

Wpływ erozji powierzchni napływowej kryzy ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia na wartości współczynnika przepływu

Streszczenie. W artykule wyznaczono wartości współczynników przepływu dla kryzy ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia w przypadku zmian chropowatości jej powierzchni napływowej wywołanych przez erozję materiału. Przedstawiono przebieg zmian współczynnika przepływu oraz policzono błędy względne. Zamieszczono również przykładowe rozkłady ciśnień różnicowych na kryzie dla czterech wybranych chropowatości i różnych strumieni przepływu wody.

Abstract. The article determines the values of flow coefficients for an ISA orifice with a paradiisc pressure pickup in the event of changes in the roughness of its inflow surface caused by material erosion. The course of flow coefficient changes is presented and relative errors are calculated. Examples of differential pressure distributions on the orifice for four selected roughnesses and various water flow streams are also provided. (The influence of erosion of the inflow surface of the ISA orifice with a paradiisc pressure pickup on the flow coefficient values).

Słowa kluczowe: kryza pomiarowa, współczynnik chropowatości, współczynnik przepływu, ciśnienie różnicowe.

Keywords: measuring orifice, roughness coefficient, flow coefficient, differential pressure.

1. Wstęp

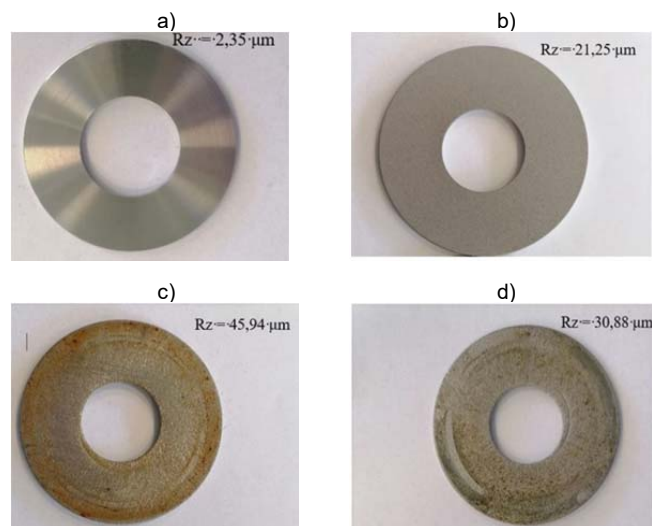
Metoda zwężkowa jest bardzo często stosowana w pomiarach strumieni przepływów płynów; jak podaje w swojej pracy [1] Kabza ok 50% wszystkich urządzeń do pomiaru strumieni przepływu zainstalowanych w instalacjach przepływowych to różnego typu zwężki lub kryzy. Najczęściej z nich w pomiarach wykorzystywane są kryzy ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia. Podstawowe rodzaje zwężek standardowych wraz z warunkami ich stosowania oraz zależnościami do obliczania wartości współczynnika przepływu C przedstawione zostały w normie ISO 5167-1 [2]. Natomiast informacje związane z wykorzystaniem kryz niestandardowych można znaleźć w pracach [3-6]. W pomiarach strumieni przepływu, bardzo ważny jest montaż kryzy odpowiednio do kierunku przepływu płynu, w odległości minimum kilkunastu średnic od elementów zaburzających przepływ (zawory, zasuwy, przepustnice czy kolana) [7,8], a także w obszarze przepływów jednofazowych tzn. bez występowania w przepływie drugiej fazy np. gazowej [9÷11]. Istotna jest również, po długim okresie eksploatacji, kontrola stanu jej powierzchni, np. w trakcie wykonywania remontów czy przeglądu instalacji. Po okresie długiej eksploatacji kryzy ulegają zużyciu: przy stosowaniu kryzy centrycznej bardzo często zmienia się ostrość krawędzi wlotowej, występuje również osadzanie w otworze kryzy lub tuż za nią cząsteczek zanieczyszczeń z przepływającego płynu. Zmienia się również chropowatość jej powierzchni napływowej. Powoduje to zmianę geometrii samej kryzy, jak i kinematyki przepływu, a co za tym idzie postępującą zmianę wartości współczynnika przepływu.

Publikacji związanych z wpływem zużywania się części wlotowej kryzy lub zmianami ostrości jej krawędzi na wartości współczynnika przepływu, a wynikających z długotrwałej jej eksploatacji praktycznie się nie spotyka. Turkowski w pracy [12] podaje wartość dodatkowego współczynnika poprawkowego, który należy uwzględnić w przypadku zmian ostrości krawędzi wlotowej kryzy. Jednak obliczenie tego współczynnika jest niedokładne, a przyczyną jest trudność w prawidłowym wyznaczeniu promienia krawędzi wlotowej kryzy. Brak prac związanych z wpływem zmian chropowatości powierzchni napływowej samej kryzy na zmiany wartości współczynników przepływu spowodował, że autorzy publikacji zajęli się tym

zagadnieniem. W artykule [13] przedstawili wyniki zmian chropowatości powierzchni części napływowej kryzy segmentowej na jej charakterystyki. W niniejszym artykule w badaniach wykorzystano kryzę ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia, a pomiary wykonano przy czterech wartościach chropowatości jej powierzchni napływowej.

2. Sposób realizacji pomiarów

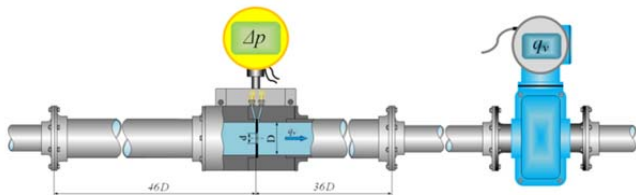
Na rysunku 1 przedstawiono widoki części napływowej kryzy centrycznej po zmianie chropowatości jej powierzchni. Dla porównania obrazów powierzchni, na rysunku tym, zamieszczono również widok kryzy o chropowatości powierzchni wyrażonej parametrem $R_z = 2,35 \mu\text{m}$, ale o większej średnicy otworu przepływowego. Uproszczony schemat pomiarowego układu przepływowego w stanowisku badawczym pokazano na rysunku 2.



Rys.1. Zdjęcia powierzchni napływowych kryz o chropowatości a) $R_z=2,35 \mu\text{m}$ b) $R_z=21,25 \mu\text{m}$ c) $R_z=45,94 \mu\text{m}$ d) $R_z=30,88 \mu\text{m}$

Kompletne stanowisko badawcze zbudowano wykorzystując zbiornik o pojemności $0,35 \text{ m}^3$ w układzie zamkniętym. Przepływowy układ hydrauliczny składa się z dwóch połączonych ze sobą łukiem równoległych rurociągów o wewnętrznych średnicach: $D = 50 \text{ mm}$ (górny) oraz $D = 15 \text{ mm}$ (dolny). W górnym rurociągu zamontowano

w obudowie badane kryzy centryczne, każdą o innej chropowatości i średnicy otworu $d = 24,942 \text{ mm}$. Prostoliniowe odcinki przepływowe wynoszą odpowiednio: przed kryzą $2,3 \text{ m}$ ($46 \cdot D$), a za kryzą $1,8 \text{ m}$ ($36 \cdot D$). W dolnym równoległym rurociągu zamontowano elektromagnetyczny przepływomierz wzorcowy tak, że na dolicie prostoliniowy odcinek ma długość $1,5 \text{ m}$ ($100 \cdot D$), a za nim na wylocie $0,75 \text{ m}$ ($50 \cdot D$).



Rys.2. Przepływowy układ pomiarowy.

Zainstalowana w układzie przepływowym rurociągu DN 50 pompa odśrodkowa zapewnia przepływ wody, poprzez wytworzenie w nim strumienia objętości $q_v < 0,75 \text{ dm}^3/\text{s}$, który odpowiada liczbie Reynoldsa $Re < 20\ 000$. Różnicę ciśnień statycznych na badanej kryzie mierzone przytarczcowo przetwornikiem różnicy ciśnień typu APR-2000/ALW o wyjściowym sygnale prądowym $4 \dots 20 \text{ mA}$. Do przeprowadzanych pomiarów zaprogramowano go przy stałej czasowej $t = 5 \text{ s}$ na zakres pomiarowy różnicy ciśnień $\Delta p = 0 \dots 10,4 \text{ kPa}$. W tym zakresie pomiarowym graniczny błąd pomiaru przetwornikiem nie przekracza $0,1\%$ wartości wskazanej różnicy ciśnień. Jako przepływomierz wzorcowy do pomiaru przepływającego strumienia objętości zastosowano elektromagnetyczny przepływomierz PROMAG 30AT15 firmy Endress+Hauser o wyjściowym sygnale prądowym $0 \dots 20 \text{ mA}$. Do przepływającego strumienia objętości zaprogramowano go przy stałej czasowej $t = 5 \text{ s}$ na zakresie pomiarowy $q_v = 0 \dots 1,0 \text{ dm}^3/\text{s}$ przy błędzie pomiaru równym $\Delta q_v = \pm(0,2\% \cdot q_v \text{ - mierzone} \pm 0,05\% \cdot q_v)$. Parametry charakteryzujące przepływ w postaci sygnałów z przetwornika różnicy ciśnień i przepływomierza wzorcowego mierzone multimetrami SANWA 5000, które połączono poprzez interfejs RS232 z komputerem PC. Komunikację z multimetrami i akwizycję danych pomiarowych umożliwia zainstalowane na komputerze specjalistyczne oprogramowanie PC Link Plus z ustawionym czasem próbkowania $\Delta t = 3 \text{ s}$. Akwizycja danych pomiarowych polegała na rejestracji wartości prądowych z przetworników mierzących: strumień objętości q_v i różnicę ciśnienia spiętrzenia Δp na kryzie w czasie rzeczywistym. Pomiaru wykonano dla 11 strumieni przepływów wody w zakresie odpowiadających liczbom Reynoldsa z przedziału $4100 < Re < 17000$. Do wyznaczenia współczynnika przepływu C dla dla kryzy ISA wykorzystano równanie 1).

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

gdzie: Δp - różnica ciśnień statycznych na kryzie, ρ - gęstość wody, A_k - pole przekroju kryzy, ε - współczynnik ekspansji (dla wody $\varepsilon = 1$)

W tabeli 1 przedstawiono uśrednione wartości dla właściwości fizycznych przepływającego płynu w instalacji oraz podstawowe parametry kryzy segmentowej.

3. Wyniki eksperymentu

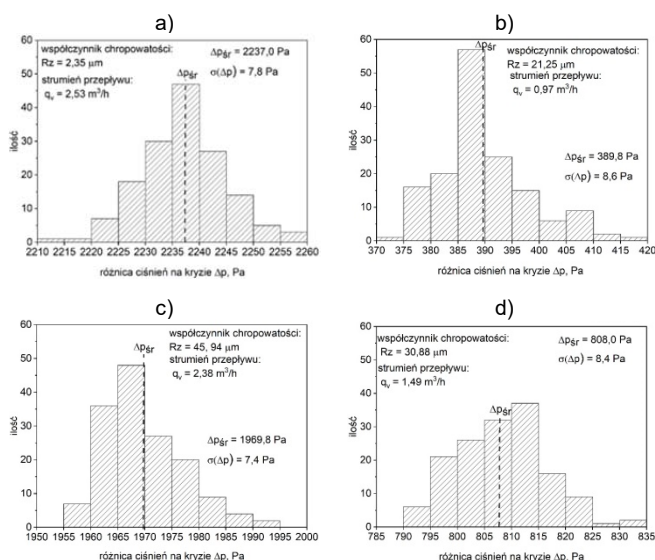
3.1. Rozkłady ciśnień różnicowych na kryzie

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe rozkłady różnicy ciśnień na kryzie dla różnych wartości chropowatości

powierzchni wyrażonej parametrem R_z , przy wybranych strumieniach przepływu.

Tabela 1. Właściwości fizyczne przepływającego płynu oraz wybrane parametry kryzy segmentowej.

rodzaj czynnika	średnia temperatura, °C	gęstość, kg/m^3	lepkość m^2/s
Woda	24,05	997,3	$0,91832 \cdot 10^{-6}$
średnica wewnętrzna rurociągu, mm	współczynnik przepływu C ($R_z = 2,35 \mu\text{m}$)	współczynnik ekspansji	pole otworu przewężenia kryzy, mm^2
50, 35	0,606	1	622,10



Rys.3. Wybrane rozkłady ciśnień różnicowych na kryzie przy różnej chropowatości jej strony napływowej a) $R_z = 2,35 \mu\text{m}$ b) $R_z = 21,25 \mu\text{m}$ c) $R_z = 45,94 \mu\text{m}$ d) $R_z = 30,88 \mu\text{m}$

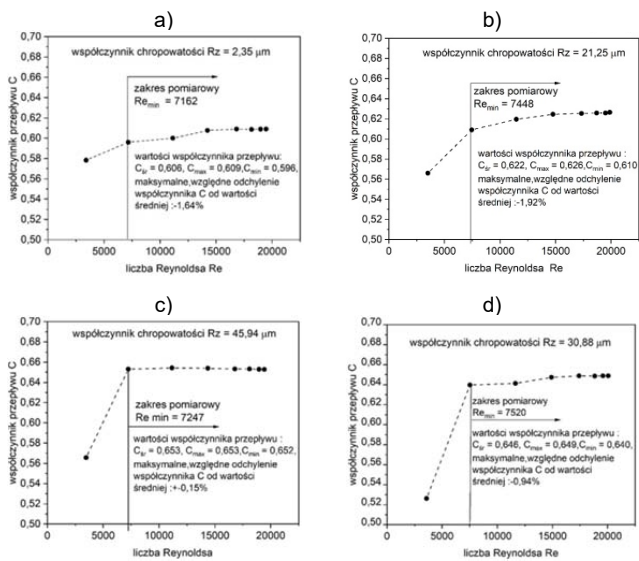
Powyższe rozkłady ciśnień pokazują różnicę między rozkładami przy zwiększeniu chropowatości powierzchni napływowej kryzy. W przypadku kryzy nowej dla której chropowatość powierzchni wyrażona parametrem R_z wynosi $2,35 \mu\text{m}$, rozkład ciśnień jest praktycznie symetryczny względem wartości średniej i w zasadzie jest rozkładem normalnym. Zwiększenie chropowatości powoduje, zmianę symetryczności rozkładów ciśnień – wydłuża się szerokość rozkładu po prawej stronie od wartości średniej. Należy również zauważyć, że odchylenie standardowe różnicy ciśnień nie przekracza wartości 10 Pa . Świadczy to o tym, że zmiana chropowatości nie powoduje wzrostu pulsacji różnicy ciśnień - przepływ jest nadal stabilny. Zwiększenie chropowatości może powodować zmianę rozkładu prędkości przepływającej przez kryzę cieczy z powodu oderwania lub rozciągnięcia warstwy przyściennej. Zmiany te wpływają na wartości współczynnika przepływu C dla kryzy.

3.2. Zmiany wartości współczynnika przepływu C

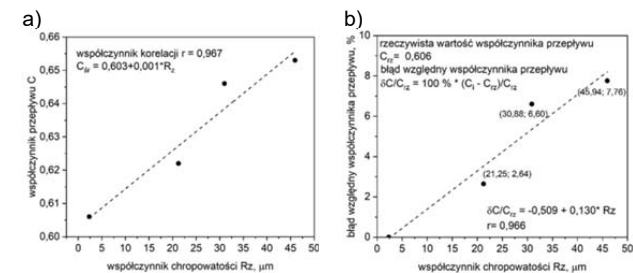
Na rysunku 4 przedstawiono zależności zmian współczynnika przepływu C od liczby Reynoldsa dla różnych wartości chropowatości powierzchni określonej parametrem R_z .

Jak wynika z rysunku 4, począwszy od liczby Reynoldsa ok. 7500 , wartości współczynników przepływu C dla wszystkich zwęzek niewiele zmieniają się z wzrostem liczby Reynoldsa – maksymalne, względne odchylenie od wartości średniej nie przekracza wartości 2% . Można zatem przyjąć, że błąd graniczny współczynników przepływu C przy różnej chropowatości powierzchni napływowej zwężki

wynosi $\Delta C = \pm 2\%$. Liczbę Reynoldsa $Re = 7500$, niezależnie od wartości współczynnika chropowatości, można przyjąć za dolną granicę pomiaru.



Rys.4. Zależności współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa przy różnych wartościach chropowatości powierzchni napływowej kryzy a) $R_z=2,35 \mu\text{m}$ b) $R_z=21,25 \mu\text{m}$ c) $R_z=45,94 \mu\text{m}$ d) $R_z=30,88 \mu\text{m}$.



Rys.5. Zmiany współczynnika przepływu i błędów względnego współczynnika przepływu od wartości chropowatości powierzchni (R_z).

Należy również zauważyć, że ze wzrostem chropowatości powierzchni napływowej, począwszy od minimalnej liczby Reynoldsa średnie wartości współczynników przepływu C rosną. Przedstawia to rysunek 5 na którym pokazano również wartości błędów względnego współczynnika przepływu.

Można zauważyć, że zmiany wartości współczynnika C są praktycznie liniową funkcją wartości chropowatości powierzchni napływowej - współczynnik korelacji liniowej wynosi $r = 0,967$. Błędy względne współczynnika przepływu zmieniają się od wartości 2,6% dla $R_z = 21,25 \mu\text{m}$ do wartości 7,8% dla $R_z = 45,94 \mu\text{m}$. Wartości te są dość znaczące, a co za tym idzie powoduje to konieczność wymiany zwężki na nową po długim okresie eksploatacji lub wyznaczenie prawidłowej wartości jej współczynnika przepływu C .

4. Podsumowanie.

Tematyka artykułu dotyczyła wpływu zmiany współczynnika przepływu C dla kryzy ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia w zależności od wartości chropowatości jej powierzchni napływowej. Pomiar wykonano dla zwężki nowej oraz dla trzech innych chropowatości zmieniając jej wartości poprzez piaskowanie, kulkowanie i piłowanie piłnikiem po kulkowaniu. Wyniki badań pokazują, że wartości współczynników przepływu C niezależnie od wartości chropowatości powierzchni napływowej są stabilne

i niewiele się zmieniają począwszy od minimalnej wartości liczby Reynoldsa - wartość ta dla wszystkich przebadanych chropowatości R_z wynosi $Re_{\min} = 7500$. Wraz ze wzrostem wartości chropowatości powierzchni napływowej określonej parametrem R_z , średnie wartości współczynników przepływu zwiększają się - dla największej wartości chropowatości powierzchni $R_z = 45,95 \mu\text{m}$ przyrost wynosi 7,8%. Oznacza to konieczność wymiany zwężki na nową lub wyznaczenia nowej wartości współczynnika przepływu C po długim okresie jej eksploatacji. Należy również zauważyć, że przy zmianie wartości chropowatości powierzchni napływowej ulega zmianie kształt rozkładu mierzonych ciśnień różnicowych na zwężce - rośnie szerokość rozkładu dla wartości ciśnień różnicowych większych niż wartość średnia, po prawej jego części. Obserwacja rozkładów ciśnień różnicowych może być zatem wskaźnikiem świadczącym o stopniu zużycia kryzy - wymaga to jednak jeszcze wielu badań dla podstawowych rodzajów zwęzek i dla większego zakresu liczb Reynoldsa.

Autorzy: dr. inż. Andrzej Mrowiec, Uniwersytet Kaliski, Wydział Politechniczny, ul. Nowy Świat 4, 62-800 Kalisz; a.mrowiec@uniwersytetkaliski.edu.pl; dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, artur.andruszkiewicz@pwr.edu.pl; dr inż. Piotr Piechota, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, piotr.piechota@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Kabza Z., Pomiary strumieni płynów (przewodnik), Studia i monografie z.90, Politechnika Opolska, Opole (1996)
- [2] PN-EN ISO 5167-1:2005 Pomiary strumienia płynu za pomocą zwęzek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym - Część 1: Zasady i wymagania ogólne.
- [3] Mrowiec A., Heronimczak M.: Badanie przepływu płynu nieściśliwego przez wybraną kryzę segmentową, Przegląd Elektrotechniczny, R.95, 11(2019), 63-65
- [4] Golijanek-Jędrzejczyk A., Mrowiec A., Hanus R., Zych M., Świsulski, D.: Uncertainty of mass flow measurement using centric and eccentric orifice for Reynolds number in the range $10,000 \leq Re \leq 20,000$; Measurement, v. 160,10785, (2020),
- [5] Wróblewska E., Synowiec P., Wędrychowicz W., Andruszkiewicz A., Błędy w pomiarach strumienia objętości zwężką podwójną przy odwrotnym ustawieniu kryz w rurociągu, Przegląd elektrotechniczny, R.94, 8 (2020), 154 -157
- [6] Anna Golijanek-Jędrzejczyk, Andrzej Mrowiec, Sławosław Kleszcz, Robert Hanus, Marcin Zych, Marek Jaszczur, A numerical and experimental analysis of multi-hole orifice in turbulent flow, Measurement, 193,2022.
- [7] Straka M., Koglin C., Eichler T.: Segmental orifice plates and the emulation of the 90°-bend, tm-Teschnisches Messen, 87 (2020), 18-31
- [8] Piotr Synowiec, Artur Andruszkiewicz, Wiesław Wędrychowicz, Piotr Piechota, Elżbieta Wróblewska, Influence of Flow Disturbances behind the 90° Bend on the Indications of the Ultrasonic Flow Meter with Clamp-On Sensors on Pipelines, Sensors, 21,3 2021.
- [9] Tomaszewska-Wach B., Rzaśa M.R., A Correction Method for Wet Gas Flow Metering Using a Standard Orifice and Slotted Orifices, Sensors, 21 (2021), 2291, DOI: 10.3390/s21072291
- [10] Rzaśa M.R., Tomaszewska – Wach B., Pomiar strumienia mokrego gazu kryzą standardową, Przegląd elektrotechniczny, R.95, 11, (2019), 86-89
- [11] Piotr Synowiec, Artur Andruszkiewicz, Wiesław Wędrychowicz, Paweł Regucki, Badania możliwości pomiaru strumienia objętości czynnika dwufazowego przepływomierzem ultradźwiękowym, Przegląd Elektrotechniczny, r.91,nr 10/2015, s. 179-182, doi:10.15199/48.2015.10.37
- [12] Turkowski M., Metrologia przepływów, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (2018)
- [13] Andrzej Mrowiec, Artur Andruszkiewicz, Piotr Piechota, Effect of Changes in the Roughness of the Inflow Surface of a Sloping Segmental Orifice with Point Pressure Reception on Its Characteristics, Advances in Science and Technology. Research Journal, 17,4,2023