypadkach zmienność przepływu w czasie jest zjawiskiem koniecznym albo pożądanym. Wiele instalacji stosowanych w ochronie środowiska wymaga jednak ustalonego strumienia przepływu, a pulsacje wytwarzane przez niektóre urządzenia przepływowe wręcz pogarszają skuteczność procesu oraz skracają czas eksploatacji.

Wynika stąd konieczność poznania i ilościowej oceny mechanizmów tłumienia pulsacji w turbulentnym przepływie ciecży, co z jednej strony może zmniejszyć niekorzystne pulsacje strugi, z drugiej zaś uchroni przed nieświadomym stosowaniem elementów konstrukcyjnych zmniejszających pulsację tam, gdzie jest ona przydatna.

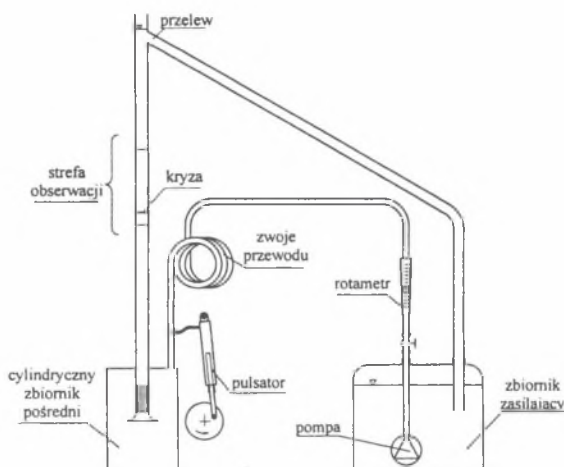
Przeprowadzone wizualizacyjne badania ustalonego i pulsującego przepływu przez rurę z zainstalowaną w niej kryzą [3] wykazały istotny wpływ pulsacji przepływu na obraz strugi za kryzą. Umożliwiły one również wstępną obserwację tłumiącego oddziaływania tego przewężenia na wytwarzane przed nim pulsacje strumienia objętości.

Celem obecnie prowadzonych prac jest jakościowa i ilościowa ocena tłumienia pulsacji przez osiowosymetryczne elementy instalacji, stanowiące opory miejscowe. Ocena

tłumiącego oddziaływania przeszkody miejscowej przeprowadzono na podstawie badań wizualizacyjnych przepływu cieczy przez rurę z zainstalowaną w niej kryzą [3].

## Stanowisko badawcze

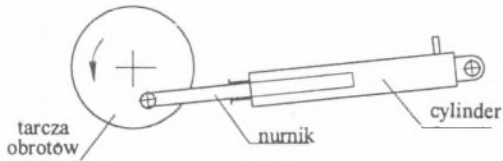
Na stanowisku badawczym, schematycznie przedstawionym na rys. 1, rejestrowano pulsujący przepływ cieczy przez rurę z zainstalowaną w niej kryzą o różnych przewężeniach  $\beta = d/D$  (0,35–0,75). Liczby Reynoldsa odniesione do średnicy rury  $D$  i średniego strumienia objętości  $q_v$  wynosiły 1000, 2000,  $\sqrt{4000}$  i 6000.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego  
Fig. 1. Schematic diagram of research device

Woda zasysana pompą ze zbiornika zasilającego przepływa przez filtr, zawór i rotametr do cylindrycznego zbiornika pośredniego. Przed zbiornikiem pośrednim do układu dołączony był równolegle pulsator (rys. 2), który nakłada sinusoidalną oscylację na przepływ ustalony. Zwoje przewodu (o długości 10 m i średnicy 25 mm) na odcinku między pulsatorem i rotametrem zapobiegają [8] przenoszeniu się wytwarzanych pulsacji na rotametr i pompę, co umożliwia prawidłowy pomiar średniego strumienia objętości. Ze zbiornika pośredniego woda przepływa przez krzywoliniowy konfuzor oraz prostownicę strugi i wpływa do pionowej, przezroczystej rury o średnicy  $D = 50$  mm, a następnie powraca do zbiornika

zasilającego. Strefa obserwacji, w której zainstalowana jest kryza, znajduje się w odległości  $25D$  za prostownicą.



Rys. 2. Schemat pulsatora

Fig. 2. Schematic diagram of pulsator

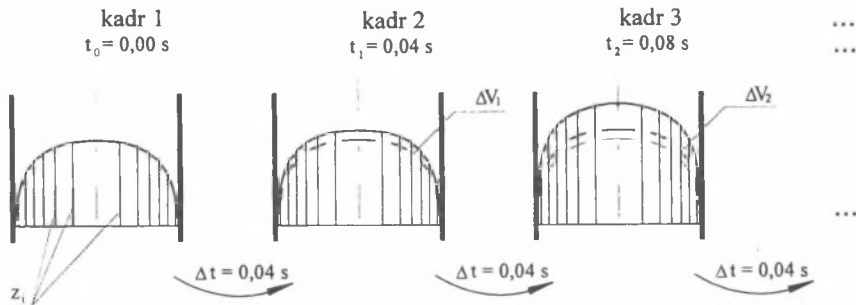
Zastosowany w badaniach pulsator zaprojektowano tak, aby przebieg oscylacji strumienia objętości prawie nie odbiegał od przebiegu sinusoidalnego (maksymalna projektowana rozbieżność wynosiła 0,2%). Główny element pulsatora stanowi cylinder z nurnikiem przymocowany mimośrodowo do obracającej się tarczy. Zadawana częstotliwość obrotów tarczy ( $n = 2,5; 3,75$  i  $5,0$  Hz) wymusza pulsację strugi.

Pulsacja strugi scharakteryzowana liczbą Strouhala  $St = n \cdot D / v_{sr}$  ( $n$  - częstotliwość pulsacji,  $D$  - średnica wewnętrzna rury,  $v_{sr}$  - prędkość uśredniona zarówno w przekroju, jak i w czasie) wynosiła od 0,91 do 10,9. Jeżeli jako kryterium podobieństwa przepływów periodycznych wprowadzimy liczbę Womersleya  $N_w$  [1,4,6,7] bądź bezwymiarowy parametr częstotliwości  $\alpha$ , przy czym  $N_w = 2 \cdot \alpha = D \cdot (\omega / \nu)^{1/2}$ , (gdzie  $\omega = 2\pi n$ ,  $\nu$  - kinematyczny współczynnik lepkości), to liczba Womersleya badanych przepływów pulsujących wyniosła odpowiednio 150, 185 i 210.

Do wizualizacji przepływu zastosowano metodę pęcherzyków wodorowych. Przed kryzą w odległości  $D$  oraz za kryzą w odległości  $4D$ , wzdłuż średnicy rozpięto platynowe elektrody o grubości  $40 \mu\text{m}$ , na których podczas elektrolizy wody tworzyły się pęcherzyki wodorowe. Ruchy smug pęcherzyków wodorowych pełniących rolę znacznika rejestrowano kamkorderem systemu VHS. Uzyskane tą drogą filmy [3] poddano cyfrowej obróbce i analizie.

## Sposób oceny tłumienia pulsacji

Zaproponowano sposób oceny tłumienia pulsacji polegający na wyznaczeniu przebiegów czasowych strumienia objętości przepływu pulsującego przed i za kryzą, na podstawie analizy kolejnych kadrów filmu zarejestrowanego podczas wizualizacji przepływu przez rurę z kryzą [3]. Na rysunku 3 przedstawiono schemat sposobu określania przebiegu pulsacji. Poszczególne rysunki prezentują położenia prążka znacznika wodorowego w odstępach czasowych  $\Delta t = 1/25$  s równym odstępom czasowym między kolejnymi obrazami rejestrowanymi przez kamkorder (czas ekspozycji wynosi 1/500 s).



Rys. 3. Schemat graficznego wyznaczania czasowych zmian wartości strumienia objętości przepływu pulsującego

Fig. 3. Diagram illustrating a graphic method of determination of flux variations with time for a pulsating flow

W celu określenia przyrostu objętości cieczy  $\Delta V$ , która przepłynęła w kierunku osiowym w czasie  $\Delta t$ , obliczono średnią odległość prążka  $z_{sr}$  od przekroju kontrolnego. Pole przekroju rury podzielono na 6 równych pól pierścieniowych, a za miarodajne odległości prążka od przekroju kontrolnego uznano wartości  $z_i$  występujące w środkach ciężkości pierścieni\*. Średnia odległość  $z_{sr}$  była średnią arytmetyczną dwunastu mierzonych wartości  $z_i$ :

$$z_{sr} = \frac{1}{12} \cdot \sum_{i=1}^{12} z_i \quad (3)$$

a przesunięcie prążka w czasie  $\Delta t$  obliczono z różnicy kolejnych wartości  $z_{sr}$ :

$$\Delta z_{sr} = z_{sr}(t_j) - z_{sr}(t_{j-1}) \quad (4)$$

\* Sposób znany z pomiarów strumienia objętości rurkami piętrzącymi.

Wobec tego chwilową wartość strumienia objętości  $q_v$  można obliczyć ze wzoru

$$q_v = \frac{\Delta z_{kr}}{\Delta t} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (5)$$

$$q_v = \frac{\Delta z_{kr}}{\Delta t}$$

Uzyskany tą drogą szereg chwilowych wartości strumienia objętości daje możliwość, przy dostatecznie dużej liczbie obserwacji przypadających na jeden okres  $T$ , odtworzenia czasowego przebiegu przepływu pulsującego. Można zatem określić amplitudę pulsacji  $\langle q_v \rangle$ . Dokładność jej określenia wzrasta z liczbą pomiarów, która jeśli jest dostateczna, pozwala – drogą ich uśredniania – wyznaczyć bardziej wiarygodną wartość maksymalnej amplitudy.

Jako parametr opisujący tłumiący wpływ przeszkody na pulsację strumienia objętości przyjęto współczynnik tłumienia pulsacji  $\lambda$  zdefiniowany zależnością:

$$\lambda = \frac{\langle q_{v1} \rangle_{\max} - \langle q_{v2} \rangle_{\max}}{\langle q_{v1} \rangle_{\max}} \quad (6)$$

gdzie:  $\langle q_{v1} \rangle_{\max}$  – amplituda pulsacji przed kryzą,

$\langle q_{v2} \rangle_{\max}$  – amplituda pulsacji za kryzą.

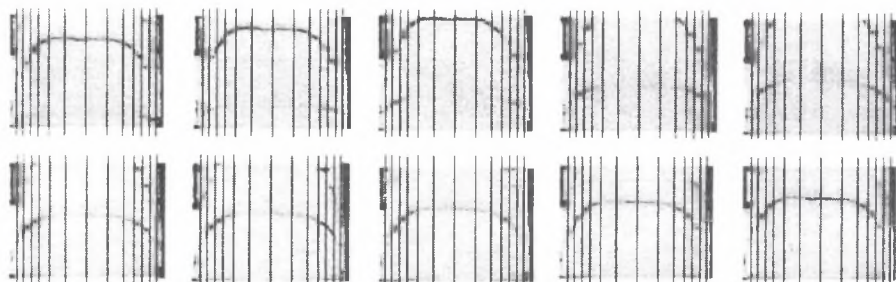
Współczynnik ten przedstawia względną zmianę amplitudy strumienia objętości występującą podczas pulsującego przepływu przez kryzę.

## Przykład oceny tłumienia pulsacji

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono (przykładowo) obrazy przepływu pulsującego o  $Re = 2000$  i  $n = 2,5$  Hz w jednym okresie pulsacji. Rysunki obrazują przesunięcia prążków znacznika wodorowego generowanego na elektrodach umieszczonych w odległościach  $D$  przed i  $4D$  za kryzą o przewężeniu  $\beta = 0,63$ . Prążki tworzone przed kryzą są symetryczne, a ich szerokość maleje wraz z oddalaniem się od elektrody i określenie średniego przesunięcia prążka jest w tym przypadku stosunkowo dokładne.

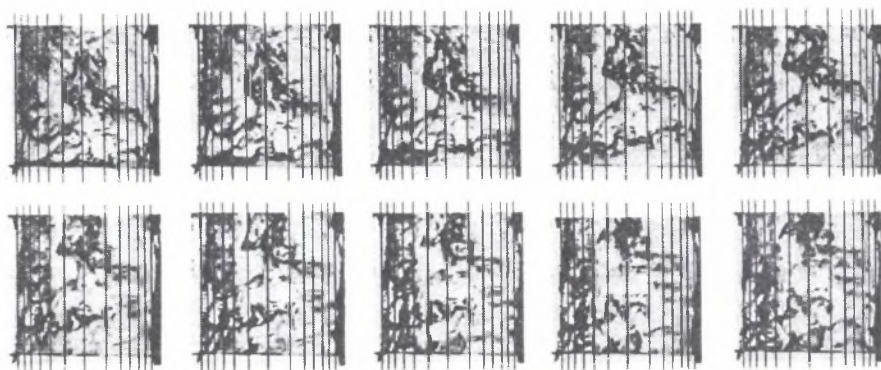
Kształt prążków wodorowych generowanych na elektrodzie za kryzą oraz ich przemieszczenia są niesymetryczne w wyniku sturbulizowania strugi podczas jej przejścia przez kryzę. Odległość  $4D$  jest jednak już wystarczająca do tego, aby można było określić przebieg pulsacji; udało się zatem dość dokładnie wyznaczyć miejscowe przesunięcia wycinków prążków.





Rys. 4. Obrazy czasowych zmian przepływu pulsującego  $Re = 2000$ ,  $n = 2,5$  Hz (wizualizacja elektrodą umieszczoną w odległości  $D$  przed kryzą o  $\beta = 0,63$ )

Fig. 4. Images showing pulsating flow variations with time;  $Re = 2000$ ,  $n = 2,5$  Hz (visualization by means of an electrode placed at the distance  $D$  upstream of an orifice with  $\beta = 0.63$ )

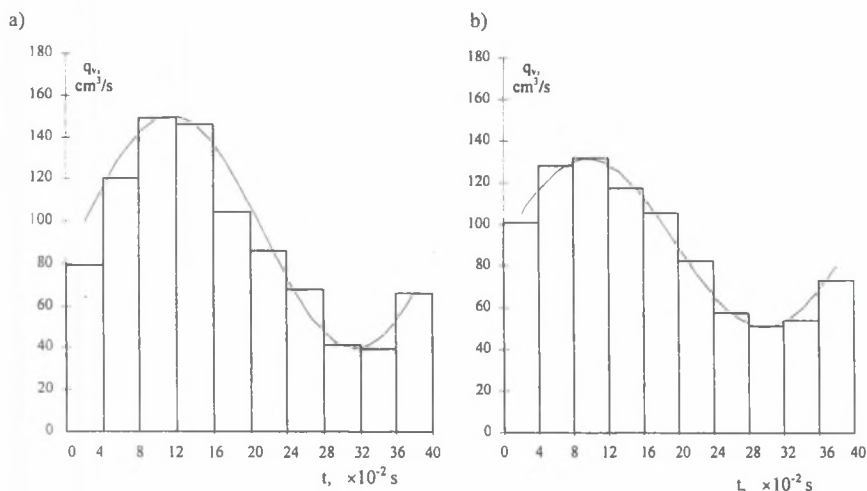


Rys. 5. Obrazy czasowych zmian przepływu pulsującego  $Re = 2000$ ,  $n = 2,5$  Hz (wizualizacja elektrodą umieszczoną w odległości  $4D$  za kryzą o  $\beta = 0,63$ )

Fig. 5. Images showing pulsating flow variations with time;  $Re = 2000$ ,  $n = 2,5$  Hz (visualization by means of an electrode placed at the distance  $4D$  downstream of an orifice with  $\beta = 0.63$ )

Dla badanych przepływów pulsujących opracowano wykresy czasowych przebiegów strumienia objętości przed i za kryzą. Następnie, na ich podstawie, wyznaczono ich uśredniony przebieg dla jednego cyklu pulsacji.

Na rysunku 6a przedstawiono przebieg uśrednionego okresu pulsacji dla przepływu o  $Re = 2000$  i  $n = 2,5$  Hz występującego w odległości  $D$  przed kryzą o przewężeniu  $\beta = 0,63$ . Na podstawie tak sporządzonego wykresu można określić wartość średniego strumienia objętości oraz parametry nałożonego przepływu oscylującego. Rysunek 6b przedstawia przebieg uśrednionego cyklu pulsacji przepływu o tych samych parametrach, lecz wizualizowanego elektrodą znajdującą się w odległości  $4D$  za kryzą.



Rys. 6. Przebiegi średnich cykli pulsacji strumieni objętości przepływu pulsującego ( $n = 2,5 \text{ Hz}$ ;  $Re = 2000$ ):  
a – przed i b – za kryzą o przewężeniu  $\beta = 0,63$

Fig. 6. Characteristics of average pulsation cycles of fluxes for a pulsating flow ( $n = 2,5 \text{ Hz}$ ;  $Re = 2000$ ):  
a - upstream and b - downstream of an orifice with constriction  $\beta = 0.63$

Z porównania obu przebiegów wynika, że amplituda strumienia za kryzą jest wyraźnie mniejsza. Świadczy to o tłumiącym oddziaływaniu kryzy na pulsację strumienia objętości. I tak, w analizowanym przepływie, wartość amplitudy pulsacji przed kryzą  $\langle q_{v1} \rangle_{\max}$  zbliżona jest do  $54 \text{ cm}^3/\text{s}$ , natomiast za kryzą  $\langle q_{v2} \rangle_{\max}$  wynosi około  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Współczynnik tłumienia pulsacji  $\lambda$  (wyznaczony z zależności (6)) wynosi prawie 26%.

Rysunek 6b przedstawia przebieg uśrednionego cyklu pulsacji przepływu o tych samych parametrach, lecz wizualizowanego elektrodą znajdującą się w odległości  $4D$  za kryzą.

Z porównania obu przebiegów wynika, że amplituda strumienia za kryzą jest wyraźnie mniejsza. Świadczy to o tłumiącym oddziaływaniu kryzy na pulsację strumienia objętości. I tak, w analizowanym przepływie, wartość amplitudy pulsacji przed kryzą  $\langle q_{v1} \rangle_{\max}$  zbliżona jest do  $54 \text{ cm}^3/\text{s}$ , natomiast za kryzą  $\langle q_{v2} \rangle_{\max}$  wynosi około  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Współczynnik tłumienia pulsacji  $\lambda$  (wyznaczony z zależności (6)) wynosi prawie 26 %.



## Podsumowanie

Przedstawiony sposób oceny wpływu oporu miejscowego na tłumienie pulsacji przepływu cieczy w rurze pozwala na wyznaczenie wartości współczynnika tłumienia  $\lambda$  na podstawie analizy kolejnych kadrów filmu rejestrującego wizualizację przepływu (metodą pęcherzyków wodorowych) przed i za nim. Określony w ten sposób współczynnik tłumienia pulsacji, przedstawiający względną zmianę amplitudy strumienia objętości podczas badanego pulsującego przepływu przez rurę z kryzą, wynosił od 10 do 30%.

## LITERATURA

1. Eckmann D.M., Grotberg J.B.: Experiments on transition to turbulence in oscillatory pipe flow, *J. Fluid Mech.*, vol. 222, 1991, s. 329-350.
2. Elsner J.: Turbulencja przepływów, PWN, Warszawa 1987.
3. Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H., Bechtold Z., Wędrychowicz W., Grigoriew A.: Wizualizacyjna metoda analizy pola prędkości w rurociągach instalacji budowlanych, Raporty Inst. Techn. Ciepln. PWr. seria SPR nr 015, Wrocław 1998.
4. Lee T.S., Shi Z.D., Winoto S.H.: Numerical studies of transitional turbulent pulsatile flow in pipes with ring-type constrictions, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 22, 1996, s. 1169-1187.
5. Sarpkaya T.: Brief reviews of some time-dependent flows, *J. Fluids Eng.*, vol. 114, 1992, s.284-298.
6. Shemer L., Wygnanski I., Kit E.: Pulsating flow in a pipe, *J. Fluid Mech.*, vol. 153, 1985, s. 315-337.
7. Swanson Ch.J., Stalp S.R., Donnelly R.J.: Experimental investigation of periodic flow in curved pipe, *J. Fluid Mech.*, vol. 256, 1993, s. 69-83.
8. Szewczyk H.: Nieustalony przepływ cieczy nieściślnej w szeregowo-równoległych systemach hydraulicznych, Pr. Nauk. Inst. Techn. Ciepln. PWr, Studia i Materiały nr 10, Wrocław 1977.

**Abstract**

Unsteady flows with a periodically changing flux are often encountered in many flow devices. The study and quantitative evaluation of pulsation amplitude variations, triggered off by a local resistance element installed in a pipe, in a turbulent flow of liquid, makes it possible to influence wilfully their intensification or damping.

In this paper the evaluation method of pulsation damping by axially symmetrical local resistance element in a pipe was suggested. It consists in determining time characteristics of a flux for a pulsating flow upstream and downstream of the resistance element. Both the flux characteristics are obtained through the graphic analysis of subsequent frames of the film recorded during the visualization of water flow (using the hydrogen bubble method) through a pipe with an orifice installed in it.

In case of the studied pulsating flows (Strouhal number ranging from 0.91 to 10.9) through orifices (with constrictions ranging from 0.35 to 0.75) in a pipe (Reynolds number ranging from 1000 to 6000 - referred to the average flux), the damping coefficient assumes values between 10 and 30%