

Badania przepływu płynu nieściśliwego przez wybraną kryzę segmentową

Streszczenie. Kryzy segmentowe ze względu na swoją budowę zapewniają wiarygodne pomiary dla przepływu płynów zanieczyszczonych ciałami stałymi tworzącymi zawiesiny, które mogą wytrącać się w układach przesyłowych w postaci osadów i zaburzać przez to przepływ. W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych oraz eksperymentalnych badań przepływowych przez kryzę segmentową o przewężeniu $\beta = 0,5$. Wyznaczono za jej pomocą minimalną wartość liczby Re_D , dla której można już uznać, że współczynnik przepływu ma stałą wartość.

Abstract. The segmented flanges, due to its structure, allow to take reliable measurements for flow of fluids polluted with solid bodies forming the suspensions that can precipitate in the transmission systems in the form of deposits and disturb the flow. The results of numerical simulations and experimental flow research through segmented flange of necking $\beta = 0,5$ were presented in the article. The minimum value of Re number was determined for it, of which flow coefficient has constant value. (The research on the flow of incompressible fluid through selected segmented flange)

Słowa kluczowe: przepływ, kryza, badania, symulacja.

Keywords: flow, orifice, research, simulation.

Wstęp

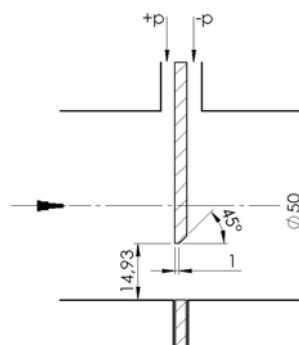
W wielu gałęziach przemysłu występuje konieczność nieprzerwanej kontroli procesów technologicznych, a w tym też jego parametrów. Jednym z nich jest ciągły pomiar strumienia objętości przepływającej cieczy. Najbardziej pewnymi i niezawodnymi w działaniu urządzeniami do realizacji tego zadania są przepływomierze spiętrzające. Wykorzystuje się w nich nagłe przewężenie, na które napotyka na swojej drodze płynąca ciecz w badanym rurociągu. W przewężeniu tym występuje szybki wzrost prędkości płynącej cieczy, który powoduje powstanie różnicowego ciśnienia statycznego w tym obszarze.

Kryzy są chętnie stosowane do pomiarów mimo swoich wad, wśród których można wymienić: trwałą stratę ciśnienia przy przepływie strumieniu oraz niską zakresowość (4:1). Sam pomiar przepływającego strumienia płynu polega na wyznaczeniu wartości ciśnienia różnicowego na elemencie spiętrzającym [1, 2, 3].

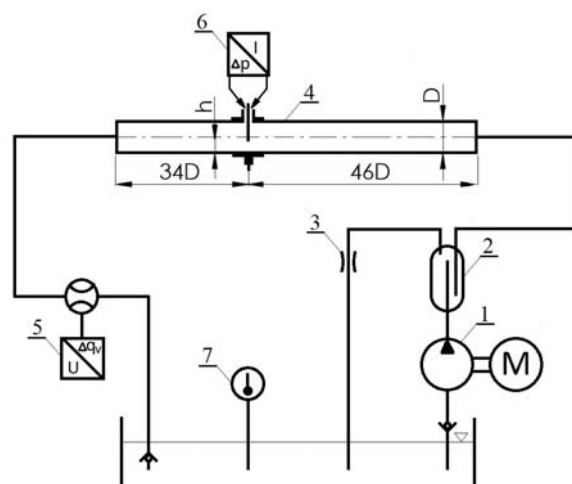
Z elementów spiętrzających na szczególną uwagę zasługują kryzy z których kryza segmentowa pozwala na pomiary przepływu: cieczy zanieczyszczonych ciałami stałymi tworzącymi zawiesiny czy zapyłonych gazów. Zaletą kryzy segmentowej jest to iż otwór przepływowy stanowi odcinek koła co prowadzi do jednostronnego przewężenia przekroju rurociągu [4, 5]. Zaleca się aby dla cieczy zanieczyszczonej otwór kryzy segmentowej umiejscowiono w dolnej części zwężki. Zapewnia to swobodny przepływ zanieczyszczeń w mierzonym płynie, dzięki czemu unika się tworzenia osadu ograniczającego przepływ w rurociągu przed zwężką [6]. Celem artykułu jest porównanie wyników otrzymanych z badań numerycznych z obliczeniami inżynierskimi i danymi eksperymentalnymi uzyskanymi dla kryzy segmentowej (o przewężeniu $\beta = 0,5$) przy przepływie płynu. Celem jest też wyznaczenie minimalnej wartości liczby Re , dla której można już uznać, że współczynnik przepływu ma stałą wartość dla badanej kryzy.

Metodyka przeprowadzenia badań

Badaniom eksperymentalnym i numerycznym poddano kryzę segmentową przedstawioną na rysunku 1 o przewężeniu $\beta = 0,5$ wykonaną ze stali nierdzewnej. Pomiary przepływu strumienia wody przez badaną kryzę przeprowadzono na stanowisku badawczym w obiegu zamkniętym którego uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Schemat badanej kryzy segmentowej



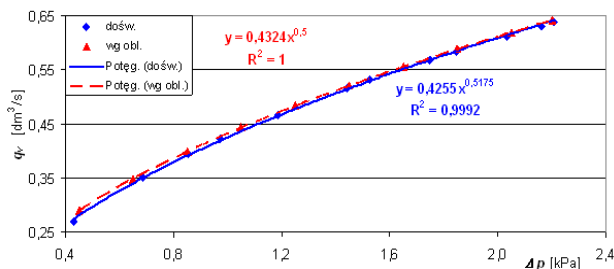
Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego, opis w tekście

Wytwarzany przez pompę wirową (1) strumień wody przepływając poprzez zaprojektowany i wykonany odpowietrznik (2) pozwala na oddzielenie i odprowadzenie ewentualnych pęcherzyków z przepływającego płynu poprzez tzw. upust boczny. Połączenie z wymiennymi dławikami (3) pozwala dodatkowo na skokową regulację strumienia głównego który przepływa przez rurociąg hydrauliczny (4) i elektromagnetyczny przepływomierz porównawczy (5) typu PROMAG 30AT15 (z wyjściem napięciowym 0...10 VDC), który wykorzystywano w

układzie jako wzorzec. Badaną kryzę segmentową (rys. 1) o przewężeniu $\beta = 0,5$ umieszczono w prostoliniowym, gładkim rurociągu hydraulicznym (4) wykonanym ze stali nierdzewnej o średnicy wewnętrznej $\varnothing 50$ mm (o długościach 2,3 m przed i 1,7 m za kryzą). Przetwornikiem różnicy ciśnień (6) typu APR-2000/ALW o zaprogramowanym zakresie pomiarowym 0...2,4 kPa przy wyjściowym standardowym sygnale prądowym 4...20 mA mierzono przytarczowo w sposób punktowy ciśnienie spiętrzenia na kryzie. Temperaturę przepływającej wody odczytywano w zbiorniku z termometru (7) z wyświetlaczem cyfrowym dla każdej serii pomiarowej. Uzyskane z pomiarów na multimetrach SANWA 5000 wyniki, poprzez interfejs szeregowy standardu RS232 rejestrowano w komputerowym systemie pomiarowym PC. Komputer wyposażono w oprogramowanie PC Link Plus które pozwalało z ustawionym czasem próbkowania $\Delta t = 5$ s na zbieranie danych pomiarowych. Na tym stanowisku pomiarowym (rys. 2) dla badanej kryzy segmentowej przeprowadzono badania dla 12 wybranych strumieni objętości z zakresu 0,270 ... 0,638 dm³/s. Dla każdego ustabilizowanego strumienia wykonano po 30 serii obserwacji z których każda była uśredniona z 60 pomiarów. Pomiarzy te dotyczyły strumienia objętości, ciśnienia różnicowego spiętrzenia i temperatury cieczy.

Pomiary, obliczenia i symulacje

Po przeprowadzonych pomiarach wykonano obliczenia i analizę otrzymanych wyników. W wyniku obliczeń otrzymano 12 punktów (każdy punkt był średnią z 30 serii) z uśrednionych wartości tj. różnicowego ciśnienia spiętrzenia na kryzie i odpowiadającego mu strumienia objętości. Pozwoliło to na wyznaczenie 12-sto punktowej charakterystyki przepływowej $q_v = f(\Delta p)$ dla badanej kryzy segmentowej o przewężeniu $\beta = 0,5$. Charakterystykę tę przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wyznaczone charakterystyki strumienia objętości $q_v = f(\Delta p)$

Następnie wykonano obliczenia inżynierskie dla przebadanej wcześniej kryzy na podstawie zależności (1) do wyznaczania strumienia objętości [6].

$$(1) \quad q_v = \frac{C \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \beta^2 \cdot D^2}{4 \cdot \sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

gdzie: C - współczynnik przepływu, ε - współczynnik ekspansji (dla wody $\varepsilon = 1$), β - przewężenie, D - średnica wewnętrzna rurociągu [m], Δp - różnica ciśnień przed i za zwężką w [Pa], ρ - gęstość płynu [kg/m³]

Obliczając wartości strumieni objętości przyjmowano spiętrzenia ciśnienia na kryzie z zakresu 0,45...2,2 kPa. Uzyskane w wyniku obliczeń dane pozwoliły na wykreślenie dodatkowej obliczeniowej charakterystyki strumienia objętości $q_v = f(\Delta p)$ którą nałożono na istniejącą charakterystykę z badań doświadczalnych. Przez punkty

uzyskane z badań doświadczalnych i obliczeń inżynierskich oraz stosując metodę najmniejszych kwadratów przeprowadzono dwie linie trendu. Uzyskano dwa równania trendu dla strumienia objętości, a mianowicie:

- z badań doświadczalnych (2):

$$(2) \quad q_v = 0,4255 \cdot \Delta p^{0,5175}$$

o współczynniku dopasowania $R^2 = 0,9992$

- z obliczeń inżynierskich (3):

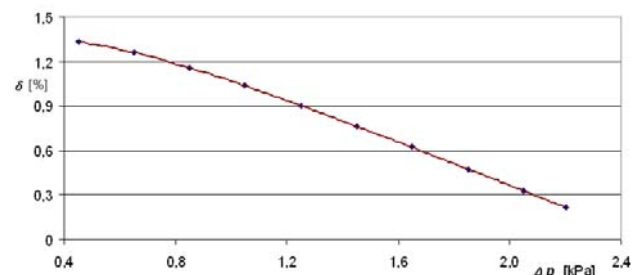
$$(3) \quad q_v = 0,4324 \cdot \Delta p^{0,5}$$

o współczynniku dopasowania $R^2 = 1,0$

Korzystając z równań trendu wyznaczono wartości strumieni objętości przepływającej wody w badanym zakresie zmiany ciśnienia spiętrzenia na kryzie w granicach 0,45...2,2 kPa. Na tej podstawie wyznaczono błąd względny δ_{obl} między badaniami doświadczalnymi, a obliczeniami inżynierskimi który przedstawiono zależnością:

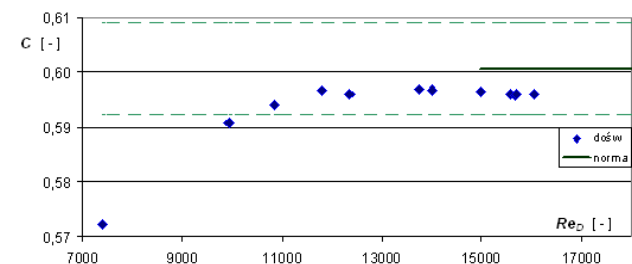
$$(4) \quad \delta_{obl} = \frac{\Delta q_{v\ doś} - \Delta q_{v\ obl}}{\Delta q_{v\ doś}} \cdot 100\%$$

Otrzymane w wyniku obliczeń wartości błędu δ_{obl} przedstawiono w postaci wykresu w funkcji ciśnienia spiętrzenia (rys. 4).



Rys. 4. Błąd względny między strumieniami objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia $\delta = f(\Delta p)$

Współczynnik przepływu C wyznaczono z przekształconego równania (1) przyjmując stałość strumienia objętości w instalacji dla każdej serii pomiarowej. Otrzymane wyniki z pomiarów przedstawiono w postaci punktów na wykresie w funkcji liczby Reynoldsa (rys. 5).



Rys. 5. Wartość współczynnika przepływu $C = f(Re)$

Na wykresie naniesiono w postaci linii ciągłej stałą wartość współczynnika przepływu dla badanej kryzy [6], którą obliczono z równania (5):

$$(5) \quad C = \sqrt{1 - \beta^4} \cdot (0,6057 + 0,2214 \cdot \beta^4 + 0,1944 \cdot \beta^8)$$

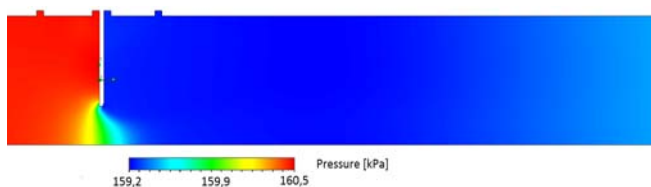
uzyskując wartość $C = 0,6006$.

Dodatkowo na wykresie naniesiono jeszcze dwie przerywane linie określające procentową niepewność względną wyznaczenia współczynnika przepływu [6] z zależności:

$$(6) \quad \delta_C = 1,2 + 3 \cdot \beta^4$$

Linie te naniesiono tworząc pole tolerancji dla współczynnika przepływu o wartości $\pm \delta_C = 1,389\%$ przy przewężeniu kryzy $\beta = 0,5$.

Przeprowadzono również symulacje numeryczne przepływu trójwymiarowego przez badaną kryzę segmentową w programie inżynierskim SolidWorks Flow Simulation dla przepływającego turbulentnego strumienia wody. Jako parametr wejściowy do obliczeń numerycznych przyjęto strumień masy q_m przepływający przez badaną kryzę segmentową. Dla przykładu, uzyskane wyniki symulacji numerycznej przedstawiono graficznie w postaci map rozkładu prędkości i ciśnienia statycznego dla przepływającego strumienia wody $q_m = 0,5$ kg/s co odpowiada liczbie Reynoldsa $Re_D = 12739$. Na rysunku 6 przedstawiono wyznaczony numerycznie rozkład ciśnienia statycznego w obrębie badanej kryzy segmentowej w jej przekroju osiowym w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego.



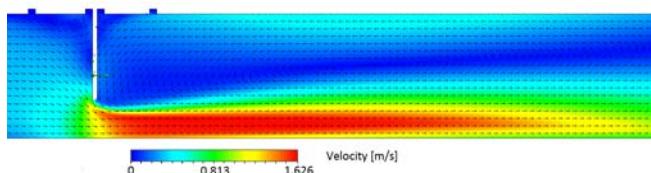
Rys. 6. Rozkład ciśnienia statycznego przy przepływającym strumieniu masy $q_m = 0,5$ kg/s

Po przeprowadzonej analizie mapy rozkładu ciśnienia statycznego, odczytano wartość różnicowego ciśnienia spiętrzenia na kryzie przy odbiorze przytarczowym punktowym. Ciśnienie różnicowe spiętrzenia osiągnęło wartość $\Delta p_{sym} = 1228$ Pa. Celem porównania wyników z badań doświadczalnych i z przeprowadzonych symulacji, oszacowano względny błąd symulacji δ_{sym} spiętrzenia ciśnienia na badanej kryzie segmentowej. Opisano go za pomocą zależności (5):

$$(7) \quad \delta_{sym} = \frac{\Delta p_{dos} - \Delta p_{sym}}{\Delta p_{dos}} \cdot 100 \%$$

Dla przepływającego strumienia masy $q_m = 0,5$ kg/s obliczono wartość względnego błędu symulacji spiętrzenia ciśnienia która wyniosła $\delta_{sym} = 10,1\%$.

Na rysunku 7 przedstawiono wyznaczoną numerycznie mapę prędkości z nałożonym na nią wektorowym polem prędkości w obrębie badanej kryzy segmentowej.



Rys. 7. Rozkład wektorowego pola prędkości przy przepływającym strumieniu masy $q_m = 0,5$ kg/s

Symulacje przepływu dla nieściśliwego strumienia płynu przez kryzę segmentową przeprowadzono w przekroju osiowym w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego przy liczbie

Reynoldsa $Re_D = 12740$. Zaobserwowano że strumień przepływającej cieczy w obszarze kryzy i za nią ulega dużej deformacji a następnie przechodzi w swobodnie płynącą strugę. W obszarze tym występuje strata części ciśnienia spowodowana tworzeniem się wirów za zwężką i strata energii kinetycznej w przepływającym strumieniu na tarcie. Na rysunku 7 uwidoczono formujący się za przewężeniem badanej kryzy obszar o wysokiej prędkości dochodzącej do 1,595 m/s w stosunku do wartości 0,299 m/s w osi przepływającego strumienia na dolicie (w odległości 2,5D przed kryzą segmentową).

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule rozważania dotyczą przepływu strumienia wody przez przebadaną doświadczalnie i numerycznie kryzę segmentową o przewężeniu $\beta = 0,5$ przy zmianie liczb Reynoldsa w zakresie $Re_D = 7120 \dots 16300$. W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych i obliczeń inżynierskich wyznaczono dla niej charakterystyki przepływowe strumienia objętości w funkcji ciśnienia spiętrzenia w formie punktów, przez które przeprowadzono linie trendów. Pozwoliło to na oszacowanie względnego błędu między obliczeniami inżynierskimi a badaniami doświadczalnymi. Błąd ten nie przekracza 1,34% przy spiętrzeniu ciśnienia na kryzie wynoszącym 0,45 kPa. Natomiast przy wzroście przepływającego strumienia maleje on praktycznie liniowo do wartości 0,218%, co ma miejsce dla spiętrzenia ciśnienia wynoszącego 2,2 kPa.

Wykonane badania doświadczalne dla kryzy segmentowej o przewężeniu $\beta = 0,5$ pozwoliły na obniżenie minimalnej wartości liczby Reynoldsa do $Re_D = 10000$ od której współczynnik przepływu ma już stałą wartość przy zachowaniu założonej w normie niepewności względnej [6].

Przeprowadzona symulacja numeryczna dla strumienia charakteryzującego się liczbą Reynoldsa $Re_D = 12739$ pozwoliła oszacować względny błąd symulacji ciśnienia różnicowego spiętrzenia na poziomie $\delta_{sym} = 10,1\%$.

Symulacja w programie inżynierskim SolidWorks Flow Simulation dla strumienia turbulentnego w pełni potwierdza przydatność tego sposobu badań do wyznaczania wartości wielkości charakteryzujących przepływ. Jest ona korzystniejsza w porównaniu z kosztownymi i czasochłonnymi badaniami doświadczalnymi.

Autorzy: dr inż. Andrzej Mrowiec, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu, Wydział Politechniczny, ul. Nowy Świat 4, 62-800 Kalisz, E-mail: a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl; mgr inż. Marcin Heronimczak, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu, Wydział Medyczno-Społeczno-Techniczny we Wrześni, ul. Nowy Świat 4, 62-800 Kalisz, E-mail: marcin.heronimczak@gmail.com

LITERATURA

- [1] Golijanek-Jędrzejczyk A., Świsulski D., Hanus R., Zych M., Petryka L., Uncertainty of the liquid mass flow measurement using the orifice plate, *Flow Measurement and Instrumentation* 62, (2018), 84-92
- [2] Wróblewska E., Synowiec P., Wędrychowicz W., Andrzejewicz A., Błędy w pomiarach strumieni objętości zwężką podwójną przy odwrótnym ustawieniu kryz w rurociągu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94, NR 8/2018, 154-157
- [3] Turkowski M., *Metrologia przepływów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2018
- [4] Kremlewska P. P., *Raschodimery i scetniki kolicestva vescestv*, Izd. Politechnika, Saint Petersburg, 2002
- [5] Mrowiec A., Kasprzak D., Pomiar kryzą segmentową strumienia medium dla małych liczb Reynoldsa, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG*, Nr 49/2016, 75-77
- [6] PN-93/M-53950/01, *Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwężek pomiarowych*, Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa 1994