

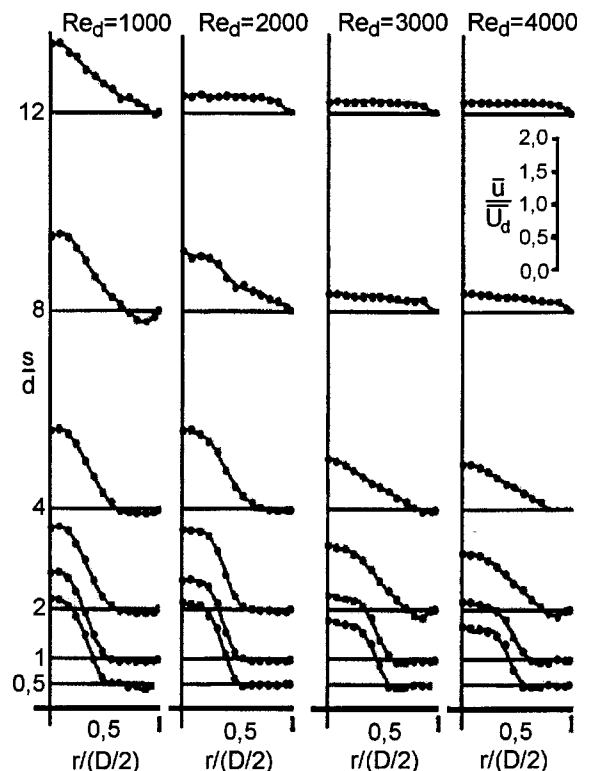
Krystyna Jeżowiecka-Kabsch, Katarzyna Strzelecka

Wpływ nagłego rozszerzenia rury na wartość współczynnika strat miejscowych

Nagłe rozszerzenia pola przekroju przepływu występują we wszystkich rozbudowanych systemach hydraulicznych. Podczas przepływów cieczy lepkich przez takie opory miejscowe, w instalacji powstają straty hydrauliczne wywołane zaburzeniami struktury przepływającej strugi i nawet w przepływach ustalonych obserwuje się powstawanie oraz przemieszczanie makroskopowych struktur wirowych wywołujących falowanie strugi tranzytowej. Na granicy tej strugi – w pobliżu nagłego rozszerzenia – powstają niekiedy strefy recyrkulacji [1]. W pewnych warunkach w obszarach stagnacji (w obszarach bardzo wolnego przepływu lub nawet zastoju) może dochodzić np. do zamarzania przepływającej wody [2], czy też powstawania zatorów, wywołanych sedimentacją cząstek stałych i kumulacją produktów korozji, w przewodach wodociągowych [3]. Z drugiej strony makroskopowe struktury wirowe, spływające z ostrej krawędzi skokowej zmiany pola przekroju przepływu, odpowiadają za procesy mieszania w przewodzie, a sterowanie skalą tych zjawisk może być jednym ze sposobów intensyfikacji lub spowalniania tych procesów [4].

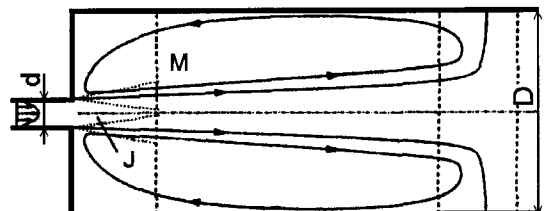
W niektórych pracach analizowane są wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych przepływów (ustalonych i pulsujących) płynów przez rurę z nagłym osiowoosymetrycznym rozszerzeniem [5,6], przy czym dotyczą one zadanego stosunku średnicy rury przed (d) do średnicy rury za rozszerzeniem (D). W pracy [5] – na podstawie badań wizualizacyjnych (metodą barwnikową) – stwierdzono, że przy stopniu rozszerzenia rury $d/D=0,48$ struktura przepływu za nagłym rozszerzeniem jest złożona, nie tylko w wypadku przepływów pulsujących, ale także ustalonych. Szczególną uwagę zwrócono na odległość, na której struga zachowuje stabilność, na kształt i zasięg stref recyrkulacji oraz na zjawiska, jakie zachodzą na granicy strugi tranzytowej i strefy recyrkulacji.

Przeprowadzone badania anemometryczne oraz wyniki czasowych przebiegów ciśnienia statycznego potwierdziły wnioski z badań wizualizacyjnych. Stwierdzono, że za nagłym rozszerzeniem przewodu następują intensywne zmiany profilu prędkości (rys. 1). Podczas ustalonych przepływów słaboturbulentnych ($Re_d \leq 4000$) profil prędkości ustalił się dopiero w odległości około $12d$ od przeszkody. W pracy [6] omówiono wyniki badań numerycznych przepływu przez nagłe rozszerzenie o stopniu rozszerzenia $d/D \ll 1$ [6]. Schemat przepływu przez taki opór miejscowy przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Rozkłady prędkości bezwymiarowej za nagłym rozszerzeniem rury podczas przepływu ustalonego

Można tu wyróżnić kilka charakterystycznych obszarów. Tuż za nagłym rozszerzeniem pojawia się wąski obszar rdzenia (J), w którym struga się rozwija. Ta struga tranzytowa wywołuje ruch płynu znajdującego się w jej pobliżu (tuż za rozszerzeniem), w wyniku czego powstaje obszar recyrkulacji (M). Linie prądu są początkowo zbliżone do równoległych do osi, po czym struga rozszerza się. Według autorów [6] w takim przepływie kształtuje się długa strefa recyrkulacji, przy czym nie podano zależności jej zasięgu od stosunku średnic (d/D). Tak długi obszar strefy recyrkulacji może dodatkowo wpłynąć na wartość strat energetycznych.



Rys. 2. Schemat przepływu przez nagłe osiowoosymetryczne rozszerzenie rury [6]

Zaburzenia wywołane nagłym rozszerzeniem rury prowadzą zatem do intensywnych zmian profilu prędkości, a jego ustabilizowanie następuje dopiero w pewnej odległości od przeszkody. Stosowane powszechnie wzory teoretyczne do wyznaczania wartości współczynnika strat miejscowych (ζ) nie uwzględniają jednak procesów przebiegających za takimi oporami miejscowymi.

Obliczanie wartości współczynnika ζ

Wysokość spadku ciśnienia Δh^s (strata miejscowa), wywołanego nagłym rozszerzeniem rury, można określić ze wzoru Darcy'ego-Weisbacha [7] zapisanego w postaci:

$$\Delta h^s = \zeta \frac{v_D^2}{2g} \quad (1)$$

w którym:

ζ – współczynnik strat miejscowych odniesiony najczęściej do średniej prędkości przepływu za przeszkodą (v_D)

Wśród znanych zależności umożliwiających obliczenie wartości współczynnika oporów miejscowych w przepływie przez nagłe rozszerzenie najprostszą jest wzór Bordy [7], wyprowadzony z zasady zachowania pędu strugi i uogólnionego równania Bernoulliego, przy założeniu równomiernego rozkładu prędkości, a zatem współczynnika Coriolisa $\alpha=1$ (współczynnik Coriolisa charakteryzuje nierównomierność rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym rury [7]), w każdym przekroju przewodu. Współczynnik oporu miejscowego (ζ), odniesiony do średniej prędkości za oporem, ma postać:

$$\zeta = \left(\left(\frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right)^2 \quad (2)$$

w której:

d, D – średnice rury przed i za rozszerzeniem, m

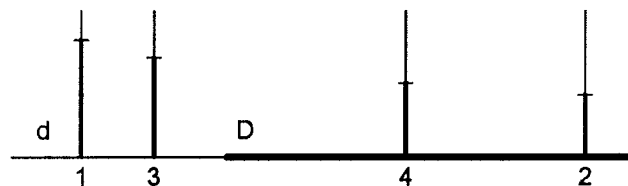
Wzór Bordy (2) pozwala określić wartości współczynnika przy przepływach o dużych liczbach Reynoldsa, w których rzeczywisty rozkład prędkości jest prawie równomierny (1). Tak obliczone wartości współczynnika oporów miejscowych podawane są w literaturze [7,8] i stosowane w obliczeniach inżynierskich.

W spotykanych w praktyce przepływach występujących w instalacjach (np. wodociagowych, ciepłowniczych) liczba Reynoldsa osiąga wartości rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset tysięcy. W takim zakresie występują przepływy słaboturbulentne, w których rzeczywisty profil prędkości w przewodzie przed i za przeszkodą jest nierównomierny ($\alpha \neq 1$). Dodatkowy problem stanowi konieczność uwzględnienia we wzorach stosowanych do obliczeń zmian (w czasie) rozkładów prędkości bezpośrednio za rozszerzeniem, co jest trudne ze względu na występujące w tym obszarze zaburzenia przepływu. W takiej sytuacji podstawę do dokładnego wyznaczenia wartości strat energetycznych, wywołanych przepływem przez nagłe rozszerzenie, mogą stanowić tylko pomiary hydrauliczne.

Doświadczalne wyznaczanie wartości współczynnika ζ

Tradycyjne metody określania wartości współczynnika oporów miejscowych polegają na pomiarze różnicy ciśnień (przy zadanym strumieniu objętości) przed i za przeszkodą między przekrojami blisko położonymi względem siebie, aby można było pominąć straty liniowe. Wówczas, podobnie jak

w rozważaniach teoretycznych, pojawia się problem zaburzenia rozkładu prędkości (zmiennej w czasie wartości współczynnika Coriolisa α) wywołanego oddziaływaniem lokalnej przeszkody, czyli w tym wypadku – rozszerzenia rury. Eliminacja takiego zaburzenia wymusza zatem umieszczenie przekrojów pomiarowych w tak dużych odległościach przed i za przeszkodą, aby profile prędkości były już w pełni uformowane. Wprowadza to jednak dodatkowe straty liniowe. Należałoby zatem zastosować metodę pomiarową umożliwiającą kompensację tych strat (rys. 3) [9]. Istota tej metody – zwanej kompensacyjną – polega na wyeliminowaniu z wyników pomiarów liniowych strat energetycznych poprzez pomiar ciśnienia w dwóch parach przekrojów pomiarowych, tj. 1. i 2. oraz 3. i 4.



Rys. 3. Schemat odcinka pomiarowego

Odległość między przekrojami 1. i 2. jest dwukrotnie większa od odległości między przekrojami 3. i 4., przy czym odległości między przekrojem 3. i oporem oraz oporem i przekrojem 4. należy dobrać zgodnie z normą [10] tak, aby w przekrojach tych rozkład prędkości był już uformowany.

Z uogólnionego równania Bernoulliego [7], napisanego kolejno dla przekrojów 1. i 2. oraz 3. i 4., po uwzględnieniu równania ciągłości, wyznacza się współczynnik w postaci:

$$\zeta = \frac{\alpha_d D^4}{d^4} - \alpha_D - \frac{(\Delta z_{1,2} - \Delta z_{3,4}) \pi^2 g D^4}{8q_v^2} \quad (3)$$

w której:

q_v – strumień objętości, m³/s

$\Delta z_{1,2}, \Delta z_{3,4}$ – wysokość różnicy ciśnień między przekrojami pomiarowymi, m

α_d, α_D – współczynniki Coriolisa w przekrojach przed i za rozszerzeniem

Określony w ten sposób współczynnik charakteryzuje jedynie straty miejscowe. Wyznaczenie jego wartości wymaga znajomości współczynników α_d i α_D , które zależą od liczb Reynoldsa. W literaturze [7,9] i w normach (np. [11]) spotyka się różne założenia dotyczące obliczania wartości współczynników α_d i α_D . Najczęściej są one obliczane przy założeniu $\alpha_d = \alpha_D = 1$, tj. dla równomiernego rozkładu prędkości.

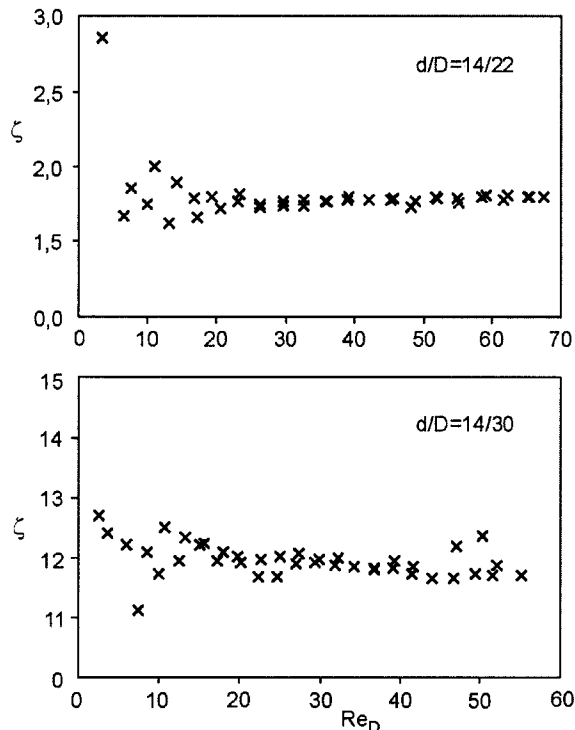
W celu zweryfikowania wartości współczynnika ζ podawanych w literaturze i stosowanych do obliczeń inżynierskich, doświadczalnie (metodą kompensacyjną) określono wartości współczynnika oporów miejscowych w przepływie przez gładkie przewody z nagłym rozszerzeniem. Badania hydrauliczne przeprowadzono na stanowisku (dokładnie opisanym w [12]), w którym wymienny odcinek pomiarowy (rys. 3) umieszczono między dwoma kolektorami zapewniającymi równomierny dopływ do niego. Pomiary wykonano przy:

– stopniach rozszerzenia średnicy rury $d/D \in (0,35; 0,82)$, co odpowiadało stosunkom rzeczywistych pól przekrojów przepływowych w zakresie $A_d/A_D \in (0,12; 0,67)$,

– strumieniach objętości $q_v \in (0,028 \text{ dm}^3/\text{s}; 1,44 \text{ dm}^3/\text{s})$, którym odpowiadały następujące zakresy liczb Reynoldsa: $Re_d \in (2300; 125000)$ oraz $Re_D \in (1000; 90000)$.

Takie zakresy średnic i wartości liczb Reynoldsa występują w instalacjach ciepłych i wodociągowych.

Na rysunku 4 przedstawiono przykład zależności współczynnika oporów miejscowych (ζ) od liczby Reynoldsa (Re_D) dla dwóch stopni rozszerzeń ($d/D=14/22$ i $d/D=14/30$).



Rys. 4. Zależność współczynnika ζ od Re_D

W całym badanym zakresie przepływów dla mniejszych wartości stopnia rozszerzenia przekroju rury otrzymano wyraźne zależności współczynnika ζ od liczby Reynoldsa (rys. 4 – góra). We wszystkich badanych wypadkach widoczny jest rozrzut wyników pomiarów w strefie przejściowej i strefie przepływów słaboturbulentnych, natomiast w górnym przedziale zakresu pomiarowego (większe wartości Re) wyniki były bardziej skupione. Ustalenie się wartości współczynnika strat miejscowych wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa w górnym przedziale zakresu pomiarowego obserwowano jedynie przy mniejszych stopniach rozszerzenia rury (rys. 4 – góra), natomiast przy większych (rys. 4 – dół), w całym zakresie liczb Reynoldsa, wystąpiło zmniejszanie się wartości współczynnika strat wraz ze wzrostem strumienia przepływu. Otrzymane wyniki wskazują, że przyjmowanie w obliczeniach instalacji przepływowych stałości współczynnika strat miejscowych w zakresie przepływów o liczbach Reynoldsa $Re < 10^5$ nie zawsze jest uzasadnione.

Porównanie wyników badań doświadczalnych i obliczeń

W tabeli 1 zestawiono uzyskane doświadczalnie i obliczone wartości współczynnika strat miejscowych (ζ).

Wartości doświadczalne współczynnika ζ wyznaczono z zależności (3), zakładając równomierny rozkład prędkości przed i za przeszkodą ($\alpha_d = \alpha_D = 1$). Odpowiadały one maksymalnym wartościom liczby Reynoldsa z zakresu pomiarowego, a zatem zakresowi przepływu, w którym praktycznie ustaliła się już wartość ζ . Obliczone wartości współczynnika ζ

Tabela 1. Wyznaczone i obliczone wartości współczynnika strat miejscowych przy nagłym rozszerzeniu rury

Stosunek d/D	Wartość ζ wyznaczona	Wartość ζ obliczona
18/24	0,025	0,630
18/26	0,30	1,2
14/22	1,8	2,3
14/24	3,3	3,8
18/34	4,2	6,9
14/30	12	14
14/34	23	26
14/40	46	52

(również przy założeniu $\alpha_d = \alpha_D = 1$) uzyskano ze wzoru Bordy (2). Wzór ten jest najczęściej stosowany w obliczeniach inżynierskich i nie uwzględnia zależności $\zeta = \zeta(Re)$. Stwierdzono, że wartości współczynnika strat, uzyskane na drodze doświadczeń były mniejsze od wartości obliczonych, mimo że w obu wypadkach założenie co do charakteru rozkładu prędkości było takie samo, tj. $\alpha_d = \alpha_D = 1$ (rozkład równomierny).

Podsumowanie

Analiza zjawisk występujących podczas przepływu wody przez rurę z nagłym rozszerzeniem pozwoliła stwierdzić, że ustabilizowanie profilu prędkości następuje dopiero w pewnej odległości od przeszkody. Uwzględnienie oddziaływania tych zjawisk w otoczeniu lokalnej przeszkody – celem doświadczalnego wyznaczenia wartości współczynnika ζ – wymaga zastosowania kompensacyjnej metody pomiarowej, umożliwiającej dokładne określenie tylko strat miejscowej. Wykazano, że podczas przepływów słaboturbulentnych o $Re_D < 10^5$ i dla stopni rozszerzenia średnic rury $d/D \in (0,35; 0,82)$, doświadczalnie wyznaczone wartości współczynnika mały wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa, co należy uwzględnić w dokładniejszych obliczeniach hydraulicznych. W przepływach o większych wartościach liczby Reynoldsa, wartości współczynnika ζ obliczone z powszechnie stosowanego wzoru Bordy dają zawyżone straty miejscowe wywołane nagłym rozszerzeniem rury.

LITERATURA

1. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, H. SZEWCZYK, Z. BECHTOLD, W. WĘDRYCHOWICZ, A. GRIGORIEV: Wizualizacyjne studium formowania się i ewolucji struktur wirowych przy przepływie przez przewężenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
2. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, K. STRZELECKA: Problemy opisu struktury przepływu wody w przewodach z nagłymi rozszerzeniami i zwężeniami przekroju. Ochrona Środowiska, 2005, nr 1, ss. 23–27.
3. M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ, M. WOLSKA: Wpływ nierównomierności rozbioru wody wodociągowej na zmianę jej jakości. Ochrona Środowiska, 2004, nr 4, ss. 21–23.
4. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, H. SZEWCZYK, W. WĘDRYCHOWICZ: Struktura pulsującego przepływu przez rurę z kryzą. Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 2004, nr 25, ss. 155–168.

5. J. FYDRYCH, K. JEŻOWIECKA-KABSCH, H. SZEWCZYK: Pulsujące przepływy cieczy przez przewód z nagłym rozszerzeniem. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
6. A. REVUELTA, L. SANCHEZ, A. LINAN: Confined axisymmetric laminar jets with large expansion ratios. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, Vol. 456, pp. 319–352
7. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, H. SZEWCZYK: *Mechanika płynów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
8. C. GRABARCZYK: Przepływy cieczy w przewodach, *Metody obliczeniowe*. Envirotech, Poznań 1997.
9. W.J. PROSNAK: *Mechanika płynów*. T I. PWN, Warszawa 1970.
10. PN-93/M-53950/01: Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwężek pomiarowych.
11. PN-76/M: Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia.
12. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, A. GRYGORIEV, K. STRZELECKA, H. SZEWCZYK, W. WĘDRYCHOWICZ: Straty hydrauliczne w przepływie przez gładkie rury z nagłym rozszerzeniem. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Białowieża* 2005, Vol. 30, ss. 287–297.

Jeżowiecka-Kabsch, K., Strzelecka, K. The Effect of Pipe Sudden Expansion on Resistance Coefficient Values. *Ochrona Środowiska* 2006, Vol. 28, No. 2, pp. 53–56.

Abstract: In viscous flows through pipe sudden expansion, hydraulic losses caused by jet perturbation appear. The values of resistance coefficients are needed to find these energy losses. Nowadays mainly theoretical formulas are used to calculate these coefficients. This can produce errors because velocity distribution and changes in this distribution are not pointed out (velocity profiles undergo changes in the vicinity of such a local resistance). Experimental studies should be carried out to find

real resistance coefficients and, consequently, real energy losses. Gauging sections must be situated in appropriate distance from the local resistance (formed velocity profile) and it is necessary to compensate linear losses. It was found that for the Reynolds number $Re_D < 10^5$ (diameter ratio ranging between 0.35 and 0.82) the values of the resistance coefficient ζ decrease with an increase in the Reynolds number. It should be taken into account in more precise calculations. For higher Reynolds numbers, the values of ζ calculated using theoretical formulas result in overestimated local losses caused by pipe sudden expansion.

Keywords: Viscous flow, pipe expansion, resistance coefficient.