

Przeptywomierze termiczne

Budowa, działanie, zastosowania, właściwości metrologiczne

Mateusz Turkowski

Przeptywomierze termiczne (zwane też termometrycznymi, cieplnymi lub kalorymetrycznymi) są stosowane głównie do bezpośredniego pomiaru strumienia masy czystych, suchych gazów (konstrukcje dla cieczy spotyka się rzadko).

Sygnał wyjściowy tych przeptywomierzy, podobnie jak w przeptywomierzach Coriolisa, jest funkcją strumienia masy i nie wymaga wprowadzania poprawek od wpływu ciśnienia i temperatury. Różnica polega na cenie (przeptywomierze Coriolisa są wielokrotnie droższe) i dokładności (ok. 0,2 % w przypadku przeptywomierzy Coriolisa, ok. 1 – 2 % w przypadku przeptywomierzy termicznych). Przeptywomierze termiczne są więc znacznie prostsze, tańsze, ale zarazem mniej dokładne – co jednak w wielu aplikacjach nie ma dużego znaczenia.

Dla tzw. przeptywomierzy termicznych kapilarnych osiąga się zakresy od 10^{-3} kg/h do 2500 kg/h przy zakresowości 50: 1 i niepewności w granicach ± 1 % wartości aktualnej strumienia masy (górną granicą zakresu pomiarowego) do ± 5 % wartości aktualnej (dolną granicą zakresu).

Przeptywomierze w postaci wstawki do rurociągu (do DN 200) mają zakresy od 2 do 7000 kg/h, przy niepewności ± 2 % wartości mierzonej.

Budowane są też przeptywomierze w postaci sondy z jednym sensorem lub sondy uśredniające z wieloma sensorami do kanałów o dużych wymiarach (np. wentylacyjnych).

Podstawy teoretyczne działania przeptywomierzy termicznych

Równanie opisujące przekazywanie ciepła ma następującą ogólną postać

$$Q = hA(T_s - T_g) \quad (1)$$

gdzie: Q – strata energii cieplnej, h – współczynnik przejmowania ciepła, T_s – temperatura powierzchni, T_g – temperatura płynu, A – powierzchnia ogrzewanego obiektu.

Bezwymiarowa ogólna zależność dla współczynnika przejmowania ciepła przy wymuszonej konwekcji ma postać

$$Nu = CRe^m Pr^n \quad (2)$$

gdzie: Nu – liczba Nusselta ($Nu = hd/\kappa$), C – stała, Re – liczba Reynoldsa ($Re = \rho v d / \eta$), Pr – liczba Prandtla ($Pr = \eta c_p / \kappa$), m , n – wykładniki, h – współczynnik przejmowania

ciepła, d – średnica sensora, κ – przewodność cieplna płynu, η – dynamiczny współczynnik lepkości płynu, c_p – ciepło właściwe płynu przy stałym ciśnieniu, ρ – gęstość płynu, v – prędkość płynu, ρv – prędkość przepływu masy.

Dla gazów liczba Prandtla jest w przybliżeniu równa 0,7 i w niewielkim tylko stopniu zależy od temperatury, można ją więc w dalszych rozważaniach pominąć. Biorąc pod uwagę (2) współczynnik przejmowania ciepła jest równy

$$h = \frac{C\kappa}{d} \left(\frac{\rho v d}{\eta} \right) \quad (3)$$

Równanie (1) nie uwzględnia konwekcji swobodnej wywołanej przez ogrzewany sensor.

Ogrzewany sensor powoduje pewien przepływ konwekcyjny, który w pewnym stopniu chłodzi sensor nawet przy braku przepływu. Przepływ konwekcyjny jest tym większy im wyższa jest temperatura sensora. Dla przeptywomierza o stałej mocy temperatura sensora w stanie bez przepływu jest stosunkowo wysoka, tak więc efekt ten jest duży i przejawia się w niestabilności zera. W przeptywomierzu o stałej różnicy temperatur temperatura sensora jest niższa, ponadto jest stała a efekt związany z konwekcją swobodną jest stały i niezależny od prędkości przepływu.

Inne zjawiska, które należy uwzględnić to:

a) przewodzenie ciepła od sensora od podstawy – wspornika, w którym jest on osadzony. Staranne zaprojektowanie czujnika pozwala na zminimalizowanie tego wpływu;

b) wypromieniowanie ciepła z czujnika. Efekt ten jest zwykle pomijalny w porównaniu z wymuszoną przepływem konwekcją.

Uwzględniając powyższe, równanie (1) można przedstawić w postaci

$$Q = \frac{\kappa A}{d} \left[B + C \left(\frac{\rho v d}{\eta} \right)^m \right] (T_s - T_g) \quad (4)$$

Q stanowi całkowitą straconą energię spowodowaną przez wszystkie czynniki, B jest współczynnikiem uwzględniającym swobodną konwekcję, promieniowanie i przewodzenie do podstawy czujnika.

Równanie (4), zwane też prawem Kinga, było stosowane z powodzeniem do projektowania i wzorcowania termomanometrów z grzanym włóknem.

Z równania (4) wynika bezpośrednio, że wskazanie przeptywomierza zależy od strumienia masy, dzięki temu, że występuje tam człon ρv – prędkość przepływu

Dr inż. Mateusz Turkowski – Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych, Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

masy. Nie jest więc potrzebna korekcja wpływu ciśnienia i temperatury, jak to ma miejsce w innych często stosowanych przepływomierzach (zwężkowy, turbino-owy itp.) Wykładnik m jest zwykle bliski 0,3. Dzięki temu przepływomierz ma dużą czułość przy małych przepływach, co umożliwia uzyskanie wyjątkowo dużych zakresowości.

Praktyczne rozwiązania przepływomierzy termicznych

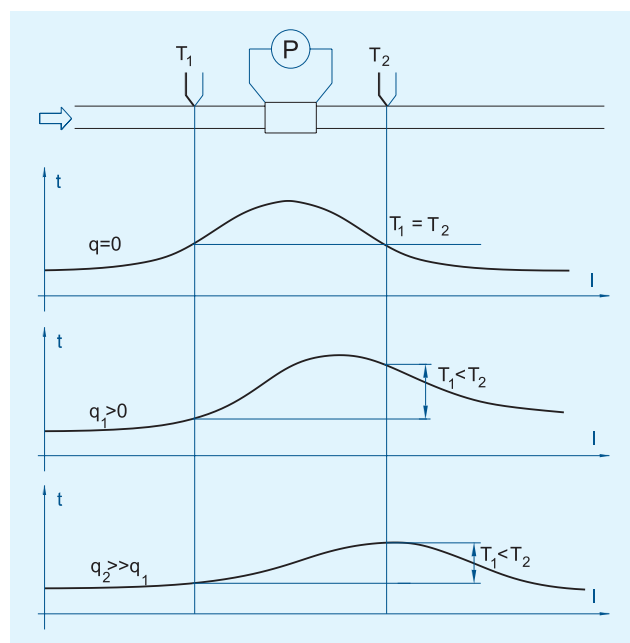
Jedno z klasycznych, rzadko obecnie stosowanych rozwiązań [1] przedstawiono na rys. 1. Na rurkę, przez którą przepływa płyn, nawinięty jest grzejnik. Przed i za grzejnikiem są umieszczone czujniki temperatury mierzące odpowiednio temperatury T_1 i T_2 . Przy stałej mocy grzejnika P , przy braku przepływu, ze względu na symetrię, oba grzejniki będą miały tę samą temperaturę.

W obecności przepływu czujnik przed przepływomierzem będzie chłodzony przez dopływający gaz, a temperatura T_1 spadnie. Jednocześnie temperatura T_2 czujnika za grzejnikiem wzrośnie, ze względu na przeniesienie w jego stronę ciepła przez przepływający gaz. Różnica temperatur $T_2 - T_1$ będzie więc rosła wraz ze wzrostem strumienia masy zgodnie z zależnością:

$$q_m = C \frac{P - S}{c_p (T_2 - T_1)} \quad (5)$$

gdzie: S – straty mocy (przez przewodzenie itp.), c_p – ciepło właściwe gazu przy stałym ciśnieniu, C – stała wyznaczana przy wzorcowaniu przepływomierza.

Przy znacznie większym strumieniu masy różnica temperatur zacznie jednak ponownie maleć, gdyż T_1 osiągnie już wartość bliską temperaturze dopływającego gazu, a T_2 będzie spadać wskutek intensywnego odbioru ciepła przez przepływający gaz. Charakterystyka



Rys. 1. Klasyczne rozwiązanie przepływomierza termicznego. Pokazano rozkład temperatury wzdłuż rurki dla różnych wartości strumienia masy

przepływomierza (różnica temperatur w funkcji strumienia masy) będzie więc początkowo rosnąca, a następnie malejąca.

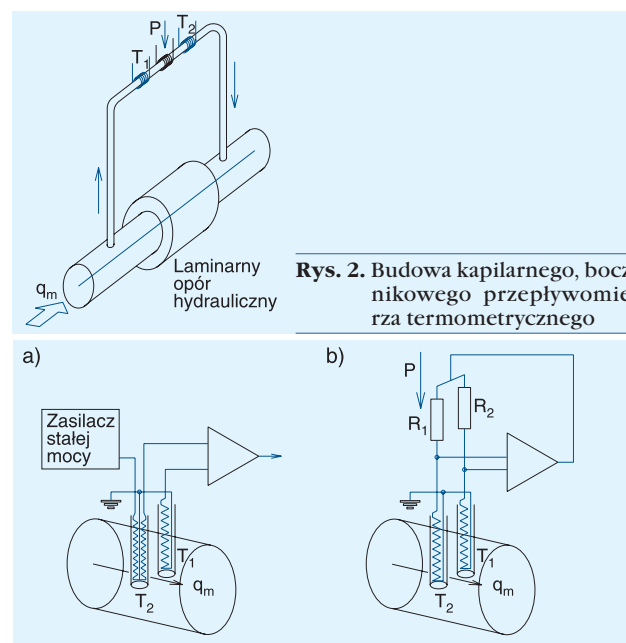
Przepływomierze oparte na tej zasadzie są zbudowane z reguły jako boczniowe [2, 4], jak pokazano na rys. 2. Laminarny opór hydrauliczny generuje spadek ciśnienia, który powoduje przepływ tylko ułamka głównego strumienia masy, ale proporcjonalnego do tego spadku ciśnienia, przez bocznik z zainstalowanym, opisanym wyżej układem pomiarowym. Przepływ ten jest laminarny, dlatego przepływomierze te bywają nazywane kapilarnymi przepływomierzami termicznymi.

Do dużych średnic rurociągów i dużych wartości strumienia masy stosuje się przepływomierze z czujnikiem umieszczonym w korpusie przystosowanym do konkretnej średnicy rurociągu [3] (rys. 3). Przepływomierze te, w odróżnieniu od kapilarnych, są bardziej odporne na zanieczyszczenia lub obecność wilgoci. Czujnik jest wyposażony w dwa sensory temperatury, jeden z nich mierzy temperaturę przepływającego gazu T_1 . Drugi jest zasilany takim prądem, aby wyraźnie wystąpił efekt samopodgrzewania. Temperatura drugiego czujnika T_2 będzie zależała od intensywności chłodzenia, zależnego z kolei od strumienia masy.

Jeżeli czujnik podgrzewany zasilany jest przy stałej mocy zasilania (rys. 3 a), to obowiązuje zależność

$$\Delta T = K_1 + K_2 q_m^{K_3} \quad (6)$$

Takie rozwiązanie stosuje się jednak wyjątkowo. Przepływomierze o stałej mocy mają dużą stałą czasową, rzędu kilkudziesięciu sekund. Wady tej nie mają przepływomierze o stałej różnicy temperatur (rys. 3 b). Jeżeli więc za pomocą pętli sprzężenia zwrotnego będzie utrzymywana stała, niezależna od strumienia różnica temperatur ΔT poprzez zmianę mocy zasilania P , to obowiązuje zależność (7).



Rys. 3. Przepływomierze w formie wstawki rurowej:
a) o stałej mocy,
b) o stałej różnicy temperatur

$$P = \Delta T(K_4 + K_5 q_m^{K_6}) \quad (7)$$

Stałe wzorcowania K_1, K_2, K_4 i K_5 zależą głównie od wymiarów geometrycznych czujników, ciepła właściwego i przewodności gazu, a K_3 i K_6 głównie od liczby Reynoldsa.

Ponieważ jest utrzymywana stała różnica temperatur, nie zachodzi proces chłodzenia ani podgrzewania sensorów (co wymaga odpowiedniego czasu), w związku z tym stała czasowa jest mała i wynosi około 1 s.

Druga zaleta przepływomierzy o stałej różnicy temperatur jest związana z konwekcją. Ogrzewany sensor powoduje pewien przepływ konwekcyjny, który w pewnym stopniu chłodzi sensor nawet przy braku przepływu. Przepływ konwekcyjny jest tym większy im wyższa jest temperatura sensora. Dla przepływomierza o stałej mocy temperatura sensora w stanie bez przepływu jest stonkowo wysoka, tak więc efekt ten jest duży i przejawia się w niestabilności zera. W przepływomierzu o stałej różnicy temperatur temperatura sensora jest niższa, ponadto jest stała więc efekt związany z konwekcją swobodną jest także stały i niezależny od prędkości przepływu.

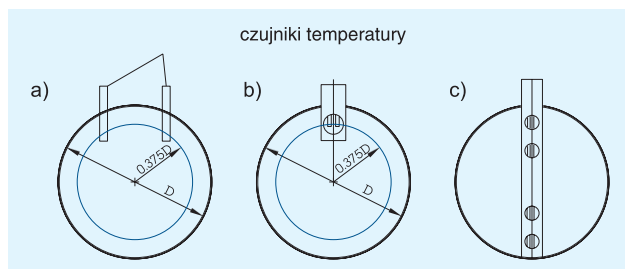
Dla przepływu turbulentnego wskazania przepływomierza będą proporcjonalne do prędkości średniej, jeżeli sensory temperatury są umieszczone w odległości 0,375 promienia rurociągu od jego środka (rys. 4 a). Szczególną staranność należy zachować w przypadku przepływomierzy w postaci sondy, wsuwanych do rurociągu (rys. 4 b). Zasada ta jest słuszna dla przepływu w pełni rozwiniętego, dla odpowiednio długiego rurociągu dolotowego.

Dla bardzo dużych wymiarów przewodów, także nieokrągłych np. wentylacyjnych, stosuje się często sondy z kilkoma sensorami termicznymi, uśredniającymi strumień masy w przewodzie. Rozwiązanie to umożliwi pomiar strumienia masy także przy zniekształconych, niesymetrycznych profilach prędkości.

Główne właściwości metrologiczne przepływomierzy termicznych, ułatwiające ich dobór do określonego zadania, przedstawiono w tabelicy 1.

Na wskazania przepływomierzy termicznych ma do pewnego stopnia wpływ temperatura mierzonego gazu. Na ogół jednak układ kompensacji tego wpływu jest już fabrycznie zintegrowany z przepływomierzem.

Do wzorcowania przepływomierzy termicznych stosuje się powietrze, azot lub inny gaz obojętny. Ponieważ istotnym parametrem wpływającym na wskazania przepływomierzy termicznych jest ciepło właściwe, stoso-



Rys. 4. Położenie czujników przepływomierzy termicznych: a) przepływomierz w postaci wstawki rurowej, b) przepływomierz w postaci sondy, c) przepływomierz z kilkoma sensorami uśredniającymi rozkład prędkości

wany jest współczynnik przeliczeniowy k , równy stonkowi ciepła właściwych gazu zastosowanego przy wzorcowaniu i gazu mierzonego:

$$k = \frac{c_{p,wzorc}}{c_{p,mierz}} \quad (8)$$

Wówczas, w celu przeliczenia wskazań uzyskanych przy przepływie gazu używanego przy wzorcowaniu na gaz roboczy, należy wskazania pomnożyć przez k :

$$q_{m, mierz} = q_{m, wzorc} \times k \quad (9)$$

Producenci zwykle dostarczają listę współczynników przeliczeniowych dla najczęściej stosowanych gazów technicznych, bądź uwzględniają te współczynniki już podczas wzorcowania przyrządu.

Czujniki o identycznej budowie jak w przepływomierzach termicznych są też stosowane jako sygnalizatory przepływu, a nawet jako sygnalizatory poziomu cieczy, które wykorzystują znaczną różnicę ciepła właściwych cieczy i gazów.

Bibliografia

1. Turkowski M., Dyakowska E.: Ocena przydatności modelu matematycznego przepływomierza cieplnego do celów projektowych. PAK 4/1983, s. 111–113.
2. Norma międzynarodowa ISO 14511:2001. Measurement of fluid flow in closed conduits – Thermal mass flowmeters.
3. Baker R. C., Gimson C.: The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 12 (2001), s. 113–121.
4. Viswanathan M. et al.: Development, modeling and certain investigations on thermal mass flow meters. Flow Measurement and Instrumentation, 12 (2002), s. 353–360. ■

Tablica 1. Najważniejsze właściwości przepływomierzy termicznych

	Przepływomierz kapilarny (rys. 2)	Przepływomierze strumienia głównego	
		z własnym korpusem, rys. 4a	w postaci sondy, rys. 4 b i c
Zakres strumienia płynu (powietrze lub azot, warunki normalne); zakres zależy od średnicy rurociągu	1 ml/min – 200 m ³ /h	0,22–700 kg/h	> 5 kg/h, nawet powyżej 100 000 kg/h
Średnice rurociągu	3–200 mm	8–200 mm	powyżej 80 mm
Rodzaj gazu	czysty, suchy	–	–
Temperatura gazu	do 70 °C	do 500 °C	