Elżbieta WRÓBLEWSKA, Piotr SYNOWIEC, Wiesław WĘDRYCHOWICZ, Artur ANDRUSZKIEWICZ

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Cieplnych

doi:10.15199/48.2018.08.36

Błędy w pomiarach strumieni objętości zwężką podwójną przy odwrotnym ustawieniu kryz w rurociągu

Streszczenie. *Pomiar strumienia płynu w przewodach zamkniętych o różnych przekrojach jest jednym z najważniejszych pomiarów występujących w przemyśle. i instytucjach badawczych. Warunkiem koniecznym dla prawidłowego wykonania pomiaru strumienia jest prawidłowy montaż przepływomierzy w rurociągu .*

Abstract*. Measurement of the fluid stream in closed ducts with different cross-sections is one of the most important measurements occurring in industry and research institutions. A prerequisite for a proper flow measurement is the use of flow meters that are appropriate. (****Analysis of inaccuracy in the measurement of the volume flow at different orifice double set of orifices****).*

Słowa kluczowe:, kryza podwójna, strumień objętości, współczynnik przepływu.
Keywords:, double orifice, volume flow, flow factor.

Wstęp

Pomiary strumienia masy/objętości płynów stanowią podstawę kontroli procesów technologicznych oraz przesyłu-nośników energii. W wielu gałęziach przemysłu wymaga się dużej dokładności pomiaru i niezawodności działania urządzeń pomiarowych – przepływomierzy [1]. Są one jednym z wielu urządzeń montowanych w układach przepływowych, które wpływają na parametry przepływu płynu powodując trwałe straty ciśnienia i zaburzając przepływ. Niezwykle ważne z punktu widzenia dokładności wykonywanych pomiarów jest prawidłowe zabudowanie przepływomierza w rurociągu, oraz zapewnienie odpowiednio długich prostych odcinków przez i za urządzeniem [2]. Celem artykułu jest wyznaczenie błędów pomiaru strumienia objętości powietrza za pomocą zwężki podwójnej, a związanych ze zmianą wartości współczynnika przepływu, w przypadku odwrotnego zamontowania kryz w rurociągu.

Przepływomierze zwężkowe

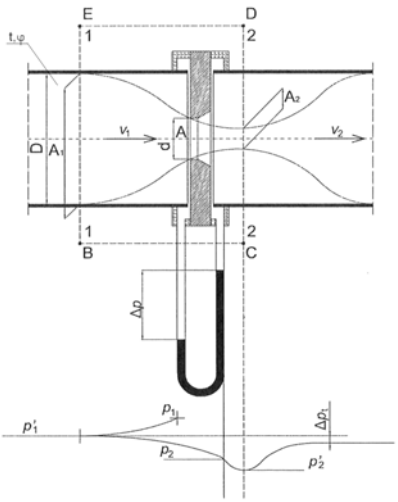
Jedną z najpopularniejszych i najtańszych metod wyznaczania strumienia płynu jest metoda zwężkowa. Jest to metoda charakteryzująca się prostotą instalacji pomiarowej, niezawodnością działania i dużą dokładnością pomiarową. Szacuje się, że zwężki stanowią ok. 50% wszystkich instalowanych w przemyśle przepływomierzy [3].

Przepływomierze zwężkowe klasyfikowane są jako przepływomierze ciśnieniowe – manometryczne. Składają się one z części przepływowej – sensora (element wstawiony do rurociągu lub odpowiednio ukształtowany fragment rurociągu), który generuje spadek ciśnienia w zależności od wielkości strumienia, oraz najczęściej różnicowego przetwornika ciśnień. Podstawowymi zaletami przepływomierzy zwężkowych są:

- stosunkowo wysoka dokładność (w warunkach laboratoryjnych ±0,5%, w prawidłowych warunkach pomiaru błąd średni wynosi poniżej 1÷1,5%), przy czym warunkiem koniecznym jest staranne zaprojektowanie i wykonanie oraz kontrola i uwzględnienie wszystkich czynników mających wpływ na wynik pomiaru,
- uniwersalność, która pozwala na zastosowanie ich do pomiarów strumieni dla większości płynów jednofazowych, w ograniczonym zakresie dla płynów dwufazowych, przy właściwie dowolnych ciśnieniach i temperaturach jakie występują w przemyśle,
- możliwość masowej produkcji; jedynie zwężka musi być wykonywana dla indywidualnych warunków panujących w miejscu pomiaru, natomiast przetworniki i ich oprzyrządowanie są uniwersalne, a przez to mogą być produkowane seryjnie, co znacząco ogranicza koszty,
- brak konieczności wzorcowania zwężek znormalizowanych, co jest procesem pracochłonnym, często odbywającym się w trudno dostępnych miejscach pomiarowych,
- niezawodność wynikająca z braku elementów ruchomych,
- prosta zasada działania,
- brak ruchomych części,
- łatwość wykonania,
- wysoka niezawodność oraz długi okres eksploatacji, nawet powyżej 20 lat.

Oprócz wyżej wymienionych, niezwykle istotnych zalet, przepływomierze zwężkowe mają też kilka zasadniczych wad. Pierwszą z nich jest niska zakresowość (4:1), przy czym dla większości procesów technologicznych jest to bez większego znaczenia, a dodatkowo można zniwelować tą wadę stosując skomplikowany układ z dwoma lub więcej przetwornikami ciśnienia różnicowego.

Drugą wadą jest generowanie wynikających z zasady ich działania strat ciśnienia. Wadę można zniwelować stosując zwężki Venturiego, dla których starta ciśnienia wynosi 8÷15% wartości ciśnienia różnicowego lub stosować zwężki o dużej średnicy otworu [4, 5].



Rys. 1. Przepływ płynu przez kryzę pomiarową [6]

Strumienie przepływu wyznacza się za pomocą równań (1) i (2) dla kryzy z rysunku 1.

Strumień objętości:

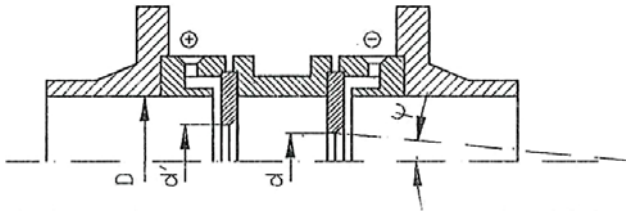
(1) $$q_v = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} C\varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Strumień masy:

(2) $$q_m = q_v \rho$$

gdzie: C - - współczynnik przepływu, ε - - liczba ekspansji, β - - przewężenie; $\beta = d/D$, d - średnica otworu kryzy, D - średnica rurociągu, Δp - różnica ciśnień statycznych na kryzie, ρ - gęstość czynnika.

Wśród wielu rodzajów zwężek wykorzystywanych w pomiarach strumieni przepływów, w przypadku małych strumieni można zastosować kryzę podwójną przedstawioną na rysunku 2. Jest ona przykładem zwężki specjalnej, nieznormalizowanej składającej się z dwóch kryz wbudowanych w jeden rurociąg o odległości między nimi w przybliżeniu równej wartości połowy średnicy rurociągu. Pierwsza kryza od strony wlotowej płynu to kryza wstępna (posiadająca otwór o większej średnicy), druga zaś podstawowa. Do wyznaczenia strumieni objętości i masy stosuje się wzory (1) oraz (2), przyjmując do obliczeń średnicę otworu kryzy podstawowej.



Rys. 2. Kryza podwójna [7]

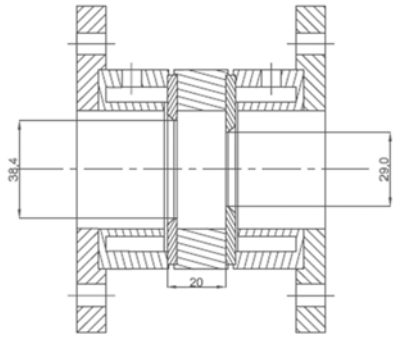
Kryzę podwójną projektuje się dla przewężenia β=0,31÷0,77 i liczb Re=2000÷350000. Obniżenie liczby Reynoldsa do wartości ok. 2000 powiększa przedział niezależności współczynnika przepływu C od liczby Re, a tym samym zakres jej zastosowań do małych strumieni przepływów.

Stanowisko pomiarowe

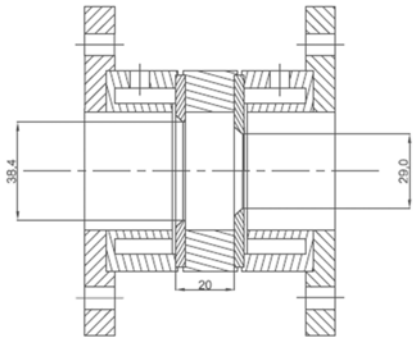
Jednym z podstawowych warunków poprawności wyznaczonego strumienia objętości przepływającego płynu jest prawidłowe zainstalowanie zwężki w rurociągu, co w przypadku kryzy podwójnej przedstawia rysunek 2. Zdarza się jednak, że podczas montażu zwężek w rurociągu zostaną one zamontowane odwrotnie, czy to kryza wstępna czy podstawowa, jak to przedstawiono na rysunkach 3-5. Zmieni się zatem wartość współczynnika przepływu C, a tym samym błąd pomiaru strumienia przepływu. Celem artykułu jest wyznaczenie wartości współczynników C w przypadku odwrotnego zainstalowania kryz w rurociągu oraz wyznaczenie odchyłek pomiarowych w przypadku takiego montażu. Pomiary wykonano dla następujących przypadków:

1) dwie zwężki są zamontowane zgodnie z normą (rys. 2),
2) zwężka wstępna zamontowana jest odwrotnie (rys. 3),
3) obie zwężki zamontowane są odwrotnie (rys. 4),
4) zwężka podstawowa zamontowana jest odwrotnie (rysunek 5).

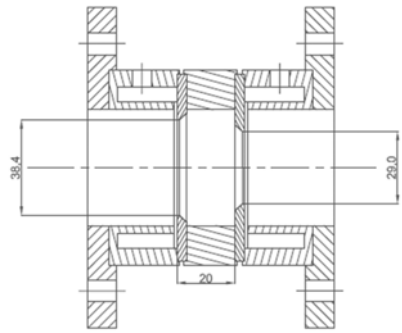
Pomiary wykonano dla powietrza, którego przepływ wymuszany był wentylatorem promieniowym. Kryza podwójna (rys. 2) zamontowana została na rurociągu o średnicy wewnętrznej D = 40 mm. Średnica otworu kryzy wstępnej d' = 38,4 mm a kryzy podstawowej d = 29,0 mm. Rysunek 6 przedstawia wycinek stanowiska pomiarowego z zamontowaną kryza podwójną.



Rys. 3. Zwężka wstępna zamontowana odwrotnie



Rys. 4. Obie zwężki zamontowane odwrotnie



Rys. 5. Odwrotne zamontowanie zwężki podstawowej

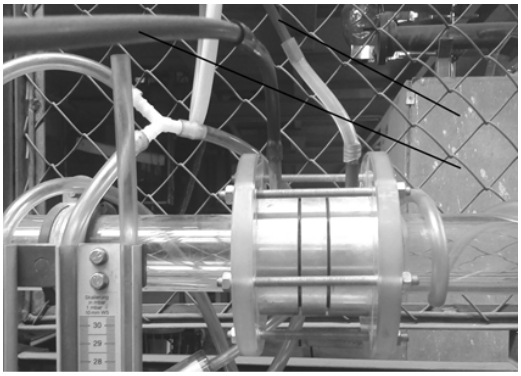
Strumień przepływu regulowany był za pomocą zamontowanego na przewodzie zaworu. Różnicę ciśnień Δp dla każdego położenia zaworu regulującego strumień przepływu rejestrowano przez 10 minut z krokiem co 5 sekund oraz rozdzielczością 1,0 Pa wykorzystując miernik różnicy ciśnień typu RPP-04. Tym samym miernikiem mierzono równocześnie nadciśnienie w rurociągu przed kryzą oraz ciśnienie otoczenia. Temperaturę powietrza i wilgotność względną mierzono wykorzystując sondy pomiarowe termoanemometru TA-460. Dokładność pomiaru dla temperatury wynosiła ±0,3^{o}C a dla pomiaru wilgotności ± 3%.

Dla każdego z przedstawionych sposobów montażu zwężek wykonano siedem serii pomiarów dla różnych stopni otwarcia zaworu, w zakresie liczby Re=30000÷80000. W pierwszym cyklu pomiarów (dla obu zwężek ułożonych zgodnie z normą) pierwsza seria została przeprowadzona

przy maksymalnym otwarciu zaworu, spadek ciśnienia na kryzie dla tej serii zaś został oznaczony jako Δp_{max}. Kolejne serie były przeprowadzane dla wartości spadku ciśnienia na kryzie zbliżonym kolejno do:

$$\Delta p=\left(\frac{9}{10}\right)^2 \Delta p_{max},\ \Delta p=\left(\frac{8}{10}\right)^2 \Delta p_{max},\ \Delta p=\left(\frac{7}{10}\right)^2 \Delta p_{max},$$

$$\Delta p=\left(\frac{6}{10}\right)^2 \Delta p_{max},\ \Delta p=\left(\frac{5}{10}\right)^2 \Delta p_{max},\ \Delta p=\left(\frac{4}{10}\right)^2 \Delta p_{max}.$$



Rys. 6. Kryza podwójna zamontowana na rurociągu pomiarowym

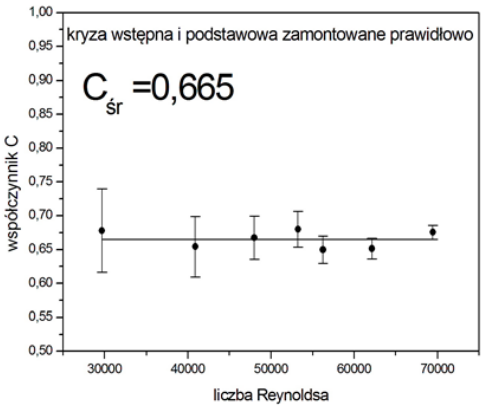
Na podstawie pomiaru ciśnienia statycznego przed i za kryzą możliwe jest wyznaczenie współczynnika ściśliwości ε z równania (3) przyjmując wartość wykładnika izentropy κ=1,333 dla gazu trójatomowego, jakim jest powietrze.

$$\varepsilon=1-\left(0{,}351+0{,}256\beta^4+0{,}93\beta^8\right)\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right] \quad (3)$$

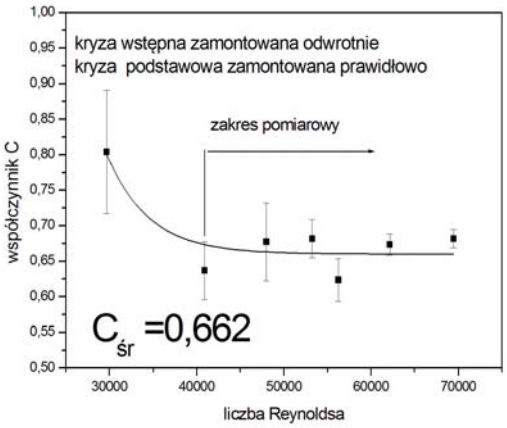
Rzeczywisty strumień przepływu wyznaczano za pomocą rurki Prandtla metodą pierścieni równoważnych, obliczając jednocześnie gęstość powietrza w miejscu pomiaru. Współczynnik przepływu C obliczano z równań (1) i (2) przyjmując stałość strumienia masy powietrza w instalacji.

Wyniki pomiarów

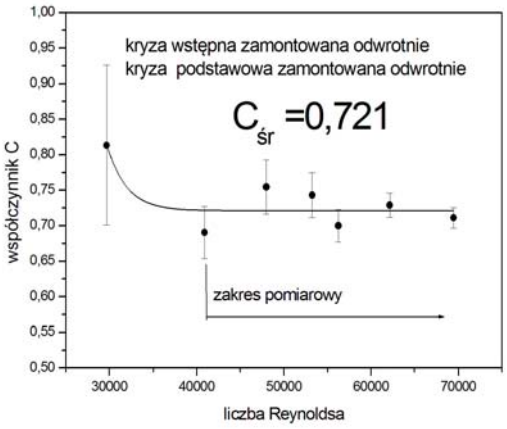
Na rysunkach 7-10 przedstawiono wyniki z uzyskanych pomiarów, a mianowicie wartości współczynnika przepływu C od liczby Reynoldsa wraz z obliczoną, średnią jego wartością oraz odchyleniami standardowymi. Rysunki 8 i 9 przedstawiają również obszar stałości współczynnika przepływu, a więc zakres pomiaru w przypadku odwrócenia kryz.



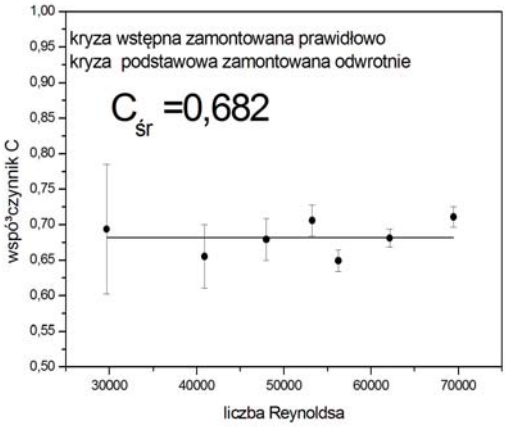
Rys. 7. Wartość współczynnika przepływu dla prawidłowo zamontowanych zwężek



Rys. 8. Wartość współczynnika przepływu dla odwrotnie zamontowanej zwężki wstępnej



Rys. 9. Wartość współczynnika przepływu dla obu zwężek zamontowanych odwrotnie

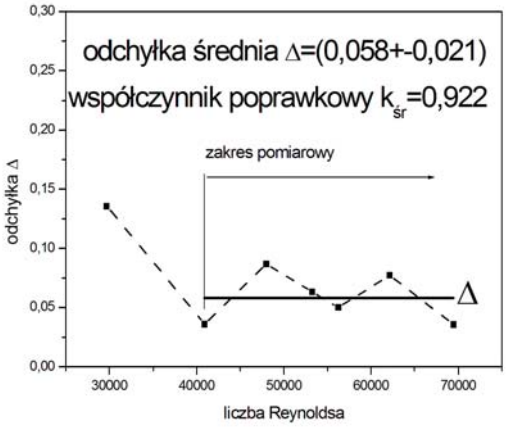


Rys. 10. Wartość współczynnika przepływu dla odwrotnie zamontowanej zwężki podstawowej

Na rysunku 11 przedstawiono zależność odchyłki współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa w przypadku odwrócenia obu kryz (dla najniekorzystniejszego przypadku). Dla zakresu pomiarowego wg rysunku 9 obliczono średnią wartość odchyłki wraz z odchyleniem standardowym oraz średnią wartość współczynnika poprawkowego, która wynosiła $k_{śr}$=0, 922.

Dla wszystkich przypadków pomiarowych tabela 1 przedstawia wartości odchyłki Δ, błędy względne

współczynnika przepływu $\delta_{śr}$ oraz średnie wartości współczynników poprawkowych $k_{śr}$ w stosunku do prawidłowego zamontowania obu kryz w rurociągu.



Rys. 11. Średnia odchyłka oraz współczynnik poprawkowy dla wszystkich serii pomiarowych

Tabela 1. Średnie wartości współczynnika przepływu $C_{śr}$, odchyłki Δ, błędu względnego współczynnika przepływu $\delta_{śr}$ oraz współczynnika poprawkowego $k_{śr}$, uwzględniających sposób montażu zwężek w stosunku do zaleceń normy: P – prawidłowo, N – nieprawidłowo

L. p.	Sposób montażu		$C_{śr}$	Δ	$\delta_{śr}$	$k_{śr}$
	Zwężka wstępna	Zwężka podstawowa	-	-	%	-
1	P	P	0,665	-	-	-
2	N	P	0,662	- 0,003	0,45	1,005
3	N	N	0,721	0,056	8,42	0,922
4	P	N	0,682	0,017	2,56	0,974

Wnioski

Z uzyskanych danych pomiarowych oraz wykonanych na ich podstawie obliczeń wynika, iż przypadkiem wprowadzającym największe błędy pomiarowe, sięgające 8,5%, jest nieprawidłowe, odwrotne zamontowanie obu zwężek w rurociągu. Jednocześnie łatwo można zauważyć, że w przypadku niezgodnego z normą zainstalowania tylko jednej ze zwężek, wartość błędu jest nieznaczna, przy czym większa dla niewłaściwego montażu zwężki podstawowej.

Porównując dane dla obu przypadków prawidłowego zamontowania zwężki podstawowej z przypadkami nieprawidłowego zainstalowania zwężki wstępnej można domniemywać, iż sposób montażu tej pierwszej ma zdecydowany wpływ na uzyskiwane wyniki, natomiast druga, owszem wprowadza błąd, ale niewielki. Może być to spowodowane tym, że odwrócenie zwężki wstępnej jedynie nieznacznie zmienia charakter napływu strumienia do zwężki podstawowej, która to odgrywa decydującą rolę w formowaniu przepływu oraz na niej zachodzi główny spadek wartości ciśnienia.

Ponadto zauważyć można, że przy mniejszych wartościach liczby Re zwiększa się wpływ niedokładności odczytu ciśnienia różnicowego na zwężce, co odzwierciedla się w wartościach współczynnika przepływu C, szczególnie dla przypadku nieprawidłowego zainstalowania zwężki podstawowej.

Przedstawione powyżej wnioski jednoznacznie wskazują na konieczność spełnienia podstawowego warunku dla prawidłowego wykonaniu pomiaru strumienia objętości/masy przepływającego płynu, jakim jest konieczność prawidłowego zamontowania zwężki w rurociągu. Niedotrzymanie tego warunku, może w niektórych przypadkach wprowadzać dodatkowy błąd pomiarowy, który przy wymaganych dokładnych pomiarach może mieć istotne znaczenie dla użytkownika.

***Autorzy**: dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz; mgr inż. Piotr Synowiec, dr inż. Wiesław Wędrychowicz, dr inż. Elżbieta Wróblewska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Cieplnych, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail artur.andruszkiewiczi@pwr.edu.pl, piotr.synowiec@pwr.edu.pl, wieslaw.wedrychowicz@pwr.edu.pl, e.wroblewska@pwr.edu.pl.*

LITERATURA

[1] Dobrowolski B., *„Studium możliwości zastosowania zwężek do pomiaru strumienia masy mieszanin gaz-ciecz”,* Wydawnictwo PAN, Zakład Narodowy imienia Ossolińskich, Wrocław, Warszawa, Kraków, Gdańsk, Łódź, (1990), 9
[2] Praca zbiorowa pod red. Gałusza. M, „Energetyka Cieplna. Obsługa i eksploatacja urządzeń, instalacji i sieci”, Wydawnictwo „EUROPEX”, Kraków, (2003), 559
[3] Kabza Z., „Pomiary strumieni płynów (przewodnik)”, Wydawnictwa Politechniki Opolskiej, Opole, (1996), 21
[4] Turkowski M., „Metrologia przepływów”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (2018), 40-41
[5] Praca zbiorowa pod red. Gałusza M., Paruch J., „Energetyka cieplna. Obsługa i eksploatacja urządzeń, instalacji i sieci”, Tarbonus Sp. z o. o., Kraków-Tarnobrzeg, (2008), 418-419
[6] Gondek A., „Przepływomierze spiętrzające przepływ”, Politechnika Krakowska, Kraków, (2009), 15-20, 22
[7] Kabza Z., Kostyrko K., „Metrologia przepływów, gęstości i lepkości”, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu, Opole, (1995), 35