

## Wpływ oczyszczenia danych pomiarowych na wyznaczenie wartości przepływu masowego za pomocą kryzy

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę oczyszczenia eksperymentalnych wyników pomiaru przepływu masowego za pomocą kryzy z systematycznych oddziaływań. Zaprezentowano także wpływ przeprowadzenia takiej procedury na zmianę wartości estymaty menzurandy przepływu oraz wartości niepewności typu A. Wyniki uzyskanych analiz pozwalają potwierdzić zasadność kontrolowania składowych systematycznych w wynikach pomiaru przepływu cieczy i ich eliminacji przed przeprowadzeniem procedury szacowania niepewności pomiaru.

**Abstract.** The article presents an analysis of the purification of experimental mass flow measurement results from systematic interactions. The influence of performing such a procedure on changing the value of the flow estimation and the uncertainty of type A is presented. The results of the obtained analyzes allow to confirm the validity of controlling the systematic components in the results of liquid flow measurement and their elimination before conducting the procedure of estimating the uncertainty of measurement. (**The impact of cleaning the measurement data on the determination of the mass flow using orifice**)

**Słowa kluczowe:** przepływ, kryza, menzurand, niepewność.

**Keywords:** flow, orifice, measurand, uncertainty.

### Wstęp

Znajomość prawidłowej wartości strumienia masy przepływającej cieczy jest ważna ze względu na fakt, iż występuje on w wielu procesach technologicznych, a także jego pomiar jest istotnym zagadnieniem badawczym.

Jedną z najczęściej stosowanych metod pomiaru przepływu jest metoda z wykorzystaniem kryzy pomiarowej. Kryza to cienka tarcza wmontowana w rurociąg. Zaletami tego typu przepływomierza jest prosta konstrukcja, wysoka niezawodność działania oraz możliwość zastosowania w szerokich zakresach ciśnienia i temperatury [1, 2, 3].

Współcześnie wymaga się, aby wraz z prezentowanym wynikiem pomiaru przedstawiany był także parametr jakościowy charakteryzujący ten pomiar, czyli ocena niedokładności pomiaru – niepewność pomiaru [3, 4, 5, 6, 7].

Często w przypadku badań doświadczalnych występują silne, systematyczne i nieznane oddziaływania czynników zakłócających pomiar [8], których efektem jest znacznie większy rozrzut wyników, a tym samym nieprawidłowa wartość estymaty menzurandy oraz niepewności typu A.

W niniejszym artykule przedmiotem zainteresowania autorów jest przeprowadzenie analizy wpływu oczyszczenia eksperymentalnych wyników pomiaru przepływu wody z dryftu i sprawdzenie, jak taka obróbka danych wpłynie na wartość estymaty menzurandy masowego natężenia przepływu oraz wartość niepewności typu A.

### Badania doświadczalne

Zasada pomiaru z wykorzystaniem kryzy pomiarowej polega na tym, że strumień cieczy przepływający w przewodzie ulega przed zwężką przewężeniu. Natomiast za zwężką osiąga on minimalny przekrój, po czym strumień rozszerza się stopniowo wypełniając całą objętość przewodu. Ciśnienie płynu przed kryzą nieco wzrasta i zmniejsza się do minimum za kryzą w największym przekroju strumienia. Dalej wskutek spadku prędkości ciśnienie znów wzrasta, nie osiągając jednak wartości ciśnienia przed zwężką. Strata części ciśnienia jest wywołana stratą energii na tarcie i tworzenie się wirów. Jej wartość zależy od kształtu przewężenia przewodu i jest największa przy stosowaniu kryzy.

Zależność pomiędzy strumieniem przepływu  $q$  a różnicą ciśnień  $\Delta p$  można wyznaczyć na podstawie analizy przemiany energii potencjalnej (ciśnienia) w energię

kinetyczną (prędkości) przy przepływie przez zwężkę. Podczas tych rozważań zakłada się, że zachowana jest ciągłość strugi przepływającego płynu i że jego gęstość nie ulega zmianie w czasie przepływu przez zmniejszony przekrój.

Zależność umożliwiającą wyznaczenie strumienia masy  $q$  jest następująca [3]:

$$(1) \quad q = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}$$

gdzie:  $C$  – współczynnik przepływu zwężki [-],  $d$  – średnica kryzy [m],  $D$  – średnica wewnętrzna rurociągu [m],  $\varepsilon$  - liczba ekspansji odniesiona do warunków przed zwężką,  $\Delta p$  – różnica ciśnienia [Pa],  $\rho_1$  – gęstość cieczy [kg/m<sup>3</sup>].

Strumień masy  $q$  jest wyznaczany pośrednio, a funkcja pomiaru jest zależna od następujących parametrów:  $q = f(C, d, D, \Delta p, \rho_1)$ .

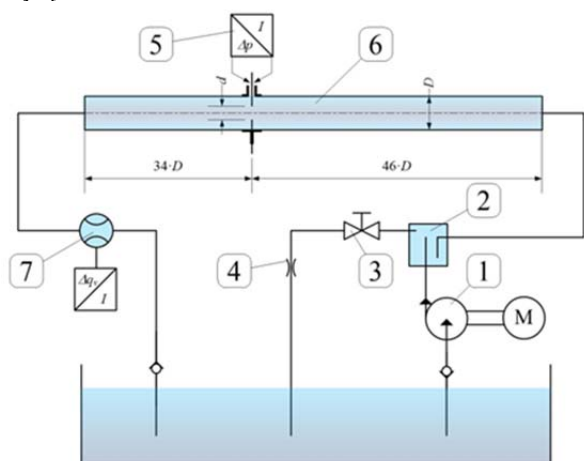
Przedstawiona w dalszej części artykułu analiza niepewności pomiaru strumienia masy  $q$  została przeprowadzona przy następujących założeniach:

- medium jest płynem, czyli współczynnik  $\varepsilon = 1$ ,
- w każdym punkcie dowolnego przekroju prostopadłego do osi strumienia jest zachowana ciągłość strugi przepływającego płynu oraz jej równa prędkość,
- nieściśliwości płynu bez tarcia wewnętrznego i o stałej gęstości  $\rho_1 = \rho_2 = \text{const.}$ ,
- wykonano min. 30 pomiarów, na podstawie których uzyskano  $n = 30$  wyników obserwacji masowego natężenia przepływu  $q$ .

Badania eksperymentalne kryzy przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, którego schemat przedstawiono na rys 1. Obiektem badanym była kryza centryczna (ISA) o średnicy wewnętrznej  $d$  równej 25,005 mm.

Przepływ wody w prezentowanej instalacji wymuszano pompą wirową (1) w układzie zamkniętym. Strumień wody przepływał przez odpowietrznik (2), gdzie następowało oddzielenie ewentualnych pęcherzyków powietrza. Odprowadzono je wraz z częścią strumienia przez zawór (3) i regulowany skokowo upust boczny (wymienne dławiki upustowe (4)), regulując przy tym strumień przepływającej wody w instalacji pomiarowej.

Główna część strumienia wody przepływała przez rurociąg pomiarowy (6) (ze stali nierdzewnej o średnicy wewnętrznej  $D = 50$  mm), w którym zamontowano badaną kryzę.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego [7], opis w tekście.

Pomiarowe ciśnienie spiętrzenia na kryzie mierzone przetwornikiem różnicy ciśnień APR 2000/ALW (5) z zaprogramowanym zakresem pomiarowym  $\Delta p = 2,4$  kPa, na którym względny błąd podstawowy wynosi 0,15%.

Celem badań było wyznaczenie estymaty zmierzonego masowego natężenia przepływu  $q$  (jako wartości średniej arytmetycznej) oraz odpowiadającej jej niepewności rozszerzonej  $U(q)$  dla współczynnika rozszerzenia  $k_p = 2,00$  (co odpowiada prawdopodobieństwu 95%), zgodnie ze wzorem:

$$(2) \quad U(q) = k_p \cdot u_c(q)$$

Wyznaczenie niepewności rozszerzonej  $U(q)$  wymaga najpierw oszacowania niepewności złożonej  $u_c(q)$ . Zakładając brak korelacji pomiędzy mierzonymi wielkościami, zgodnie z prawem przenoszenia niepewności niepewność złożoną  $u_c(q)$  można wyznaczyć na podstawie zależności [3]:

$$(3) \quad u_c(q) = \sqrt{u_A^2(q) + u_B^2(q)} = \sqrt{u_A^2(q) + \left(\frac{\partial q}{\partial C}\right)^2 \cdot u^2(C) + \left(\frac{\partial q}{\partial d}\right)^2 \cdot u^2(d) + \left(\frac{\partial q}{\partial D}\right)^2 \cdot u^2(D) + \left(\frac{\partial q}{\partial \Delta p}\right)^2 \cdot u^2(\Delta p) + \left(\frac{\partial q}{\partial \rho_1}\right)^2 \cdot u^2(\rho_1)}$$

gdzie:  $u_A(q)$  - oszacowana niepewność typu A przepływu masowego  $q$  wyznaczona zgodnie ze wzorem:

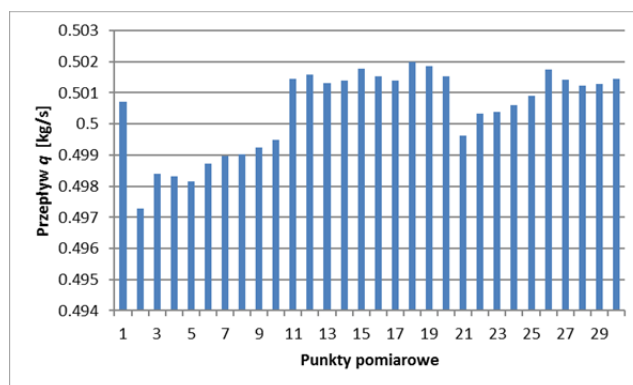
$$(4) \quad u_A(q) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}$$

$u_B(q)$  - oszacowana niepewność typu B przepływu masowego  $q$  uwzględniająca: niepewność  $u(C)$  współczynnika przepływu  $C$ , niepewność  $u(d)$  średnicy kryzy, niepewność  $u(D)$  średnicy rurociągu, niepewność  $u(\Delta p)$  różnicy ciśnienia oraz niepewność pomiaru  $u(\rho_1)$  gęstości cieczy.

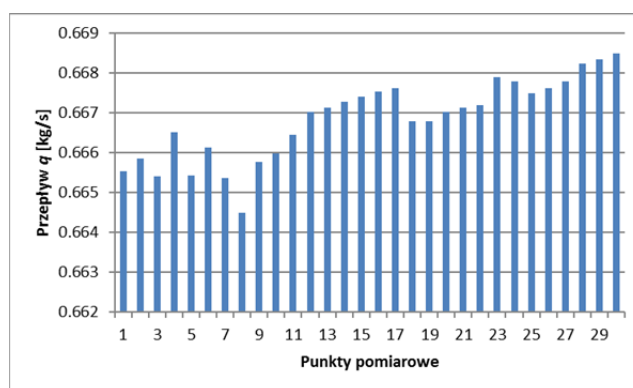
Współczynniki wagowe występujące w  $u_B(q)$  (3) (różniczki cząstkowe) oraz niepewności:  $u(C)$ ,  $u(d)$ ,  $u(D)$ ,  $u(\Delta p)$  i  $u(\rho_1)$  zostały wyznaczone i zaprezentowane w [3].

## Analiza wyników pomiaru przepływu

Badania przeprowadzono dla dwóch różnych wartości masowego natężenia przepływu  $q$  równych 0,50044 kg/s i 0,66685 kg/s. Dla każdej wartości  $q$  wykonano 30 pomiarów. Uzyskane wyniki zaprezentowano odpowiednio na rys. 2 i rys. 3. Obliczone niepewności  $u_A(q)$  oraz niepewności rozszerzone  $U(q)$  [3] zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Dane pomiarowe dla przepływu  $q$  równego 0,50044 kg/s



Rys. 3. Dane pomiarowe dla przepływu  $q = 0,66685$  kg/s

Tabela 1. Parametry uzyskane dla danych surowych

Lp.	$q$ [kg/s]	$u_A(q) \cdot 10^{-4}$ [kg/s]	$U(q) \cdot 10^{-4}$ [kg/s]
1	0,50044	4,0166	9,7075
2	0,66685	4,8094	12,0435

Analizując przebiegi przedstawione na rys. 2 i rys. 3 można zauważyć regularne zmiany dryftu, jakie występują w uzyskanych wynikach. Zmiany takie można wykryć i częściowo wyeliminować analizując dane surowe z eksperymentu, w którym występuje równomierny sposób próbkowania [6].

Stosując metodę najmniejszych kwadratów wyznaczono równania trendu w odchyleniach obserwacji próby, jako wielomian drugiego stopnia odpowiednio:

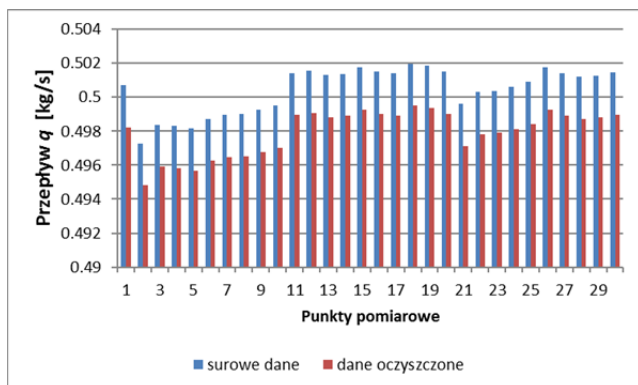
$$(5) \quad f(q) = -7 \cdot 10^{-6} \cdot q^2 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot q + 0,4978$$

dla  $q$  równego 0,50044 kg/s, oraz

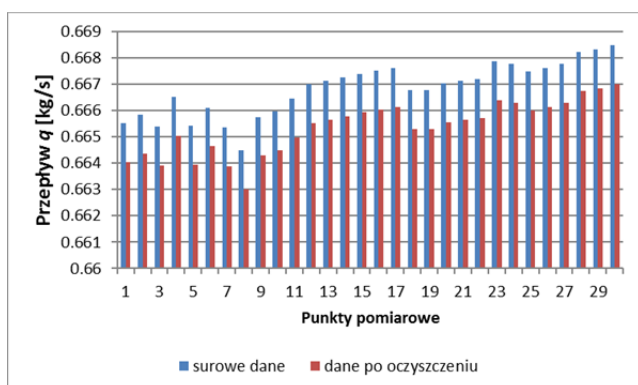
$$(6) \quad f(q) = -9 \cdot 10^{-8} \cdot q^2 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot q + 0,6653$$

dla  $q = 0,66685$  kg/s.

Następnie po odjęciu zmian trendu od surowych odchyłań, czyli jego przyrostów liczonych względem wartości średniej, otrzymano nowe wartości przepływu masowego strumienia cieczy  $q$  zaprezentowane na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Dane pomiarowe dla przepływu  $q$  równego 0,50040 kg/s przed i po oczyszczeniu



Rys. 5. Dane pomiarowe dla przepływu  $q = 0,66684$  kg/s przed i po oczyszczeniu

Następnie przeanalizowano, jak proces oczyszczenia danych wpłynął na wartości estymat mierzandów masowego natężenia przepływu cieczy oraz wartości niepewności typu A  $u_A(q)$ . Uzyskane wyniki zostały zestawione w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry otrzymane dla danych oczyszczonych

Lp.	$q$ [kg/s]	$u_A(q) 10^{-4}$ [kg/s]	$U(q) 10^{-4}$ [kg/s]
1	0.49795	2.4603	7,3151
2	0.66537	1.8532	8,0916

Porównując dane poddane procesowi oczyszczenia okazało się, że kolejne wartości estymat mierzandów przepływu  $q$  zmniejszyły się odpowiednio o 0,22% oraz o 0,50%. Nie są to duże różnice. Zupełnie inaczej jest w przypadku wartości niepewności typu A  $u_A(q)$  pomiaru przepływu. Po oczyszczeniu danych wartości tej niepewności znacząco zmalały, osiągając odpowiednio wartości mniejsze o 38% i 61%.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono zagadnienie dotyczące szacowania prawidłowego wyniku mierzandów przepływu masowego  $q$  wody. Przeanalizowano wyniki pomiarowe uzyskane z eksperymentu wykorzystującego kryżę centryczną (ISA) o przewężeniu  $\beta = 0,5$  dla dwóch przykładowych wartości masowego natężenia przepływu  $q$  równych 0,50040 kg/s i 0,66684 kg/s.

Celem prac było sprawdzenie, czy w uzyskanych wynikach pomiarowych występuje dryft i w przypadku, gdy tak jest, oczyszczenie surowych danych z eksperymentu. Następnie sprawdzono jak taka obróbka danych wpłynie na

wartość estymaty mierzandów masowego natężenia przepływu oraz na wartość niepewności typu A  $u_A(q)$ .

Wyniki uzyskanych analiz pozwalają stwierdzić, że w danych pomiarowych uzyskanych doświadczalnie występowała składowa systematyczna. Eliminacja tego dryftu spowodowała nieznaczne – poniżej 0,5% zmniejszenie wartości estymaty mierzandów masowego natężenia przepływu  $q$  oraz zdecydowane zmniejszenie wartości niepewności typu A  $u_A(q)$  (odpowiednio dla dwóch analizowanych przepływów: o 38% i 61%). Z tym wiąże się też zmiana wartości niepewności rozszerzonej  $U(q)$  szacowanej dla tych wartości przepływu. Jest ona mniejsza odpowiednio o 25% i o 33%, co jest znaczącym wynikiem.

Zdaniem autorów, obliczona na podstawie opracowanej metodologii [3] wartość niepewności rozszerzonej  $U(q)$  dla analizowanych wartości przepływu, potwierdza zasadność kontrolowania składowych systematycznych w wynikach pomiaru masowego natężenia przepływu cieczy i ich eliminacji przed przeprowadzeniem procedury szacowania niepewności pomiaru.

**Autorzy:** dr inż. Anna Golijanek-Jędrzejczyk, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: [anna.golijanek-jedrzejczyk@pg.edu.pl](mailto:anna.golijanek-jedrzejczyk@pg.edu.pl), dr hab. inż. Robert Hanus, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, E-mail: [rohan@prz.edu.pl](mailto:rohan@prz.edu.pl), dr inż. Marcin Zych, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, ul. Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [zych@geol.agh.edu.pl](mailto:zych@geol.agh.edu.pl), dr inż. Andrzej Mrowiec, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego, Wydział Politechniczny, ul. Nowy Świat 4, 62-800 Kalisz, [a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl](mailto:a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl).

### LITERATURA

- [1] Singh V.K., Tharakan T. J., Numerical simulations for multi-hole orifice flow meter, *Flow Measurement and Instrumentation* 45, (2015), 375-383,
- [2] Kasprzak D., Mrowiec A., Analysis of the possibilities of measurement with eccentric orifice of flow medium for small Reynolds numbers, *Pomiary Automatyka Robotyka* 20 (2016), 25–28,
- [3] 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
- [4] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, First edition, September 2008
- [5] Taylor J. R., *Wstęp do analizy błędów pomiarowych*, PWN, Warszawa 1995
- [6] Świsulski D., Golijanek-Jędrzejczyk A., Uchyb, błąd, niepewność - geneza określania niedokładności w miernictwie elektrycznym, *Przegląd Elektrotechniczny* 93, (2017), nr 9, 130-133
- [7] Golijanek-Jędrzejczyk A., Mrowiec A., Hanus R., Zych M., Świsulski D., Determination of the uncertainty of mass flow measurement using the orifice for different values of the Reynolds number. Proceedings of the International Conference "Experimental Fluid Mechanics 2018", November 13-16, 2018, Prague, Czech Republic, 172-175
- [8] Warsza Z. L., Korczyński M. J., Eliminacja nieznanych a priori składowych systematycznych z niepewności typu A pomiarów o równomiernym próbkowaniu, *Przegląd Elektrotechniczny* 84, (2008), nr 5, 109–114