

Stanisław WALUŚ

POMIARY PRZEPLYWU PŁYNÓW W PROCESACH HUTNICZYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono potrzeby pomiaru przepływu płynów w hutnictwie. Opisano własności przepływomierzy zwężkowych, turbinowych, uśredniających rurek piętrzących, elektromagnetycznych, ultradźwiękowych i Coriolisa. Zestawiono możliwości zastosowania różnych przepływomierzy oraz sformulowano wskaźnik pozwalający na ilościową ocenę porównawczą poszczególnych przepływomierzy.

FLOW MEASUREMENTS OF FLUIDS IN METALLURGICAL PROCESSES

Summary. The needs of flow measurements of fluids in metallurgy are introduced. The properties of constriction flowmeters, turbine flowmeters, impact averaging tubes, electromagnetic, ultrasonic and Coriolis flowmeters are described. The possibilities of using of various flowmeters are presented and the quality coefficient which enables quantitative comparative evaluation of each flowmeter is defined.

1. Wprowadzenie

Pomiar strumienia przepływu płynów (cieczy i gazów) jest jedną z najważniejszych (obok temperatury) wielkości mierzonych w hutnictwie. Ze względu na różnorodność warunków, w jakich pracują przyrządy pomiarowe [7], oraz wielość typów przepływomierzy [6, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 19] istnieje potrzeba sformułowania kryteriów doboru przepływomierzy do konkretnych warunków, jak to zrobiono dla analizatorów gazu [7].

Na polskim rynku od kilku lat istnieją nowoczesne przepływomierze ultradźwiękowe i elektromagnetyczne krajowej produkcji [4, 11]. Ostatnio pojawiły się przepływomierze masowe nowego typu (Coriolisa), produkowane w krajach zachodnich, które zastępują masowe przepływomierze cieplne o mniejszej dokładności. Oprócz stosowania w hutnictwie klasycznych przepływomierzy, tzn. zwężkowych i turbinowych, wprowadzane są nowe typy, np. uśredniające rurki piętrzące (znane np. pod handlową nazwą annubar [6]).

Wobec zapotrzebowania hutnictwa na przepływomierze [17] i coraz szerszej oferty rynku na przepływomierze o różnych właściwościach istnieje potrzeba zaproponowania kryteriów pomocnych przy wyborze przepływomierza dla konkretnego zadania pomiarowego.

2. Potrzeby pomiaru strumienia przepływu płynów w procesach hutniczych

W procesach hutniczych mierzone są strumienie przepływu gazów takich, jak: powietrze, spaliny, gazy palne, tlen w procesie tlenowo-konwertorowym itp. Mierzone gazy są to zarówno czyste powietrze, z którego wytwarzany jest tlen, jak i gazy z procesu martenowskiego, tlenowo-konwertorowego czy wielkiego pieca, zawierające duże ilości pyłu. W celu odpylenia gazy spalinowe są zraszane, co powoduje nasycenie ich parą wodną i możliwość jej skraplania się. Pomiary strumienia cieczy to najczęściej pomiary przepływu wody pitnej, wody przemysłowej i ścieków. Pomiar ścieków może być szczególnie istotny, między innymi ze względów ekonomicznych. Odbiorcy wody płacą za odprowadzenie ścieków w takiej ilości, jaką ilość wody zużywają. W procesach hutniczych duża część wody odparowuje i w przypadku wiarygodnego pomiaru strumienia objętości odprowadzanych ścieków istnieje możliwość płacenia tylko za rzeczywiście odprowadzaną objętość ścieków, która jest niekiedy wyraźnie mniejsza niż objętość pobieranej wody.

Oprócz celów rozliczeniowych mierzony jest przepływ płynów w celach technologicznych - pomiary przepływu płynów w procesach hutniczych, np. tlenu doprowadzanego do procesu tlenowo-konwertorowego lub gazów spalinowych odprowadzanych z tego procesu [20]. Na podstawie strumienia objętości odprowadzanych spalin i wyniku pomiaru stężenia dwutlenku węgla w spalinach obliczana jest szybkość odwęglania i na jej podstawie steruje się momentem zakończenia dmuchania. W hutnictwie miedzi mierzone są strumienie przepływu tlenu i powietrza oraz strumień mieszaniny tych gazów doprowadzany do pieca zawieszinowego, w którym wytapiana jest miedź.

Przykładowe zestawienie zapotrzebowania na pomiar strumienia gazów palnych w Hucie Katowice podano za raportem [17] w tablicy 1. W [18] ukazał się komunikat poświęcony opracowanemu raportowi. Oprócz wymienionych w tablicy 1 punktów pomiarowych dla celów rozliczeniowych istnieje potrzeba pomiarów technologicznych w ilości 15 - 20 % pomiarów rozliczeniowych. Pomiary przepływu gazów palnych dotyczą różnych gazów i w tablicy 2 podano przykładowe wartości ich ciśnienia i temperatury.

Tablica 1

Liczba punktów pomiarowych w sieci gazów palnych Huty Katowice

Średnica rurociągu [mm]	Liczba punktów istniejących	Liczba punktów projektowanych	Punktów pomiarowych razem
0 - 50	0	2	2
50 - 200	8	7	15
200 - 400	42	9	51
400 - 1000	53	10	63
powyżej 1000	16	0	16

3. Rodzaje przepływomierzy i przykłady zastosowań

W procesach hutniczych stosowane są różne typy przepływomierzy, przede wszystkim przepływomierze zwężkowe, np. w Hucie Katowice w 1988 roku dla gazów palnych były stosowane 82 kryzy ISA z pomiarem przytarczowym, 39 kryzy segmentowych i 26 uśredniających rurek piętrzących typu annubar. Natomiast przed 1986 rokiem około 40 % sprzedanych w świecie przepływomierzy stanowiły przepływomierze zwężkowe [12], a 1,5% - elektromagnetyczne i ultradźwiękowe - 1,5 %. Obecnie, dzięki produkcji tych ostatnich przepływomierzy w Polsce [4, 11], stosowanie ich w hutnictwie będzie wzrastało. Na polski rynek wchodzi przepływomierze Coriolisa [2, 14].

Tablica 2

Parametry gazów palnych

Rodzaj gazu	Ciśnienie [MPa]	Temperatura [°C]
Ziemny wysokometanowy	1	- 5
	0,4	5
	0,03	10
Ziemny zaazotowany	1	- 5
	0,02	5
Koksowniczy	1	25
	0,02	5
	0,002	10

cd. tablicy 2

Wielkopieczowy	0,2	15
	0,1	350
Mieszankowy	0,015	15 - 20

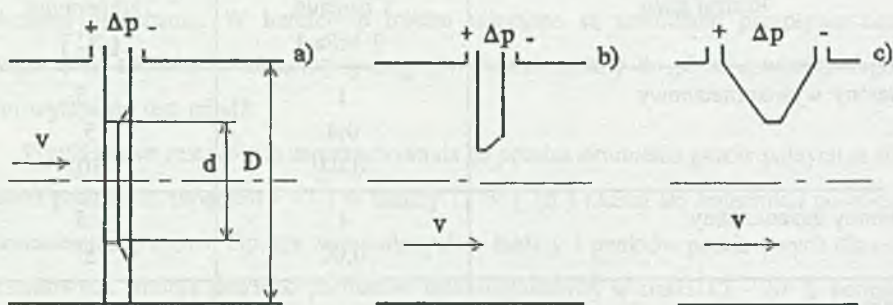
3.1. Przepływomierze zwężkowe

Ze względu na duże strumienie w procesach hutniczych istotną rolę odgrywają trwałe straty ciśnienia [12] i stąd czynnik ten winien być brany pod uwagę przy doborze zwężki. W przypadku, gdy ciecz lub gaz niesie zanieczyszczenia stałe i istnieje możliwość osadzania się zanieczyszczeń w pobliżu zwężki, są stosowane kryzy segmentowe (rys. 1b), jak to ma miejsce w przypadku pomiaru strumienia objętości gazów spalinowych odprowadzanych z konwertora tlenowego [20]. Kryza segmentowa nie należy obecnie do zwęzek znormalizowanych [9].

Zamiast kryzy segmentowej w krajach zachodnich stosowana jest zwężka typu klin (rys. 1c), [12], również odporna na zanieczyszczenia tak jak kryza segmentowa. Zwężka typu klin jest bardziej odporna na ścieranie niż kryza segmentowa. Pomiar przepływomierzem zwężkowym strumienia masy gazu lub pary q_m wymaga wprowadzenia do wyniku pomiaru ciśnienia różnicowego korekty od gęstości gazu, zgodnie z wyrażeniem [9]:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p * \rho_1}, \quad (1)$$

gdzie: C - współczynnik przepływu, β - przewężenie zwężki pomiarowej, ϵ_1 - liczba ekspansji odniesiona do warunków przed zwężką pomiarową, d - średnica otworu zwężki pomiarowej, Δp - ciśnienie różnicowe, ρ_1 - gęstość płynu przed zwężką pomiarową.



Rys.1. Zwężki: a) kryza znormalizowana, b) kryza segmentowa, c) zwężka typu klin

Fig.1. Pressure differential devices: a) orifice plate, b) segmental orifice, c)wedge orifice

W przypadku gdy ma być mierzony strumień objętości, w wyrażeniu (1) zamiast wyrażenia podpierwiastkowego $2 \Delta p \cdot \rho_1$ należy podstawić $2 \Delta p / \rho_1$. Gęstość płynu zależy od jego składu, temperatury i ciśnienia. W [3] obliczono błędy systematyczne spowodowane brakiem korekcy wyniku pomiaru. Z obliczeń tych wynika, że praktycznie zawsze konieczna jest korekca wyniku dla uzyskania odpowiedniej dokładności pomiaru. Na przykład w przypadku doprowadzania mieszaniny tlenu i powietrza do pieca zawieszinowego, w którym wytapiana jest miedź, mierzone są strumienie na każdym doprowadzeniu bez korekcy, natomiast strumień całkowity z korekcją.

3.2. Przepływomierze piętzące

Rurki piętzące (Prandtla, Pitota, sonda cylindryczna) są stosowane do sprawdzających pomiarów okresowych w przypadku wyznaczania strumienia objętości metodą całkowania bryły prędkości. Mierzone są prędkości w miejscach odległych od osi rurociągu o r_i , gdzie r_i wyznacza się ze wzoru:

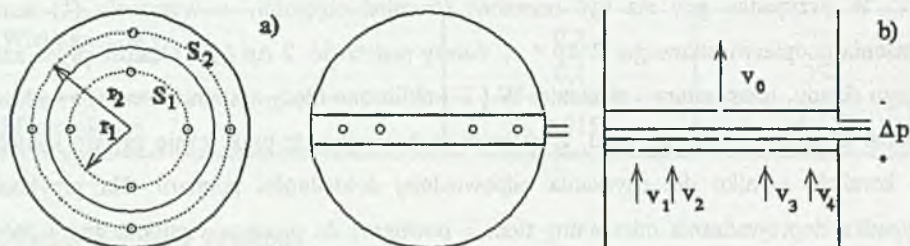
$$r_i = R \sqrt{(2i - 1) / (2n)}, \quad (2)$$

gdzie R oznacza promień wewnętrzny rurociągu, n - liczbę pierścieni o jednakowych powierzchniach, na które dzieli się przekrój rurociągu.

Miejsca pomiaru prędkości punktowej rozmieszcza się, jak to przedstawiono na rysunku 2a, tzn. leżą one na okręgach dzielących każdy z pierścieni o powierzchniach S_1 i S_2 na dwa pierścienie o jednakowych powierzchniach. Strumień objętości będzie wyznaczany z wyrażenia:

$$q_v = \frac{S}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}, \quad (3)$$

gdzie S oznacza pole przekroju przepływowego rurociągu, m - liczbę punktów, w których mierzone są prędkości miejscowe (w przypadku przedstawionym na rys. 2a $m=4$ i $n=2$).



Rys.2. Pomiar strumienia rurkami piętzącymi: a) rozmieszczenie punktów pomiaru prędkości rurką piętzącą, b) schemat zabudowy i wykonania uśredniającej rurki piętzącej typu annubar, $v_1 \dots v_4$ - prędkości płynu przed rurką, v_0 - prędkość płynu za rurką

Fig.2. Flow measurement with impact tubes: a) lay-out of the points of velocity measurement with point impact tube, b) scheme of the settlement and the construction of the averaging impact tube type annubar, $v_1 \dots v_4$ - fluid velocities in front of the tube, v_0 - fluid velocity behind the tube

Dla osiowosymetrycznego rozkładu prędkości i małych wymagań odnośnie do dokładności wystarczy pomiar prędkości w jednym punkcie dla danego promienia r_i ($m = 1$) i na podstawie tego wyniku oblicza się strumień objętości. W przypadku potrzeby uzyskania wyniku bardziej dokładnego wymaga się powiększenia zarówno liczby punktów pomiarowych (m) dla danego promienia, w którym mierzone są prędkości punktowe, jak i liczby promieni (n), w których dokonywany jest pomiar. Ma to szczególne znaczenie w przypadku zniekształconych, nieosiowosymetrycznych rozkładów prędkości.

Pomiar strumienia objętości za pomocą rurki Prandtla, Pitota i sondy cylindrycznej wymaga sondowania po przekroju rurociągu, co uniemożliwia dokonywanie pomiaru ciągłego, który na ogół jest wymagany w procesach hutniczych. W takich przypadkach coraz częściej stosowane są uśredniające rurki piętzące różnych typów [6]. Na rysunku 2b przedstawiono schemat budowy i instalowania uśredniającej rurki piętzącej.

W przypadku uśredniającej rurki piętzącej stosowanej np. w Hucie Katowice [3] do pomiaru strumienia objętości gazu q_v , konieczna jest znajomość gęstości gazu, gdyż wielkość mierzona odtwarzana jest według wyrażenia:

$$q_v = S k \sqrt{(P_{nsr} - P_{osr}) / \rho}, \quad (4)$$

gdzie k oznacza współczynnik będący iloczynem współczynnika rurki i współczynnika ściśliwości.

Odbierane ciśnienia średnie po stronie napływowej $p_{nśr}$ i odpływowej $p_{ośr}$ rurki piętrzącej będą wynosiły odpowiednio:

$$p_{nśr} = \sum_{i=1}^l a_i p_{in}, \quad (5)$$

$$p_{ośr} = \sum_{j=1}^r b_j p_{jo}, \quad (6)$$

gdzie: a_i i b_j - współczynniki zależne od parametrów konstrukcyjnych uśredniającej rurki piętrzącej, l - liczba otworów po stronie napływowej, r - liczba otworów po stronie odpływowej, p_{in} oraz p_{jo} - odpowiednio ciśnienia w i -tym i j -tym punkcie po stronie napływowej i odpływowej rurki.

Strumień masy wyznacza się następująco:

$$q_m = S k \sqrt{(p_{nśr} - p_{ośr}) \rho}. \quad (7)$$

3.3. Przepływomierze elektromagnetyczne

Dla dowolnych cieczy (przewodzących prąd elektryczny) i dla średnic rurociągów od kilku milimetrów do dwóch metrów mogą być stosowane przepływomierze elektromagnetyczne, których zasadę działania przedstawiono schematycznie na rys. 3. W przetworniku pomiarowym przepływomierza mierzone jest napięcie zgodnie z wyrażeniem:

$$U = \frac{1}{D} \int_0^D U(x) dx, \quad (8)$$

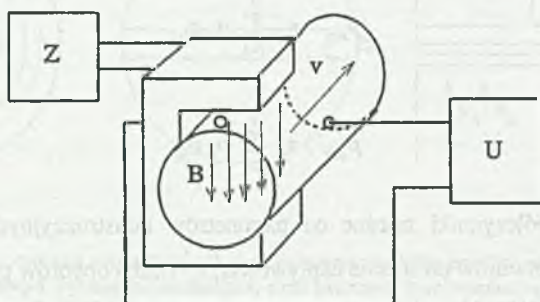
gdzie $U(x)$ jest napięciem zależnym od napięć generowanych w całym przekroju rurociągu:

$$U(x) = k(x,y) B(x,y) v(x,y), \quad (9)$$

gdzie: $B(x,y)$ - indukcja magnetyczna wewnątrz rurociągu w miejscu o współrzędnych $[x;y]$, $v(x,y)$ - prędkość cieczy w miejscu o współrzędnych $[x;y]$, $k(x,y)$ - współczynnik wpływu napięcia generowanego (w wyniku oddziaływania pola magnetycznego z poruszającymi się nośnikami prądu elektrycznego) w danym miejscu na napięcie odkładane na drodze całkowania napięcia zgodnie ze wzorem (8), D - średnica wewnętrzna rurociągu.

W czujniku pomiarowym konstrukcyjnie pole magnetyczne tak się kształtuje, aby iloczyn $k(x,y) B(x,y)$ był stały, dzięki czemu uniezależnia się wskazania przepływomierza od kształtu rozkładu prędkości i mierzone napięcie U będzie proporcjonalne do strumienia objętości. Rozwój technologii elementów zarówno czujnika, jak i przetwornika pomiarowego pozwala na coraz to

nowe zastosowania przepływomierzy elektromagnetycznych [1]. Dobre właściwości metrologiczne i eksploatacyjne mają np. polskie przepływomierze firmy ENKO [4].



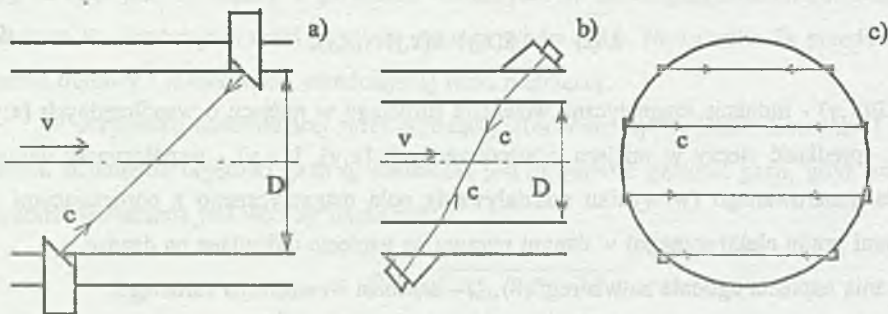
Rys.3. Schemat przepływomierza elektromagnetycznego: B - indukcja magnetyczna, Z - zasilacz, U - pomiar napięcia między elektrodami

Fig.3. Principle of the electromagnetic flowmeter: B - magnetic induction, Z - supplier, U -measurement of the voltage between electrodes

3.4. Przepływomierze ultradźwiękowe

Przepływomierze ultradźwiękowe są stosowane przede wszystkim do pomiaru strumienia objętości cieczy, rzadziej do pomiaru strumienia objętości gazu. Zasada działania polega na pomiarze prędkości średniej płynu w jednej drodze (v_1), co przedstawiono na rys. 4a i 4b lub w kilku drogach (v_{ii}), co pokazano na rys. 4c. Strumień objętości wynosi:

$$q_v = S \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{ii} \quad (10)$$



Rys.4. Czujniki przepływomierzy ultradźwiękowych: a) jednodrogowy z głowicami w ścianie rurociągu, b) jednodrogowy z głowicami nakładanymi, c) wielodrogowy, c -prędkość fali ultradźwiękowej w cieczy nieruchomej

Fig.4. Primary devices of ultrasonic flowmeters: a) one-path with heads mounted in the pipe wall, b) one-path with clamp-on heads, c) multi-path, c - sound velocity in liquid being in the rest

Stosowane są dwie zasady pomiarowe: pomiar różnicy czasów przebiegu fali ultradźwiękowej emitowanej w kierunku przeciwnym przepływowi i w kierunku przepływu cieczy oraz pomiar różnicy częstotliwości z wykorzystaniem zjawiska Dopplera. Pierwsza zasada stosowana jest w przypadku cieczy czystych. Głowice mogą mieć bezpośredni kontakt z cieczą (rys. 4a) lub są nakładane na rurociąg z zewnątrz (rys. 4b). W przepływomierzu doplerowskim mierzona jest prędkość w określonym miejscu i warunkiem uzyskania sygnału rozproszonego jest występowanie w cieczy cząstek stałych lub pęcherzyków gazu.

Przepływomierze ultradźwiękowe mają dobre właściwości metrologiczne [15] i nadają się do pomiaru strumienia objętości wody w rurociągach o dużych (np. większych od 200 mm) średnicach, nie dają trwałego spadku ciśnienia i dzięki zastosowaniu zaworów zasuwowych w przypadku niesprawności sondy nie wymagają zatrzymania przepływu, co ma istotne znaczenie w przypadku ciągłych procesów przemysłowych. Dostępne w Polsce przepływomierze firmy SONIX [11] mogą być stosowane bez wzorcowania doświadczalnego dla średnic rurociągów większych od 200 mm, przy czym dokładność pomiaru w warunkach podanych przez producenta wynosi około 1%.

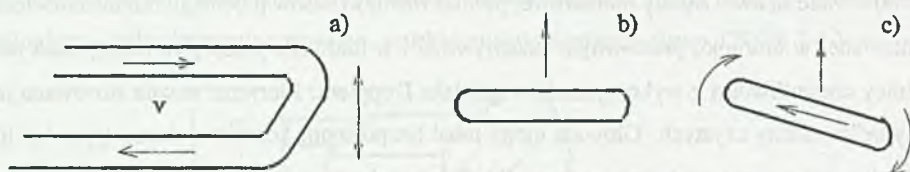
W przepływomierzu ultradźwiękowym istnieje możliwość pomiaru strumienia masy drogą pośrednią. Gdy rodzaj cieczy się nie zmienia, to na podstawie czasów przebiegu fali ultradźwiękowej wysyłanej w kierunku przepływu cieczy i w kierunku odwrotnym (t_1 i t_2) oraz odległości między przetwornikami ultradźwiękowymi l wyznacza się prędkość fali ultradźwiękowej zgodnie z przybliżoną (zakłada się, że kwadrat prędkości cieczy jest o wiele mniejszy od kwadratu prędkości fali ultradźwiękowej w tej cieczy) zależnością:

$$c = l / \sqrt{t_1 t_2}. \quad (11)$$

Na podstawie tak wyznaczonej wartości prędkości fali ultradźwiękowej w mierzonej cieczy określa się jej gęstość na podstawie wprowadzonej do pamięci przetwornika pomiarowego tablicy.

3.5. Przepływomierze Coriolisa

Do bezpośredniego pomiaru strumienia masy obecnie coraz częściej stosowane są przepływomierze Coriolisa [2, 8, 13, 14], które zastępują dawniej stosowane przepływomierze kalorymetryczne (cieplne) [13]. Sygnałem wyjściowym jest różnica faz między sygnałem pobudzającym rurkę, przez którą przepływa ciecz a sygnałem odbieranym w takim miejscu, gdzie deformacja kształtu rurki wskutek działania siły Coriolisa jest największa [2]. Schemat działania przepływomierza Coriolisa przedstawiono na rys. 5.



Rys.5. Zasada działania przepływomierza Coriolisa: a) rurka w kształcie litery U, b) położenie odcinka czołowego dla prędkości cieczy $v = 0$, c) położenie odcinka czołowego dla prędkości cieczy większej od zera

Fig.5. The principle of operation of Coriolis flowmeter: a) U-shape pipe, b) the position of frontal segment for liquid velocity = 0, c) the position of frontal segment for liquid velocity higher than 0

W przepływomierzu Coriolisa firmy Micro-Motion [14] strumień objętości jest funkcją amplitudy drgań skrętnych rurki, przez którą przepływa mierzony strumień masy zgodnie z zależnością:

$$q_m = K \frac{A}{L f}, \quad (12)$$

gdzie: A - amplituda drgań skrętnych, L - długość rurki wprawianej w drgania, f - częstotliwość drgań, K - współczynnik zależny od konstrukcji rurki.

Przepływomierze Coriolisa są produkowane dla średnic rurociągów od 1 do 150 mm (najczęściej 10 mm do 50 mm) i ich niedokładność wynosi zwykle 0,2 % [14]. Przepływomierze te ze względu na duży koszt i małe średnice będą stosowane w procesach hutniczych w wyjątkowych przypadkach, stąd nie uwzględniono ich w tabelicy 3.

4. Wybór przepływomierza

W hutach istnieją bardzo różne warunki pracy przepływomierzy i różne wymagania co do dokładności pomiaru, eksploatacji lub wpływu przyrządu na obiekt pomiaru. Dla właściwego doboru przepływomierza konieczna jest dobra znajomość właściwości przepływomierzy w zależności od warunków, w jakich mogą być stosowane.

4.1. Możliwość stosowania przepływomierzy w różnych warunkach

W tabelicy 3 zestawiono na podstawie [16] kilkanaście podstawowych typów przepływomierzy z podaniem możliwości ich stosowania w różnych warunkach. Zestawiono przepływomierze dotychczas stosowane i przedstawione w literaturze podręcznikowej. W punkcie 3 opisano dokładniej niektóre z nich, stanowiące nowe rozwiązania konstrukcyjne lub mające szczególne

właściwości metrologiczne, sugerujące ich przydatność do pomiarów strumieni płynów w procesach hutniczych. Dla niektórych przepływomierzy podano również aktualne modele opisujące zasadę działania lub wyrażenie, na podstawie którego obliczana jest wielkość mierzona, tzn. strumień objętości lub masy, np. dla zwężki zgodnie z polską normą [9].

Tablica 3

Możliwości zastosowania przepływomierzy w różnych warunkach pomiarowych

Rodzaj przepływomierza		Zastosowanie									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	K
Zwężkowy	kryza	+	0	+	0	0	-	+	0	-	-
	zwężka, dysza Venturiego	+	0	+	0	0	0	0	0	0	-
Piętrzący	rukka piętrząca	+	0	+	0	0	-	0	0	0	0
	uśredniająca rurka piętrząca	+	-	+	0	0	-	0	0	0	0
Grawimetryczny	plywakowy	+	0	+	0	0	-	0	-	0	-
	klapowy	+	0	+	0	0	-	0	-	-	-
Z krzywizną		+	0	+	-	0	-	0	-	-	-
Wolumetryczny		+	-	+	+	0	-	0	0	0	-
Turbinowy (wirnikowy)		+	0	+	0	0	-	0	0	0	-
Elektromagnetyczny		+	+	-	0	+	+	0	-	0	0
Ultradźwiękowy	ze zmianą prędkości	+	0	-	0	0	-	0	0	0	0
	doplerowski	-	+	-	0	0	-	-	-	0	-
Oscylacyjny	wirowy	+	0	0	0	0	-	0	0	-	-
	z oscylatorem mechanicznym	+	0	0	0	0	-	0	0	-	-
Dynamometryczny (tarczowy)		0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
Przelewy i koryta		+	0	-	-	0	0	-	-	-	+

1 - ciecze czyste, 2 - ciecze zanieczyszczone, 3 - pary lub gazy, 4 - ciecze o dużej lepkości (np. oleje), 5 - ciecze powodujące korozję stali węglowych, 6 - szlamy ścierające, 7 - wysokie temperatury, 8 - niskie temperatury, 9 - małe prędkości, K - przepływ w kanałach otwartych, " + " - przeznaczony do pracy w tych warunkach, " 0 " - może być stosowany przy pewnych warunkach, " - " - nie stosowany w tych warunkach

4.2. Właściwości przepływomierzy wymagane w procesach hutniczych

Opierając się na zestawieniu cech przepływomierzy, które są istotne w gospodarce wodno-ściekowej, przedstawionym w [10], zestawiono cechy, które są istotne w hutnictwie:

- 1) niezawodność,
- 2) dokładność,
- 3) zakresowość (stosunek możliwej maksymalnej wartości wielkości mierzonej do wartości minimalnej),
- 4) powtarzalność wskazań,
- 5) rodzaj płynu (ciecz jednorodna lub z wtrąceniami ciała stałego lub gazu, gaz, gaz zawierający pył),
- 6) wielkość mierzona (bezpośredni pomiar strumienia objętości lub masy lub konieczność uwzględniania gęstości płynu dla obliczenia wartości wyniku pomiaru),
- 7) wielkość trwałego spadku ciśnienia,
- 8) wpływ temperatury na czujnik pomiarowy i na przetwornik pomiarowy,
- 9) wpływ zanieczyszczeń na czujnik pomiarowy i przetwornik pomiarowy,
- 10) wpływ drgań (odporność mechaniczna),
- 11) zakres średnic rurociągu,
- 12) wpływ rozkładu prędkości,
- 13) wymagania wzorcowania,
- 14) wymagania obsługi,
- 15) możliwość instalowania i napraw bez zatrzymywania pracy rurociągu,
- 16) przenośność.

Niemniej, zawsze koszty (zakupu, instalacyjne i eksploatacji) winny być porównywane z efektami ekonomicznymi wynikającymi z zastosowania przepływomierza danego typu o określonej dokładności.

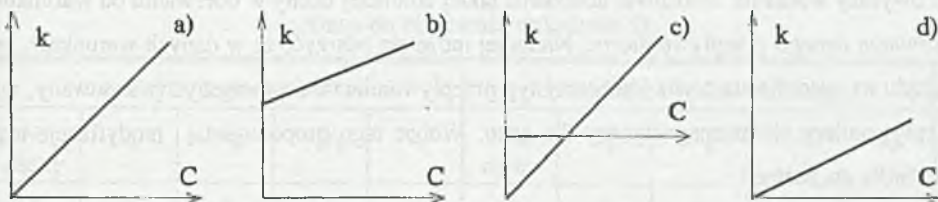
4.3. Wskaźnik oceny przepływomierza

Cechy charakteryzujące poszczególne przepływomierze są określane, zgodnie ze swoją naturą, skalą ciągłą lub skwantowaną. Na przykład niezawodność, której miarą może być średni czas pracy między naprawami, jest wielkością ciągłą, natomiast klasa dokładności jest wyrażona wartościami skwantowanymi, np. 0,2%, 0,5%, 1%. Do ilościowej łącznej oceny przydatności przepływomierzy należy dla cech dobrać taką skalę, aby na jej podstawie można było dokonać takich obliczeń. Praktycznie, wystarczająca jest skala liniowa o postaci:

$$k = a C + b, \quad (13)$$

gdzie C oznacza miarę cechy.

Na rys. 6 przedstawiono możliwe przebiegi oceny k .



Rys.6. Oceny ciągłe cechy: a) proporcjonalna, b) liniowa z przesunięciem dodatnim, c) liniowa z przesunięciem ujemnym, d) proporcjonalna ze zmniejszoną czułością
 Fig.6. Continuous evaluation of feature: a)proportional, b)linear with positive offset, c) linear with negative offset, d) proportional with decreased sensitivity

Skala przedstawiona na rys. 6a jest najbardziej naturalna. Skale przedstawione na rys.6b i 6d powodują zmniejszenie różnic ocen cech przepływomierza, przy czym przesunięcie w przypadku skali 6b spowoduje, że iloraz wskaźników definiowanych wzorem (15) będzie mniejszy niż w przypadku 6d. Skala 6c pozwala na uzyskanie dodatniej wartości wskaźnika dopiero przy przekroczeniu pewnych wartości cech. Uniemożliwia to ilorazowe porównanie wskaźników dla różnych przepływomierzy, natomiast daje wyraźne różnicowanie przy odejmowaniu. W przypadku cech o wartościach skwantowanych (np. klasa dokładności) wartości ocen są również skwantowane. W przypadku cech o skalach ciągłych należy stosować skwantowane skale wartości ocen W , przy czym z praktycznego punktu widzenia liczba poziomów winna wynosić od dwóch do kilku. Funkcja W może być definiowana następująco:

$$W = E [A C] + B, \quad (14)$$

gdzie: $E[AC]$ - funkcja entier (część całkowita liczby), A - czułość, B - liczba całkowita.

Przykładowo, gdy zdecydowano się na dopuszczalne wartości oceny W niezawodności w postaci liczb: 0, 1, 2, 3, przy czym maksymalna niezawodność mierzona czasem między naprawami wyrażona w latach wynosi 30, natomiast minimalna - 0, to wartość B wynosi 0, natomiast A wynosi 0,1.

Właściwości poszczególnych przepływomierzy mogą być oceniane według wskaźnika addytywnego:

$$q_j = \sum_{i=1}^N k_{ij}, \quad (15)$$

gdzie: k_{ij} oznacza ocenę i -tej cechy przepływomierza j .

Powyższy wskaźnik umożliwia dokonanie takiej zbiorczej oceny w oderwaniu od warunków stosowania danego przepływomierza. Niemniej może się zdarzyć, że w danych warunkach, ze względu na specyficzną cechę konkretny typ przepływomierza nie może być zastosowany, np. przepływomierz elektromagnetyczny dla gazu. Wobec tego proponuje się modyfikację tego wskaźnika do postaci:

$$Q_j = \left(\sum_{i=1}^N w_{ij} k_{ij} \right) \prod_{i=1}^N a_{ij}, \quad (16)$$

gdzie: w_{ij} - współczynniki wpływu wyrażające ważność danej i -tej cechy w określonych warunkach, a_{ij} - współczynnik przyjmujący wartość 1, gdy przepływomierz j -ty może być w danych warunkach stosowany ze względu na daną cechę oraz wartość 0, gdy nie może być stosowany.

Podobnie jak ocenom cech wymienionym w punkcie 4.2 należy również przypisać skwantyfikowaną skalę współczynnikom wpływu w_{ij} . Często jest tak, że przepływomierz zalecany ze względu na pewne korzystne i pożądane właściwości w danych warunkach będzie wykazywał niekorzystne inne właściwości, które mogą nawet jego zastosowanie dyskwalifikować. Przykładem może być zastosowanie dokładnego, o dobrej powtarzalności wskaźnik przepływomierza turbinowego do pomiaru strumienia przepływu szlamów włóknistych lub uśredniającej rurki piętrzącej w przypadku zniekształconych rozkładów prędkości lub niesionych zanieczyszczeń, które mogą nawet zatkać otwory. W takim przypadku należy zastosować przepływomierz elektromagnetyczny, mimo że jest droższy i wymaga dużego nakładu pracy przy instalowaniu czujnika pomiarowego.

W [10] sugerowano stosowanie w zależności od charakteru danej cechy przepływomierza trójstopniową (mały, średni, duży) lub dwustopniową (tak, nie) skalę oceny. Przykładowo, dokładność przepływomierza może być oceniana w skali trójstopniowej, natomiast możliwość pracy w stanie zalania wodą w skali tak - nie. W celu obliczenia wskaźnika w_{ij} przyporządkowuje się w pierwszym przypadku odpowiednio wartości oceny 1, 2, 3, natomiast w drugim przypadku 1 i 2.

4.4. Przykładowe obliczenia

W tablicy 4 podano przykładowe obliczenia wskaźnika Q_j dla konkretnego przypadku pomiaru strumienia objętości gazów spalinowych z procesu tlenowo-konwertyrowego w Hucie im. Sędzimira w Krakowie. Wzięto pod uwagę dwa rodzaje przepływomierzy: kryzę segmentową i uśredniającą rurkę spiętrzącą.

Tablica 4

Dane do obliczenia wskaźnika Q

Kryza segmentowa					Uśredniająca rurka spiętrzącą				
Nr cechy	k_{ij}	w_{ij}	$w_{ij}k_{ij}$	a_{ij}	Nr cechy	k_{ij}	w_{ij}	$w_{ij}k_{ij}$	a_{ij}
1	3	2	6	1	1	2	2	4	1
2	2	2	4	1	1	2	2	4	1
3	1	1	1	1	3	1	1	1	1
4	3	2	6	1	4	3	2	6	1
5	3	2	6	1	5	2	2	4	1
6	1	2	2	1	6	1	2	2	1
7	1	2	2	1	7	2	2	4	1
8	2	1	2	1	8	2	1	2	1
9	3	2	6	1	9	1	2	2	1
10	3	2	6	1	10	2	2	4	1
11	3	2	6	1	11	2	2	4	1
12	1	2	2	1	12	1	2	2	1
13	3	2	6	1	13	1	2	2	1
14	3	1	3	1	14	2	1	2	1
15	1	1	1	1	15	3	1	3	1
16	0	1	0	1	16	3	1	3	1

Suma obliczona według zależności (15) dla kryzy segmentowej wynosi 33, natomiast dla uśredniającej rurki spiętrzącej 30, a więc stosunek tych sum wynosi 1,1. Obliczając wskaźnik uwzględniający warunki stosowania przepływomierza, wyrażony wyrażeniem (16), otrzymuje się odpowiednio wartości 59 i 49, co daje iloraz 1,2, a więc nieco większy niż w przypadku wyznaczania wartości oceny oderwanej od warunków stosowania. Wobec tego można przyjąć, że w tych konkretnych warunkach kryza segmentowa jest lepsza do stosowania. Dla innych przepływomierzy wartość wskaźnika jakości wyrażonego wyrażeniem (12) wynosiłaby zero, np.

dla turbinowego ze względu na średnicę (cecha nr 11), dla elektromagnetycznego ze względu na rodzaj płynu (cecha nr 5), dla przepływomierza Coriolisa ze względu na średnicę rurociągu (cecha nr 11). Dane do obliczenia wskaźnika Q_j dla przepływomierza turbinowego i elektromagnetycznego podano w tablicy 5.

Tablica 5

Dane do obliczenia wskaźnika Q

Przepływomierz turbinowy					Przepływomierz elektromagnetyczny				
Nr cechy	k_{ij}	w_{ij}	$w_{ij}k_{ij}$	a_{ij}	Nr cechy	k_{ij}	w_{ij}	$w_{ij}k_{ij}$	a_{ij}
1	2	2	4	1	1	3	2	6	1
2	3	2	6	1	1	2	2	4	1
3	1	1	1	1	3	1	1	1	1
4	3	2	6	1	4	3	2	6	1
5	1	2	3	1	5	2	2	4	0
6	1	2	2	1	6	1	2	2	1
7	1	2	2	1	7	3	2	4	1
8	2	1	2	1	8	3	1	3	1
9	1	2	3	0	9	3	2	6	1
10	1	2	3	0	10	3	2	6	1
11	1	2	2	0	11	2	2	4	1
12	2	2	4	1	12	3	2	6	1
13	3	2	6	1	13	2	2	4	1
14	2	1	2	1	14	3	1	3	1
15	1	1	1	1	15	1	1	1	1
16	0	1	0	1	16	0	1	0	1

Wartości wskaźników addytywnych zdefiniowanych wyrażeniem (15) wynoszą dla przepływomierza turbinowego i ultradźwiękowego odpowiednio 33 i 35, natomiast biorąc pod uwagę ważność cech w danych warunkach i obliczając kombinację liniową ocen cech w_{ij} i współczynników wpływu k_{ij} otrzymuje się odpowiednio wartości 47 i 60. Wynika stąd, że przepływomierz elektromagnetyczny byłby nieco lepszy niż kryza segmentowa, dla której wartości wskaźników wynoszą odpowiednio 33 i 59. Ze względu na warunki, w jakich przepływomierze mają być stosowane, oblicza się wskaźnik zdefiniowany zależnością (16). W przypadku przepływomierza turbinowego dla trzech cech wartości a_{ij} wynoszą 0, natomiast dla

przeplwyomierza elektromagnetycznego - dla jednej. Niemniej w obu przypadkach dyskwalifikuje to możliwość stosowania zarówno przeplwyomierza turbinowego, jak i elektromagnetycznego w tych konkretnych warunkach.

5. Podsumowanie

Potrzeby pomiaru strumienia objętości lub strumienia masy wynikające z procesów technologicznych mogą być zaspokojone przez zastosowanie różnych przeplwyomierzy. Najczęściej stosowane są zwężki, jednak znajdują również zastosowanie uśredniające rurki spiętrzające, przeplwyomierze elektromagnetyczne i ultradźwiękowe.

Przedstawiony krótki opis poszczególnych przeplwyomierzy oraz różnorodność warunków, w jakich mogą być stosowane, wskazuje, że istnieje potrzeba obiektywizacji wyboru przeplwyomierza do konkretnego zadania pomiarowego. Zaproponowano wskaźnik, który w sposób elastyczny może być stosowany przez projektanta przy wyborze przeplwyomierza. Sposób posługiwania się wskaźnikiem zilustrowano na konkretnym przykładzie.

LITERATURA

1. Blickley G., Magmeterrs Improve with Age, Control Engineering, January 1992, pp.67-69.
2. Brzęcki J., Właściwości metrologiczne i eksploatacyjne przeplwyomierzy Coriolisa. Praca dyplomowa, Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, Gliwice 1995
3. Danikiewicz M., Analiza niepewności pomiaru dla przeplwyomierzy zwężkowych do gazów, PAK, Rok XL, 7/1994, ss. 153 - 156
4. ENKO S.C. Gliwickie Zakłady Urządzeń Elektronicznych, 1994, materiały firmowe
5. ISO 6817 Measurement of conductive liquid flow in closed conduits - Method using electromagnetic flowmeters
6. Jelonek J., Waluś S., Właściwości metrologiczne uśredniających rurek spiętrzających, PAN nr 10/1983, ss. 329-330
7. Konwińska D., Waluś S., Warunki i wymagania zastosowania analizatorów gazu do niektórych obiektów hutniczych w świetle doświadczeń eksploatacyjnych, X MNM, Szczecin, IX.1975
8. Miller R.W., Flow measurement engineering hanbook, Mc Graw-Hill, Inc., New York, St. Louis, San Francisco, Auckland, Bogota, Caracas, ... 1989

9. PN-93/m-53950/01 Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwojek pomiarowych
10. Shelly E., Kirkpatrick A.: Sewer flow measurement-a state-of-the art assessment, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati 1975
11. SONIX Przemysłowe Urządzenia Elektroniczne, 1990, materiały firmowe
12. Strohrmann G., atp-Marktanalyse Durchflußmeßtechnik, Automatisierungstechnische Praxis 28. Jahrgang, Heft 3/1986, ss.122-129
13. Strohrmann G., atp-Marktanalyse Durchflußmeßtechnik, (Teil 2), Automatisierungstechnische Praxis 28. Jahrgang, Heft 4/1986, ss. 169-178
14. Turkowski M., Właściwości metrologiczne i eksploatacyjne oraz problemy budowy przepływomierzy Coriolisa, PAK 8/1991 ss. 201-205
15. Waluś S., Analiza porównawcza właściwości metrologicznych i eksploatacyjnych przepływomierzy ultradźwiękowych. Konferencja naukowo-techniczna "Pomiary przepływów i poziomów w energetyce, Ślesin, 10-18.IV.1986, ENERGOPOMIAR - Gliwice, 1986, ss. 116-130
16. Waluś S., Pomiary wielkości nieelektrycznych [w]: Poradnik Inżyniera Elektryka, Rozdział 9.10, WNT, Warszawa, 1995, tom 1, ss. 492-501
17. Waluś S., Potrzeby przemysłu i innych jednostek gospodarki uspołecznionej i nieuspołecznionej w Polsce w dziedzinie aparatury do pomiaru przepływu według stanu na 1986r., Raport Sekcji Pomiarów Przepływu Polskiego Komitetu Naukowo Technicznego NOT d/s Pomiarów i Automatyki, Podkomitet Pomiarów, Gliwice 1988 praca niepublikowana)
18. Waluś S., Raport nt. krajowego zapotrzebowania na przepływomierze (komunikat),PAK nr 2/1989, ss. 40
19. Waluś S., Przepływomierze ultradźwiękowe-własności metrologiczne, PAK nr 1/1978, ss.8-9
20. Waluś S., Żelezik J., Analiza systemu pomiarowego do wyznaczania szybkości odwęglania konwertora tlenowego, Prace VI Krajowej Konferencji Automatyki, Polski Komitet Pomiarów i Automatyki NOT, Poznań, 9-11 IX 1974, Tom III, ss. 110 - 117

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Norwisz
Profesor Akademii Górniczo-Hutniczej

Abstract

The needs of flow measurement of fluids in metallurgy are introduced. The example of needs for gas flow measurement in Katowice Ironworks are presented in Table 1 and thermodynamic parameters of these gases are presented in Table 2. In the article are described most important properties of some flowmeters, which can be used in metallurgy.

The output signal from the constriction flowmeter (differential pressure) must be corrected by density, which depends on temperature, pressure and consistency of the gas or the fluid according to Eq. (1). For averaging impact tube the simply mathematical procedure is presented and it is shown, that volumetric or mass flowrate measurement is possible (Eq. (4) and (7)). Equations describing performance of electromagnetic flowmeter (Eq. (8) and (9)) introduced by the author show, that the magnetic field can not be constant in the crosssection of the pipe, but the product of coefficient k and inductivity B should be constant.

Ultrasonic flowmeters give usually signals, which depend on average velocities in ultrasonic paths (Eq. (10)). For known fluid is there possible to measure mass flowrate calculating ultrasonic velocity from Eq. (11) and taking density from the table. There are two working principles: the measurement of ultrasonic wave flight for clean liquids and Doppler effect for liquids with gas bubbles or suspended solids. The Coriolis flowmeters, which are true mass flowmeters and are going in to the Polish market have good accuracy.

The possibility of using of various flowmeters in various conditions are presented in Table 3. In the article are formulated 16 demands for flowmeters used in metallurgy. The author defined the quality coefficient (Eq. (15)) which enables quantitative comparative evaluation of each flowmeter without connection with conditions, in which flowmeter will be used. The quality coefficient expressed with Eq. (16) connects to working conditions and gives quantitative evaluation for concrete conditions. When the flowmeter cannot be used in some conditions, the quality coefficient is multiplied by 0. The examples of quality coefficient calculation for the segment orifice, impact averaging tube, turbine flowmeter and electromagnetic flowmeter are presented.