

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

## WIZUALIZACJA KONTRAKCJI PRZEPŁYWU PRZEZ KRYŻĘ W RURZE

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki badań kontrakcji strugi ograniczonej przepływającej przez kryżę umieszczoną w rurze. Wyznaczono współczynniki kontrakcji dla kryż o przewężeniach od 0,35 do 0,75 w zakresie liczb Reynoldsa od 1000 do 6000.

## VISUALIZATION OF CONTRACTION OF A FLOW THROUGH A PIPE ORIFICE

**Summary.** The paper presents results of studies on the contraction of a restricted stream flowing through the orifice installed in a pipe. Contraction coefficients were calculated for orifices with constrictions ranging from 0.35 to 0.75 for Reynolds numbers from 1000 to 6000.

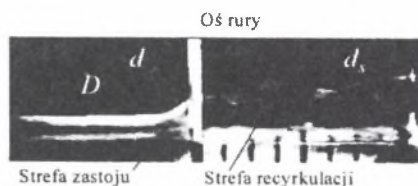
### Wprowadzenie

Podczas przepływu płynu przez kryżę zainstalowaną w przewodzie występuje zjawisko zwężenia (kontrakcji) strugi. Stosunek minimalnego pola przekroju strugi do pola otworu kryży, zwany współczynnikiem kontrakcji, ma istotne znaczenie w przypadku pomiaru strumienia objętości czy strumienia masy metodą zwięźkową. Dokładne określenie wymiarów strugi za kryżą metodami bezpośrednimi jest bardzo kłopotliwe. Wizualizacja przepływu stwarza natomiast możliwość obserwacji oraz rejestracji charakterystycznych struktur przepływu (rys. 1), które mogą stanowić podstawę do określenia wymiarów strugi za kryżami.

Badania wizualizacyjne przeprowadzono na specjalnie do tego celu zbudowanym stanowisku doświadczalnym\* [5]. Schemat stanowiska oraz opis zastosowanej metody

\* Wykonanym w ramach projektu badawczego nr 7 TO7G 017 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych

wizualizacji przedstawiono w [4]. Do wizualizacji przepływu płynu przez kryzę [2, 9] zainstalowaną w przewodzie zastosowano metodę pęcherzyków wodorowych [1, 3, 6, 8].



Rys. 1. Szkic obrazu przepływu przez rurę z kryzą  
Fig. 1. Draft image of flow through a pipe with an orifice

Zarejestrowano obrazy przepływu przez rurę z wymiennymi kryzami o przewężeniach  $\beta = d/D = 0,35; 0,50; 0,63$  i  $0,75$ . Przepływ w rurze był laminarny, słabo turbulentny i turbulentny ( $Re \in [1000, 6000]$ ).

## Wyniki badań wizualizacyjnych

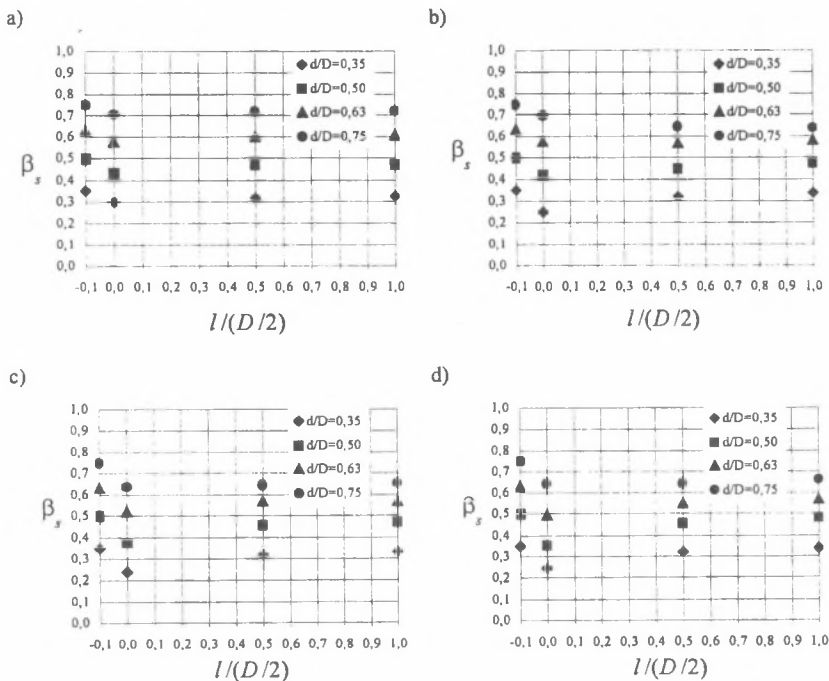
Na podstawie analizy obrazów strug za kryzami, pomiarów ich zewnętrznych średnic ( $d_s$ ) oraz obszarów niezakłóconych wirami bezpośrednio za kryzami i granic stref powstawania wirów na elektrodach umieszczonych w odległości  $D/4$  i  $D/2$  za kryzami wyznaczono wartości współczynników przewężenia ( $\beta_s = d_s/D$ ) oraz współczynników kontrakcji ( $\kappa = (d_s/d)^2$ ) strug i przedstawiono je na wykresach.

Na rys. 2 przedstawiono zależność współczynnika przewężenia strug od odległości za kryzą i przewężenia kryzy, dla czterech wartości liczb Reynoldsa. Na osi odciętych zaznaczono względne odległości za kryzą odniesione do promienia rury (w przedziale  $<0;1>$ ) oraz względną grubość kryzy (w przedziale  $<-0,1;0>$ ), natomiast na osi rzędnych współczynnik przewężenia strugi. Z przedstawionych zależności dla poszczególnych liczb Reynoldsa wynika, że:

- dla  $Re = 1000$  średnice strugi zachowują stałą wartość we wszystkich mierzonych przekrojach,
- dla  $Re = 2000$  struga przepływająca przez kryzę o przewężeniu  $\beta = 0,75$  osiąga najmniejsze wymiary poprzeczne w odległości  $D/2$  za kryzą, struga przepływająca przez kryzę o przewężeniu  $0,63$  nadal zachowuje stałą średnicę na długości  $D/2$ , natomiast strugi przepływające przez kryzy o przewężeniach  $0,50$  i  $0,35$  dość gwałtownie zwężają się

bezpośrednio za kryzą, a następnie rozszerzają się osiągając wymiary podobne do występujących dla  $Re = 1000$ ,

- dla  $Re = 4000$  i  $Re = 6000$  zmiana współczynnika przewężenia strugi za kryzami przebiega podobnie. Struga ulega gwałtownemu zwężeniu już w obrębie kryzy i tuż za nią. Wartość minimalną współczynnik przewężenia (a więc i średnica strugi) osiąga w odległości około  $D/16$  za kryzą. Na odcinku od  $D/16$  do  $D/4$  struga rozszerza się i aż do odległości  $D/2$  za kryzą utrzymuje stały wymiar, taki sam jak dla  $Re = 2000$ .



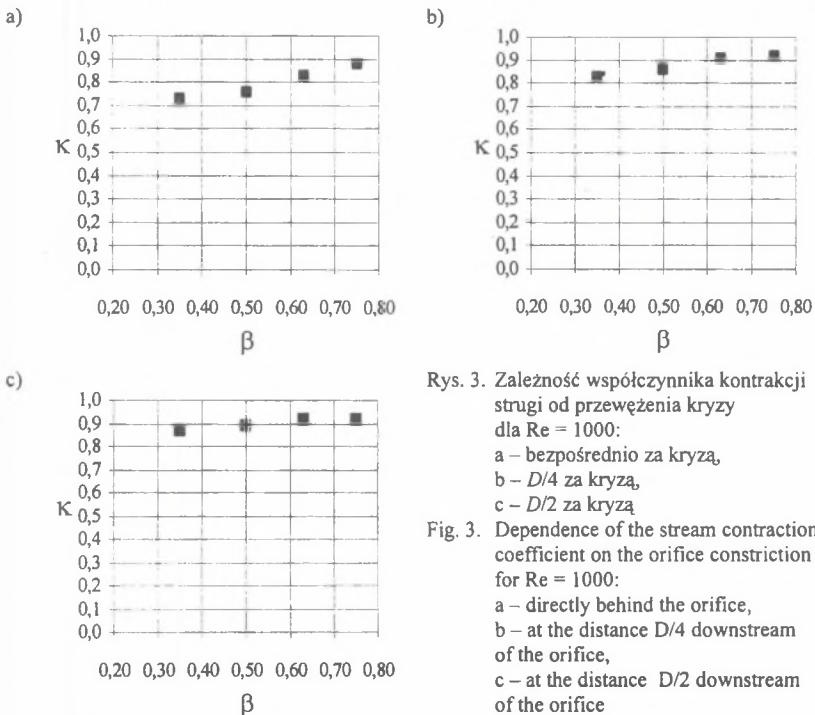
Rys. 2. Zależność współczynnika przewężenia strugi od odległości od płaszczyzny kryzy i przewężenia strugi dla: a –  $Re = 1000$ ; b –  $Re = 2000$ ; c –  $Re = 4000$ ; d –  $Re = 6000$

Fig. 2. Dependence of the stream constriction coefficient on the distance from the orifice plane and the stream constriction for: a –  $Re = 1000$ ; b –  $Re = 2000$ ; c –  $Re = 4000$ ; d –  $Re = 6000$

We wszystkich przypadkach, w których w otworze kryzy występuje przepływ turbulentny, czyli  $Re \geq 2000$ , średnica strugi jest prawie stała na odcinku od  $D/4$  do  $D/2$ , a jej wartość zależy wyłącznie od przewężenia kryzy, nie zależy natomiast od liczby Reynoldsa. Z tego wynika, że decydujący wpływ na wymiary strug ma charakter przepływu w otworze kryzy, a nie w przewodzie.

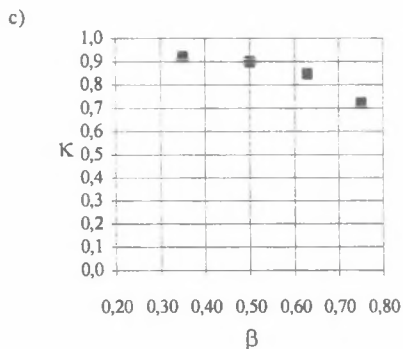
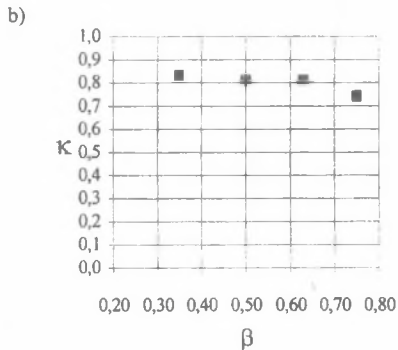
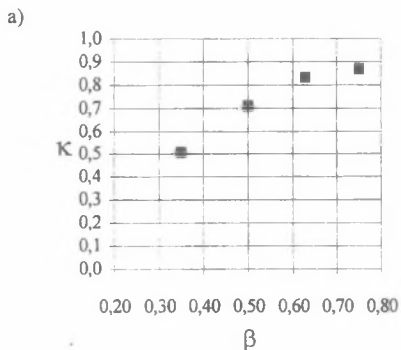
Na rysunkach 3–6 przedstawiono wartości współczynników kontrakcji strug, w tych samych co poprzednio przekrojach, dla różnych liczb Reynoldsa w zależności od przewężenia kryzy. Mała liczba punktów pomiarowych nie pozwala na zobrazowanie wymienionych zależności za pomocą krzywych, niemniej widoczne są pewne charakterystyczne tendencje zmian współczynnika kontrakcji w zależności od parametrów kryzy i przepływu.

I tak, dla  $Re = 1000$  (rys. 3) wartość współczynnika kontrakcji rośnie wraz ze wzrostem przewężenia kryzy we wszystkich badanych przekrojach, natomiast w przypadku  $Re \geq 2000$  (rys. 4-6) taka zależność występuje tylko w przekroju bezpośrednio za kryzą. Bezpośrednio za kryzą nadal wzrostowi wartości przewężenia kryzy odpowiada wzrost wartości współczynnika kontrakcji, z tym, że zależność ta ma nieco inny charakter niż dla  $Re = 1000$ . O ile w przypadku przepływu laminarnego ( $Re = 1000$ ) minimalna (dla  $\beta = 0,35$ ) i maksymalna (dla  $\beta = 0,75$ ) wartość współczynnika kontrakcji różniła się o około 20%, to w przypadku przepływu słabo turbulentnego ( $Re = 2000$ ) różnica ta wynosi około 75%, a w przypadku przepływu turbulentnego ( $Re \geq 4000$ ) około 50%. W przekrojach położonych w odległości  $D/4$  i  $D/2$  za kryzą zaobserwowano zmianę tendencji zależności wartości współczynnika kontrakcji od przewężenia kryzy.



Rys. 3. Zależność współczynnika kontrakcji strugi od przewężenia kryzy dla  $Re = 1000$ :  
 a – bezpośrednio za kryzą,  
 b –  $D/4$  za kryzą,  
 c –  $D/2$  za kryzą

Fig. 3. Dependence of the stream contraction coefficient on the orifice contraction for  $Re = 1000$ :  
 a – directly behind the orifice,  
 b – at the distance  $D/4$  downstream of the orifice,  
 c – at the distance  $D/2$  downstream of the orifice



Rys. 4. Zależność współczynnika kontrakcji strugi od przewężenia kryzy dla  $Re = 2000$ :

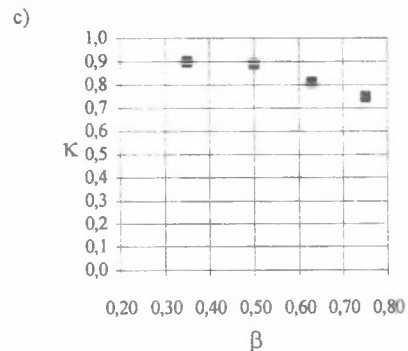
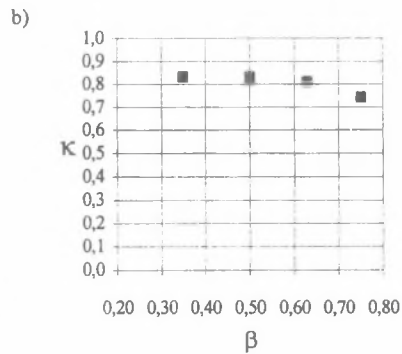
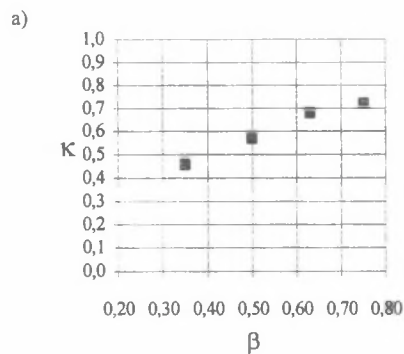
a – bezpośrednio za kryzą,  
b –  $D/4$  za kryzą,

c –  $D/2$  za kryzą

Fig. 4. Dependence of the stream contraction coefficient on the orifice constriction for  $Re = 2000$ :

a – directly behind the orifice,  
b – at the distance  $D/4$  downstream of the orifice,

c – at the distance  $D/2$  downstream of the orifice



Rys. 5. Zależność współczynnika kontrakcji strugi od przewężenia kryzy dla  $Re = 4000$ :

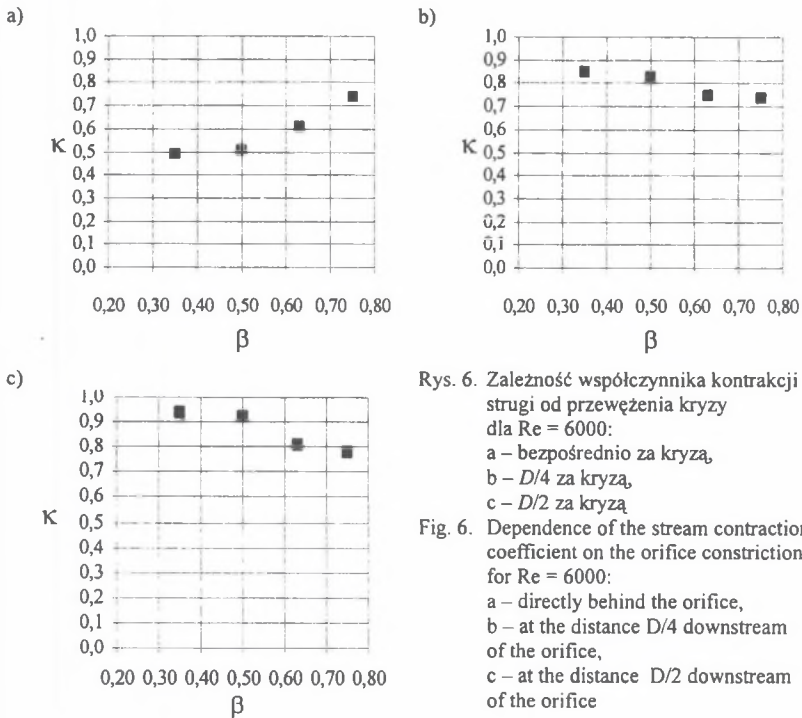
a – bezpośrednio za kryzą,  
b –  $D/4$  za kryzą,

c –  $D/2$  za kryzą

Fig. 5. Dependence of the stream contraction coefficient on the orifice constriction for  $Re = 4000$ :

a – directly behind the orifice,  
b – at the distance  $D/4$  downstream of the orifice,

c – at the distance  $D/2$  downstream of the orifice



Rys. 6. Zależność współczynnika kontrakcji strugi od przewężenia kryzy dla  $Re = 6000$ :  
 a – bezpośrednio za kryzą,  
 b –  $D/4$  za kryzą,  
 c –  $D/2$  za kryzą

Fig. 6. Dependence of the stream contraction coefficient on the orifice constriction for  $Re = 6000$ :  
 a – directly behind the orifice,  
 b – at the distance  $D/4$  downstream of the orifice,  
 c – at the distance  $D/2$  downstream of the orifice

W przekrojach tych współczynnik kontrakcji osiąga największą wartość podczas przepływu przez kryzę o najmniejszym przewężeniu, by następnie maleć wraz ze wzrostem przewężenia kryzy.

## Podsumowanie

W badanym zakresie liczb Reynoldsa (od 1000 do 6000) zjawisko kontrakcji (z wyjątkiem, gdy  $Re = 2000$  i  $\beta = 0,75$ ) przebiega nieco inaczej niż jest to podawane w literaturze [7, 12], minimalne wartości współczynników kontrakcji występują w niewielkiej odległości za kryzą (właściwie tuż za kryzą), a nie w odległości większej niż  $D/2$ . Również obraz strugi różni się od rozposzechnionego, w literaturze przedmiotu, wyobrażenia o jej kształcie. Charakterystyczne jest występowanie na odcinku o długości  $(1/2-3/4)D$  strugi w kształcie cylindra, z małymi wybrzuszeniami na powierzchni bocznej, które pojawiają się w miejscach, gdzie stykają się struktury wirowe wypełniające obszar recyrkulacji. Obraz taki występuje we wszystkich przypadkach, niezależnie od liczby Reynoldsa.

Wyznaczone wartości współczynników kontrakcji w przekrojach położonych bezpośrednio za kryzą zestawiono w tabeli 1. W tabeli tej podano również wartości współczynników kontrakcji obliczonych z zależności podanych przez:

$$\text{Weisbacha [10]} \quad \kappa = 0,63 + 0,37 \beta^6, \quad (1)$$

$$\text{Buckinghamama [10]} \quad \kappa = 0,598 + 0,395 \beta^4, \quad (2)$$

$$\text{i Kremlevskiego [7]} \quad \kappa = 0,613 / \sqrt{1 - 0,624 \beta^4}. \quad (3)$$

Tabela 1

## Wartości współczynników kontrakcji

Przewężenie kryzy, $\beta$	Liczba Reynoldsa, Re				Według wzorów		
	1000	2000	4000	6000	(1)	(2)	(3)
0,35	0,73	0,51	0,46	0,49	0,630	0,604	0,616
0,50	0,76	0,71	0,57	0,51	0,636	0,623	0,625
0,63	0,83	0,83	0,68	0,61	0,653	0,660	0,646
0,75	0,88	0,87	0,72	0,74	0,696	0,723	0,684

Zakres wartości wyznaczonych współczynników kontrakcji jest szerszy niż obliczony z przytoczonych zależności, widoczny jest również wpływ charakteru przepływu (liczby Reynoldsa) na kontrakcję. Otrzymane wyniki przypominają w pewnym stopniu zależność współczynnika kontrakcji od liczby Reynoldsa dla wypływu przez mały otwór [11].

## LITERATURA

1. Goldstein R.: Fluid Mechanics Measurements, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, New York, London 1983.
2. ISO 5167-1, Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices, Part 1, ISO, Geneve 1991.
3. Jankowski J.: Określanie prędkości chwilowych cieczy metodą pęcherzyków wodorowych, Raporty Inst. Konst. i Eksp. Maszyn, PWroc., Seria PRE nr 016, Wrocław 1996, s. 106.
4. Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H., Bechtold Z., Wędrychowicz W., Grigoriew A.: Kształtowanie się struktur wirowych za kryzą podczas ustalonego i pulsującego przepływu w rurze, VI Ogólnopolskie Sympozjum „Zastosowanie Mechaniki Płynów w Inżynierii Środowiska”, Gliwice–Wiśla 1999.



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. Kato E., Suita M., Kawamata M.: Visualization of Unsteady Pipe Flows Using Hydrogen Bubble Technique, Proc. of the Second Internationale Symposium on Flow Visualization, Bochum 1980, s. 209-214.
7. Kremlevskij P.P.: Raschodomery i sčėtčiki količestva, Mašinostroenie, Leningrad 1975.
8. Merzkirch W.: Flow Visualisation, Academic Press, New York and London 1987.
9. 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.
10. Prandtl L.: Dynamika przepływów, PWN, Warszawa 1956.
11. Prosnak W.J.: Mechanika płynów, t. I, PWN, Warszawa 1970.
12. Turkowski M.: Pomiary przepływów, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.

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

## Abstract

To visualize the flow of fluid through the orifice installed in a pipe, the hydrogen bubble method was used. Images of flow through orifices with constrictions of 0.35, 0.50, 0.63 and 0.75 were recorded. On the basis of the analysis of images of streams downstream of orifices, measurements of their outer diameters and zones undisturbed by vortices directly behind orifices as well as of boundaries of vortex formation zones on electrodes placed at distances of  $D/4$  and  $D/2$  downstream of orifices, the values of constriction coefficients and contraction coefficients were determined and shown on the following diagrams.

For the investigated range of Reynolds numbers (between 1000 and 6000) the contraction phenomenon proceeds in a somewhat different way than described in literature, the minimum values of contraction coefficients occur within a small distance downstream of the orifice



(actually just behind the orifice) and not at the distance larger than  $D/2$ . Also the stream image differs from its shape picture widespread in relevant literature.

The range of determined values of contraction coefficients is wider than calculated using relationships given in literature. Also the influence of flow nature (Reynolds number) is noticeable.