

# Badania właściwości metrologicznych termooanemometrycznej metody pomiaru energii gazu ziemnego

Orest Serediuk, Vitaliy Malisevych

Iwano-Frankowski Narodowy Uniwersytet Techniczny Nafty i Gazu, Ukraina

Zygmunt L. Warsza

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

**Streszczenie:** Przedstawiono termooanemometryczną metodę bezpośredniego pomiaru wartości energetycznej przepływającego gazu ziemnego. Jest ona oparta na zastosowaniu dwu przetworników: termooanemometrycznego i różnicy ciśnień. Opisano konstrukcję i działanie laboratoryjnego stanowiska przeznaczonego do badania tej metody. Na podstawie wyników badań doświadczalnych wyznaczono charakterystykę kalibracyjną przetwornika termooanemometrycznego i zależność jego sygnału wyjściowego od zmian wartości energetycznej gazu naturalnego dla zakresu wartości opałowej (7759–8538) kcal/m<sup>3</sup> i przepływów do 0,6 m<sup>3</sup>/h. Przeprowadzono analizę składowych niepewności pomiarów typu B tą metodą i oszacowano jej niepewność standardową. Jest to przykład metody pośredniej, która polega na pomiarze innego parametru gazu, zależnego od zmian jego składu, gdy parametr właściwy jest trudny do określenia, lub nie można go zbadać bezpośrednio. Taka metoda może znaleźć wiele innych zastosowań.

**Słowa kluczowe:** gaz ziemny, wartość energetyczna, ciepło spalania, pomiar energii gazu, przetwornik termooanemometryczny, charakterystyka kalibracyjna, niepewność pomiarów

## 1. Wprowadzenie

Rozwój energooszczędnych technologii spowodował konieczność wprowadzenia jednolitego systemu rozliczania dostaw gazu ziemnego z uwzględnieniem jego kaloryczności. Na Ukrainie system ten opiera się na normie ukraińskiej [1] opublikowanej w 2011 r. Reguluje ona sposób i procedurę obliczania płatnościach handlowych za energię pobieranego gazu. Jest ona zharmonizowana z normami europejskimi [2], [3], podobnie jak obowiązujące w Polsce rozporządzenie Ministra Gospodarki [4]. Z tego powodu na Ukrainie wprowadzona już została norma międzypaństwowa dotycząca funkcjonowania stacji pomiarowych gazu ziemnego [3]. Planuje się wyposażyć te stacje w środki do pomiaru wartości opałowej (ciepła spalania) i energii przepływającego gazu ziemnego. Pełne wdrożenie obowiązujących przepisów jest jednak utrud-

nione, w tym głównie skutek braku środków technicznych o prostej konstrukcji służących w praktyce do wyznaczania na bieżąco energetycznej wartości gazu ziemnego u dużych odbiorców i dla wyodrębnionych części sieci dystrybucji gazu. Jest to szczególnie istotne, gdy gaz pochodzi z kilku różnych źródeł i jego skład szybko zmienia się. Urządzenia pomiarowe stosowane u odbiorców na Ukrainie, jako parametr obrotu handlowego mierzą objętość gazu ziemnego, którą sprowadza się do warunków znormalizowanych (293,15 K i 101,325 kPa).

W Polsce dominuje gaz pochodzący z jednego źródła. Jego skład i wartość energetyczna zmieniają się niewiele i są dość powolne. Dlatego też rozliczenia z konsumentami prowadzi się według energii gazu, stosując metodę obliczeniową [4], na podstawie pomiarów objętości z okresową korekcją na ciepło spalania. Dane o składzie gazu dla danej części sieci dystrybucji gazu uzyskuje się za pomocą analizy chromatograficznej.

Analiza, rozwój sposobów i udoskonalenie urządzeń umożliwiających tanie i proste w obsłudze bezpośrednie monitorowanie wartości energetycznej gazu ziemnego wymaga prowadzenia badań. Może ono stworzyć nowe sposoby bardziej racjonalnego wykorzystywania zasobów energetycznych gazu i zapewnić wyższą efektywność ekonomiczną przedsiębiorstw gospodarczych, gdyż poprawi się rzetelność i dokładność pomiarów zużycia energii gazu i odbiorcy uzyskają możliwość porównywania jej z energią innych nośników.

### Autor korespondujący:

Zygmunt L. Warsza, zlw@op.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 26.09.2017 r., przyjęty do druku 02.11.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

## 2. Wartość energetyczna gazu

Energia wydzielająca się w procesie spalania w powietrzu określonej objętości (lub masy) gazu ziemnego jest jedną z najważniejszych jego cech jakościowych. Charakteryzuje się ją przez tzw. górną i dolną (po uwzględnieniu poboru części z ciepła spalania na kondensację wody) wartości opałowe. Z doświadczeń, na których bazuje norma europejska [2] i wzorowane na niej normy krajowe, w tym ukraińska [1], wynika, że w pomiarach dystrybucji gazu ziemnego należy mierzyć energię zawartą w jego objętości lub masie, wyrażaną w MJ lub kWh. Miarą tej energii jest wartość ciepła spalania gazu ziemnego na jednostkę jego objętości lub masy, wyrażana w MJ/m<sup>3</sup> lub MJ/kg. W rozliczeniach i transporcie gazu ziemnego stosuje się pojęcie jego wartości energetycznej. Jest to energia gazu przepływającego na jednostkę czasu. Mierzy się ją w MJ/s lub w kcal/s – jednostce spoza systemu SI stosowanej jeszcze w praktyce. Całkowicie tej wielkości w dziedzinie czasu daje ilościową wartość energii mierzonego gazu ziemnego. Oblicza się ją jako iloczyn zmierzonej objętości (lub masy) gazu i jego wartości opałowej, czyli ciepła spalania w określonych warunkach.

Według norm [1, 2], wartość energii  $e$  dla strumienia gazu, który przepłynął przez poprzeczny przekrój pomiarowy rurociągu, wyznacza się ze wzoru

$$e = q H \quad (1)$$

gdzie:  $q$  – objętość gazu w m<sup>3</sup>;  $H$  – ciepło spalania (wartość opałowa) gazu ziemnego w J/m<sup>3</sup>.

Tylko nieliczne publikacje z ostatnich kilku lat [5–12] dotyczące pomiarów przepływu gazu ziemnego, w tym polskie [11, 12], omawiają rozliczanie zużycia z uwzględnieniem jego energii. Jest to też tematyka badań naukowych podjętych w Ivano-Frankivskim Uniwersytecie Technicznym na Ukrainie [13, 14]. Najbardziej rozpowszechniona jest metoda obliczeniowa [11, 13] wyznaczania ciepła spalania gazu ziemnego, która wykorzystuje dane o składzie gazu uzyskane za pomocą analizy chromatograficznej. Oddziały nadzoru sieci gazowej są wyposażone w odpowiednie do tego zadania chromatografy. Monitorują one okresowo jakość gazu ziemnego i dokonują oceny jej zgodności z obowiązującymi przepisami i normami.

Chromatografy występują też w zestawie wyposażenia pomiarowej stacji [3] realizujących dystrybucję gazu metodą zmiennej różnicy ciśnień. Na przykład w stacji pomiarowej gazu „Grebeniki” na Ukrainie, do analizy *in-line* jakości gazu ziemnego stosuje się automatyczne przepływowe chromatografy gazowe ENCAL firmy INSTROMET. Jednakże taką metodę oznaczania ciepła spalania gazu ziemnego można stosować tylko w dużych punktach pomiaru gazu wyposażonych w drogi sprzęt. Nie nadaje się ona do bezpośrednich pomiarów. Gdy gaz pochodzi z kilku różnych źródeł, to jego skład u dużych odbiorców przemysłowych oraz dla wyodrębnionej części sieci gazowej dla domowych i innych drobnych konsumentów zmienia się dość często.

Obecnie w przemyśle ukraińskim, do pomiarów wartości opałowej gazu ziemnego stosuje się systemy pomiarowe z seryjnie produkowanymi kalorymetrami do ciągłego automatycznego pomiaru. Składają się one z jednostki głównej, jednostki sterującej, rejestratora i zasilacza i mierzą ciepła spalania określonej objętości różnych gazów palnych. Parametry tych kalorymetrów są opisane w pracy [14]. Obok szeregu zalet, takich jak małe gabaryty, brak specjalnych wymagań dla instalacji, szeroki zakres temperatury 5–50 °C, szybki czas pomiaru 20–30 s i błąd pomiaru wartości ciepła spalania gazu nieprzekraczający ±0,5%, występuje ograniczenie – praca tylko przy niskim ciśnieniu gazu roboczego, tj. do 20 kPa.

Stosuje się również przepływowy kalorymetr gazowy Lab Q1 [13], [21]. Służy on zarówno do wyznaczania górnego ciepła spalania gazu, jak też do pomiaru gęstości gazu w warunkach normalnych oraz zawartości dwutlenku węgla w składzie gazu. W przyrządzie tym wartość opałową uzyskuje się przez pomiar zależności między absorpcją promieniowania podczerwonego i przewodnictwem cieplnym analizowanej próbki gazu. Główne zalety tego kalorymetru to: brak otwartego ognia przy pomiarze, szybka ciągła analiza gazów, niskie koszty instalacji i obsługi. Błąd graniczny pomiaru górnego ciepła spalania nie przekracza 0,4%. Wadą jest tu konieczność wykorzystywania metanu do automatycznej kalibracji.

Do bezpośredniego pomiaru objętościowego dolnego ciepła spalania gazów palnych przeznaczony jest też kalorymetr gazowy typu SAB [13], [21]. Przyrząd ten mierzy metodą kalorymetryczną przez porównanie czasu spalania jednostkowej objętości badanego gazu i gazu używanego do kalibracji. Gaz dostarcza się do spalania w taki sposób, żeby była stała moc wydzielająca się w komórce pomiarowej bloku termicznego w wyniku reakcji chemicznej utleniania gazu palnego. Dopuszczalny błąd względnego kalorymetru nie przekracza ±0,45%. Wadą urządzenia jest dość długi cykl pracy (ok. 4 godzin) i nieciągłość działania wskutek porcjowania badanego gazu. Rozliczania kosztów gazu ziemnego według wartości jego energii jeszcze nie realizuje się na Ukrainie w pełni, tak jak w Polsce, gdyż brak kosztownej aparatury do jej pomiarów, ale ten system rozliczeń już też rozpoczęto wprowadzać.

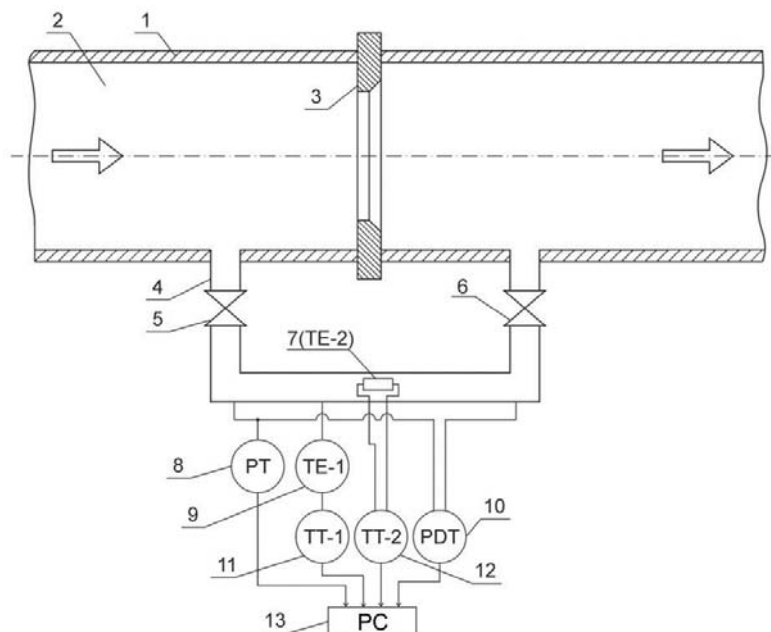
Dwu z autorów przedstawiło podstawy teoretyczne i zaproponowało oryginalną metodę [14] do ciągłego monitorowania energetycznej wartości gazu ziemnego. Wykorzystuje ona skorelowanie zmian jego parametrów termofizycznych i ciepła spalania wraz ze zmianą składu gazu. W rozwiązaniach konstrukcyjnych przyrządów do realizacji tej metody trzeba użyć dwóch rodzajów czujników: do pomiaru przepływu i do pomiaru ciepła spalania [15]. Jako pierwszy z nich można na przykład wykorzystać przetwornik różnicy ciśnienia (rys. 1) lub przetwornik naporowy [17, 21]. Natomiast ciepło spalania gazu ziemnego wyznacza się pośrednio przez pomiar współczynnika przewodzenia ciepła za pomocą przetwornika termoanemometrycznego. Ta metoda, po jej wdrożeniu, umożliwi bezpośredni pomiar energii gazu i poszerzy zbiór środków pomiarowych stosowanych do monitorowania wartości energetycznej gazu ziemnego.

W niniejszej pracy podaje się podstawy teoretyczne oraz opisuje się badania podstawowych parametrów metrologicznych metody termoanemometrycznej z punktu widzenia jej przydatności do budowy systemów pomiarowo-informatycznych przeznaczonych do zliczania na bieżąco wartości energii dostarczanego gazu ziemnego.

## 3. Opis i wyniki przeprowadzonych badań

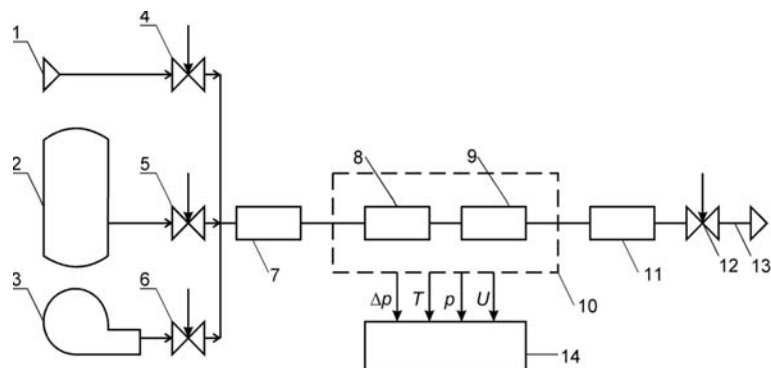
Do przeprowadzenia badań doświadczalnych wykorzystano stanowisko laboratoryjne z produkowanym seryjnie przetwornikiem termoanemometrycznym [16]. Działanie stanowiska omówi się w oparciu o jego schemat funkcjonalny podany na rys. 2, a wygląd zasadniczej części stanowiska przedstawiono na rys. 3.

Stanowisko to zawiera: króciec wlotowy 1 (rys. 2), zbiornik cylindryczny 2 ze skroploną mieszaniną propan-butan, źródło dopływu powietrza 3, zawory ustalające przepływ 4, 6, 12, reduktor ciśnienia 5, nagrzewacz przepływowy gazu roboczego 7, sekcję 10 do pomiarów termoanemometrycznych ze zwężką 8 i pierwotnym przetwornikiem 9 ciśnienia  $p$ , temperatury  $T$  i różnicy ciśnienia  $\Delta p$  na termoanemometrycznym przetworniku tu zastosowanym, wzorcowy licznik objętości gazu robo-



**Rys. 1. Przykład rozwiązania technicznego systemu do pomiaru zawartości energii gazu za pomocą przepływomierza różnicy ciśnień:**  
 1 – rurociąg; 2 – medium robocze – badany gaz; 3 – kryza pomiarowa; 4 – kanał obejściowy; 5, 6 – zawory odcinające; 7 – czujnik termooanemometryczny; 8, 9 – przetworniki ciśnienia i temperatury gazu przepływającego; 10 – przetwornik ciśnienia różnicowego na kryzie pomiarowej; 11, 12 – układy standaryzujące sygnały wyjściowe z pomiarowych przetworników temperatury; 13 – komputer PC

Fig. 1. Example of technical solution of the measurement system for determination of the gas energy content based on differential pressure flow meter:  
 1 – pipeline; 2 – working medium – gas tested; 3 – measuring flange; 4 – bypass channel; 5, 6 – shutoff valves; 7 – thermo-anemometer; 8, 9 – pressure and temperature of flow gas transducers; 10 – differential pressure transducer on the measuring cone; 11, 12 – systems of conditioning output signals of temperature sensors; 13 – PC



**Rys. 2. Schemat stanowiska laboratoryjnego do pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego**

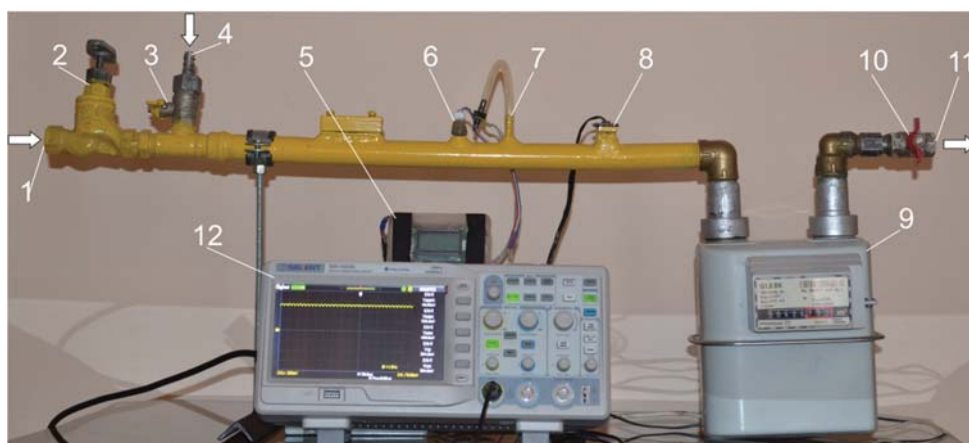
Fig. 2. Diagram of a laboratory stand for measuring the energy value of natural gas

czego 11, króciec wylotowy 13 i komputer 14. Dane o ciśnieniu  $p$  i temperaturze  $T$  gazu roboczego, spadku ciśnienia  $\Delta p$  na zwężce oraz wartości  $U$  sygnału wyjściowego z przetwornika termooanemometrycznego doprowadzane są do komputera PC.

W badaniach eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym uzyskiwano maksymalny przepływ  $2,45 \text{ m}^3/\text{h}$  przy ciśnieniu do  $2,5 \text{ kPa}$ . Ponadto konstrukcja stanowiska umożliwiała badanie wartości energetycznej różnych rodzajów gazu roboczego. Elementy 4, 6, 12 służące do ustawiania natężenia przepływu i reduktor ciśnienia 5 pozwalają podczas badań tworzyć różne wydatki gazu i różne jego ciśnienie. Badania można było przeprowadzać dla trzech rodzajów płynów roboczych, tj. gazu ziemnego, propanu-butanu i jego mieszaniny z powietrzem o zadanym składzie oraz dla strumieni tych płynów o różnej wartości energii. Źródłem gazu ziemnego może być sieć domowa, do której dołącza się stanowisko laboratoryjne przez króciec wlotowy 1. Wówczas gaz ziemny, przez zawór nastawczy 4 dopływa do sekcji pomiarowej 10, a stanowisko pracuje pod niskim ciśnieniem do  $2,5 \text{ kPa}$ .

Podczas pracy na stanowisku z gazem propan-butan, jego skroploną postać ze zbiornika 2, podaje się przez reduktor 5 regulujący ciśnienie już w stanie gazowym do przewodu sekcji pomiarowej stanowiska. Pojemnik 2 można też zastosować jako źródło sprężonego gazu ziemnego. Umożliwia to zwiększenie ciśnienia i szybkości przepływu gazu roboczego i w konsekwencji wzrasta zakres pomiarowy jego wartości energetycznej. Należy wtedy stosować termooanemometryczny przetwornik o odpowiednio dopuszczalnej wartości ciśnienia roboczego.

Możliwe jest też użycie powietrza jako gazu roboczego. Doprowadza się je z dmuchawy i można tworzyć mieszaniny z gazem ziemnym o różnych wartościach energii. Wówczas do utworzenia płynu roboczego stosuje się równocześnie dwa lub trzy spośród występujących tu źródeł gazu. Wydatki poszczególnych składników ustawia się odpowiednio stopniem otwarcia zaworów regulacyjnych 4, 5, 6. W trakcie pracy stanowiska, wzorcowym miernikiem objętości gazu roboczego był wykalibrowany indywidualnie licznik 11, zaś natężenie przepływu gazu w sekcji pomiarowej wyznaczano za pomocą miernika czasu – blok 14.



Rys. 3. Widok ogólny stanowiska laboratoryjnego do badań przydatności metody termoanemometrycznej w kontroli wartości energetycznej gazu ziemnego

Fig. 3. General view of a laboratory bench for testing the suitability of the thermo-anemometric method in controlling the natural gas energy value

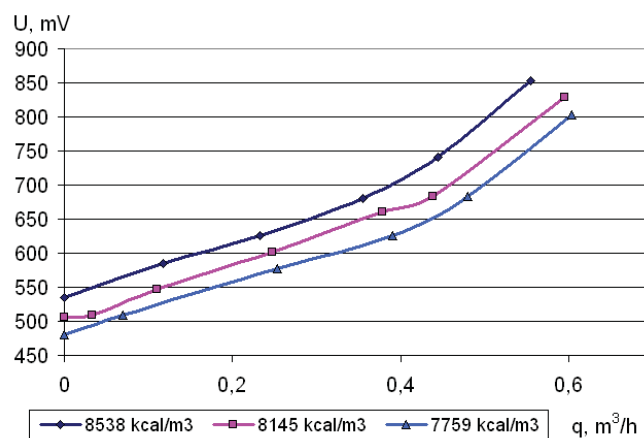
Tabela 1. Wyniki analizy chromatograficznej składu próbek gazu użytych w badaniach eksperymentalnych

Table 1. Results of chromatographic analysis of the composition of gas samples used in experiments

Fizykochemiczne składniki gazu	Wyniki analizy gazu, % objętości		
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3
metan (C <sub>1</sub> )	97,0410	96,6670	92,7140
etan (C <sub>2</sub> )	0,0980	1,7900	3,4980
propanu (C <sub>3</sub> )	0,0050	0,5510	1,4610
izo-butan (is <sub>4</sub> )	0,0010	0,0860	0,2530
n-butan (NC <sub>4</sub> )	0,0000	0,0890	0,4500
neo-pentan (neoS <sub>4</sub> )	0,0000	0,0010	0,0020
izo-pentan (i C <sub>5</sub> )	0,0010	0,0160	0,1360
n-pentan (NS <sub>5</sub> )	0,0000	0,0110	0,1160
heksan+wyższe (C <sub>6</sub> +wyższe)	0,0000	0,0110	0,1520
tlen (O <sub>2</sub> )	0,0220	0,0040	0,0060
azot (N <sub>2</sub> )	2,6820	0,6750	0,6290
ditlenek węgla (CO <sub>2</sub> )	0,1490	0,0990	0,5830
względna gęstość, kg/m <sup>3</sup>	0,5678	0,5761	0,6142
chromatograficzna gęstość kg/m <sup>3</sup>	0,6842	0,6943	0,7402
Dolne ciepło spalania (w warunkach normalnych)	7759	8145	8538
	kcal/m <sup>3</sup>		
	32,4854	34,1015	35,7469
	MJ/m <sup>3</sup>		
liczba Wobbego (wyższa) cal/m <sup>3</sup>	11433	11902	12062

Badania wymagały wstępnej kalibracji przetwornika termoanemometrycznego dla różnych cech jakościowych gazu ziemnego. Zastosowano gaz ziemny o trzech różnych wartościach opałowych. Źródłem gazu w badaniach były oddzielne zbiorniki użyte do odbioru jego próbek o składzie określonym przez analizę chromatograficzną (tabela 1).

Zbiorniki ze sprężonym gazem ziemnym o znanej wartości ciepła spalania podłączano naprzemiennie do otworu wlotowego 1 stanowiska laboratoryjnego, (rys. 3) oraz przez reduktor 2 do toru pomiarowego. W torze tym był umieszczony czujnik temperatury 6, przetwornik termoanemometryczny 8, licznik gazu 9 (gazomierz miechowy wielkości G 1,6 indywidualnie wykalibrowany). Wymagane wartości prędkości przepływu i ciśnienia strumienia medium roboczego w stanowisku laboratoryjnym zadawano nastawami zaworów 2 i 10. Wylot 11 podłączono do instalacji utylizującej użyty gaz naturalny z palnikiem gazowym na jej wyjściu. Do pomiaru temperatury doprowadzanego gazu służył miernik cyfrowy 5 z czujnikiem 6. Do pomiaru ciśnienia w torze pomiarowym zamontowano czujnik 7 tak, aby poprzedzał on pierwotny przetwornik przepływu gazu 8. Sygnał wyjściowy (napięcie) z termoanemometrycznego przetwornika mierzono za pomocą oscyloskopu cyfrowego 12. Służył on jednocześnie do kontroli stabilności tego sygnału i uśredniania za czas pomiaru.



Rys. 4. Zależność sygnału wyjściowego zestawu do pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego od natężenia przepływu przy różnym cieple spalania i nadciśnieniu 0,1 kPa

Fig. 4. Relation of the output signal of the set for the measurement of the natural gas energy value from flow rate at various heat fluxes and overpressure of 0.1 kPa



Widoczne na rys. 2 króćce 3, 4 służą do doprowadzania dodatkowego medium roboczego do instalacji laboratoryjnej.

Na rysunku 4 przedstawiono sygnał wyjściowy przetwornika termooanemometrycznego w postaci wartości napięcia  $U$ . Użytko jest dla trzech kompozycji składu gazu ziemnego, o wartości opalowej (cieple spalania) 7759 kcal/m<sup>3</sup>, 8138 kcal/m<sup>3</sup> i 8538 kcal/m<sup>3</sup>. Otrzymane wykresy (rys. 4) wykazują, że wartość energii gazu jest funkcją dwu jego parametrów (przepływu objętościowego lub masowego i ciepła spalania). Jest to zależność nieliniowa.

Wyniki badań eksperymentalnych i analiza metrologiczna potwierdzają możliwość budowy układu pomiarowego z przetwornikiem termooanemometrycznym do bezpośredniego zliczania wartości energetycznej przepływającego gazu ziemnego.

## 4. Analiza dokładności metody

Podstawę budowy metrologicznego modelu pomiarów stanowi zależność (1). Przyjmuje się też, że wg przybliżenia [14, 18], wartość opalowa gazu ziemnego  $H_S$ , w warunkach standardowych i przy zastosowaniu przetwornika termooanemometrycznego, jest związana z jego współczynnikiem wymiany ciepła następującą funkcją liniową

$$H_S = 145205 \cdot \alpha_S - 141,732 \cdot 10^6 \text{ [J/m}^3\text{]}, \quad (2)$$

gdzie:  $\alpha_S$  – współczynnik przenikania ciepła przetwornika *hot-wire* w warunkach standardowych gazu o parametrach  $T_S = 293,15$  K,  $p_S = 101\,325$  Pa, w W/(m<sup>2</sup> · K).

Zależność współczynnika  $\alpha_S$  od dolnej wartości opalowej dla różnych wariantów kompozycji składu gazu ma błąd aproksymacji  $\pm 0,24\%$  [20]. Wartości współczynnika  $\alpha$  anemometru w warunkach roboczych można wyznaczyć metodą pośrednią. Oblicza się go ze wzoru (3)

$$\alpha = \frac{I_W^2 R_W}{\pi d_W l_W \left( \frac{R_W + (4r l_W / \pi d_W^2) \cdot (k T_S - 1)}{4k r l_W / \pi d_W^2} - T \right)} \quad (3)$$

gdzie:  $I_W$  – prąd przepływający przez drut przetwornika;  $R_W$  – rezystancja elektryczna przetwornika *hot-wire*;  $l_W$ ,  $d_W$  – długość i średnica gorącego drutu przetwornika;  $k$  – współczynnik temperaturowy  $R_W$ ;  $T$ ,  $T_S$  – temperatury gazu w warunkach roboczych i standardowych.

Związek współczynnika wymiany ciepła  $\alpha_S$  w warunkach standardowych, z współczynnikiem  $\alpha$  w warunkach pracy opisyje się wyrażeniem  $K\alpha_S$  [21]. Bierze ono pod uwagę zmianę przekazywania ciepła przez przetwornik warunkach roboczych w zależności od ciśnienia, temperatury i prędkości przepływu gazu.

Drugim parametrem wykorzystywanym do określenia wartości energii gazu ziemnego jest natężenie przepływu gazu  $q_S$  w rurociągu. Przy użyciu gazomierza oblicza się je ze wzoru:

$$q_S = \frac{V}{\tau} K q_S \quad (4)$$

gdzie:  $q_S$  – objętościowe natężenie przepływu gazu w warunkach normalnych;  $V$  – objętość gazu, która przepłynęła w czasie  $\tau$ , mierzona przez gazomierz;  $K q_S$  – współczynnik przeliczenia wartości strumienia gazu z warunków roboczych do standardowych.

Przy określeniu wartości energii gazu  $e$  na podstawie algorytmu (1) zwykle nie dysponuje się zbiorami wartości pomiarów wielokrotnie powtarzanych w różnych warunkach. Nie ma więc możliwości obliczenia oceny statystycznej dla przetwarzania wyników wielu pomiarów rzeczowych. Można natomiast dokonać heurystycznej analizy składowych niepewności typu B w oparciu o wiedzę już posiadaną oraz zdobytą doświadczalnie na stanowisku badawczym. Między przypadkowymi zmianami wartości parametrów  $q_S$  i  $H_S$  nie występuje korelacja i dla standardowej niepewności  $u_B(e)$  otrzyma się następującą zależność:

$$u_B(e) = \sqrt{\left( \frac{\partial e}{\partial q_S} u_B(q_S) \right)^2 + \left( \frac{\partial e}{\partial H_S} u_B(H_S) \right)^2} \quad (5)$$

w której:  $\frac{\partial e}{\partial q_S}$  i  $\frac{\partial e}{\partial H_S}$  – współczynniki wpływu niepewności parametrów  $q_S$  i  $H_S$ .

Niepewność standardową  $u_B(H_S)$  oblicza się ze wzoru:

$$u_B(H_S) = \sqrt{u'_B(H_S)^2 + \left( \frac{\partial H_S}{\partial \alpha} \cdot u_B(\alpha) \right)^2 + u_B(K\alpha_S)^2} \quad (6)$$

gdzie:  $\frac{\partial H_S}{\partial \alpha}$  – współczynnik wagi dla składowej niepewności

$u_B(\alpha)$ ;  $u'_B(H_S) = 48\,530,95$  J/m – standardowa niepewność aproksymacji funkcją (2) ciepła spalania gazu ziemnego [21];

$\frac{\partial H_S}{\partial \alpha} \cdot u_B(\alpha)$  – standardowa niepewność wyznaczenia współ-

czynnika przenikania ciepła czujnika termo-anemometrycznego *hot-wire*;  $u_B(K\alpha_S) = 2,828$  – standardowa niepewność przeliczenia współczynnika  $\alpha$  do warunków standardowych wymiany ciepła [21].

Przy wyznaczaniu współczynnika  $\alpha$  w oparciu o algorytm (3) i braku korelacji między przypadkowymi zmianami wartości poszczególnych parametrów, z zasady propagacji wariancji otrzymuje się następujące wyrażenie dla niepewności  $u_B(\alpha)$ :

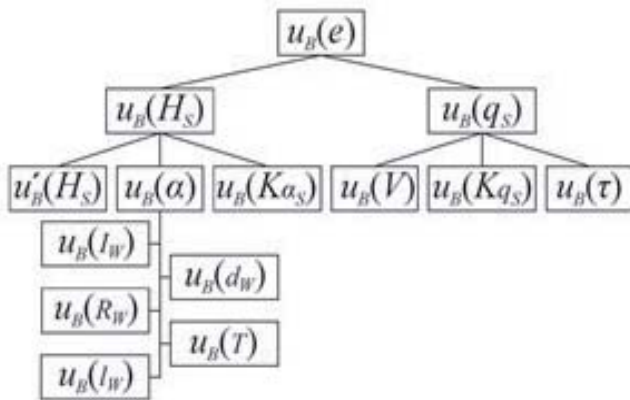
$$u_B(\alpha) = \sqrt{\left( \frac{\partial \alpha}{\partial I_W} u_B(I_W) \right)^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial R_W} u_B(R_W) \right)^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial d_W} u_B(d_W) \right)^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial l_W} u_B(l_W) \right)^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial T} u_B(T) \right)^2} \quad (7)$$

gdzie:  $\frac{\partial \alpha}{\partial I_W}$ ,  $\frac{\partial \alpha}{\partial R_W}$ ,  $\frac{\partial \alpha}{\partial d_W}$ ,  $\frac{\partial \alpha}{\partial l_W}$ ,  $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$  – współczynniki wagi

wplywu parametrów  $I_W$ ,  $R_W$ ,  $d_W$ ,  $l_W$ ,  $T$ ;  $u_B(I_W)$ ,  $u_B(R_W)$ ,  $u_B(d_W)$ ,  $u_B(l_W)$ ,  $u_B(T)$  – odpowiednio ich niepewności standardowe.

We wzorze (7) nie występują niepewności standardowe  $u_B(r)$ ,  $u_B(k)$ ,  $u_B(T_C)$  i  $u_B(\pi)$ , gdyż można założyć, że rezystywność elektryczna  $r$  materiału drutu (platyna), współczynnik temperaturowy  $k$  tej rezystancji i temperatura  $T$  warunków standardowych mają stałe wartości, tj.:  $r = 11 \cdot 10^{-8}$   $\Omega \cdot m$ ,  $k = 3,9 \cdot 10^{-3}$  K<sup>-1</sup>,  $T_C = 293,15$  K, podawane w podręcznej literaturze technicznej.

Szczegółowy model metrologiczny, przyjęty w tej pracy do oszacowania niepewności typu B dla pomiarów wartości energetycznej gazu ziemnego rozpatrywaną metodą z przetwornikiem termoanemometrycznym typu *hot-wire* przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Model składowych niepewności w pomiarach wartości energii gazu ziemnego  
Fig. 5. Model of uncertainty components in measurement of the natural gas energy

Praca ta jest pierwszym wstępnym etapem rozpoznania metrologicznych możliwości metody pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego z wykorzystaniem termoanemometrycznych przetworników typu *hot-wire*. Ocenę wartości liczbowych niepewności standardowej tej metody dokona się na przykładzie.

Aby wyznaczyć standardową niepewność  $u_B(\alpha)$  należy najpierw oszacować ilościowo wszystkie składniki niepewności ze wzoru (7), które mogą wystąpić w praktyce. Dla przykładu przyjęto następujące nominalne wartości parametrów oraz temperaturę pracy przetwornika i gazu, np.:  $I_w = 0,2$  A,  $R_w = 1,8195$   $\Omega$ ,  $d_w = 30 \cdot 10^{-6}$  m,  $l_w = 0,01$  m,  $T = 303,15$  K.

Niepewność pomiaru prądu elektrycznego  $I_w$ , temperatury  $T$  gazu, oporu elektrycznego  $R_w$ , średnicy  $d_w$  i długości drutu  $l_w$  określa się na podstawie danych metrologicznych użytego oprzyrządowania. W eksperymentalnym stanowisku (rys. 3) prąd mierzono amperomierzem o błędzie granicznym (klasie)  $\delta(I_w) = \pm 0,5\%$ , rezystancję elektryczną – omomierzem o błędzie granicznym  $\delta(R_w) = \pm 0,5\%$ . Średnicę drutu oblicza się na podstawie pomiaru mostkiem jego rezystancji z bezwzględnym błędem granicznym  $\Delta(d_w) = \pm 1 \cdot 10^{-8}$  m. Aktywną długość drutu czujnika termo-anemometrycznego mierzono mikroskopem z błędem  $\Delta(l_w) = \pm 1 \cdot 10^{-5}$  m, a temperaturę gazu – termometrem z błędem  $\Delta(T) = \pm 0,15$  K.

Oceny standardowych niepewności  $u_B(I_w)$ ,  $u_B(R_w)$ ,  $u_B(T)$  dla pomiarów prądu  $I$ , rezystancji  $R_w$  i temperatury gazu  $T$  wyznacza się z wartości błędów granicznych (klasy) przyrządów i założeniu równomiernego rozkładu błędów (lub z niepewności rozszerzonych i rozkładu normalnego).

Standardowe niepewności typu B  $u_B(d_w)$  i  $u_B(l_w)$  dla średnicy  $d_w$  i długości drutu  $l_w$  szacuje się przy założeniu trójkątnego rozkładu wyników, który występuje zwykle w pomiarach wymiarów liniowych obiektów cylindrycznych.

Ilościowe określenie współczynników wpływu wielkości występujących we wzorze (7) na niepewność parametru badanego  $\alpha$  otrzymano przy użyciu pakietu standardowego oprogramowania Mathcad do obliczania pochodnych cząstkowych. Ze względu na dość skomplikowane postacie nie podano w tabeli 2 zależności matematycznych, a tylko ich oceny ilościowe dla powyżej założonych warunków pracy przy pomiarze wartości

energetycznej gazu. W tabeli 2 dla rozpatrywanego przykładu podano postacie wzorów użytych do obliczania i otrzymane wartości ocen składowych niepewności standardowej  $u_B(\alpha)$  oraz ich współczynniki.

Dla przyjętych tu danych współczynnik przenikania ciepła  $\alpha = 2312,9592$  W/(m<sup>2</sup>·K). Po podstawieniu wartości składowych jego niepewności do wzoru (7), uzyskano standardową niepewność  $u_B(\alpha) = 6,809$  W/(m<sup>2</sup>·K) i z wzoru (6) niepewność standardową  $u_B(H_S) = 9,899 \cdot 10^5$  J/m<sup>3</sup>.

Tabela 2. Składowe i współczynniki wagi dla standardowej niepewności współczynnika wymiany ciepła  $\alpha$  anemometru użytego w pomiarach energii gazu ziemnego

Table 2. Components and their weight coefficients of the standard uncertainty of the heat transfer coefficient  $\alpha$  for an anemometer used in the measurement of natural gas energy

Parametr	Wzór	Wartość
$u_B(I_w)$	$\frac{I_w \delta(I_w)}{100 \cdot \sqrt{3}}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$ A
$u_B(R_w)$	$\frac{R_w \delta(R_w)}{100 \cdot \sqrt{3}}$	0,003 $\Omega$
$u_B(T)$	$\frac{\Delta(T)}{\sqrt{3}}$	0,05 K
$u_B(d_w)$	$\frac{\Delta(d_w)}{\sqrt{6}}$	$4,08 \cdot 10^{-7}$ m
$u_B(l_w)$	$\frac{\Delta(l_w)}{\sqrt{6}}$	$4,08 \cdot 10^{-6}$ m
$u_B(V)$	$\frac{\delta_v \cdot V}{100 \cdot \sqrt{3}}$	$9,584 \cdot 10^{-5}$ m <sup>3</sup>
$u_B(\tau)$	$\frac{\Delta(\tau)}{\sqrt{3}}$	0,058 s
$\partial \alpha / \partial I_w$	*	23 129,0 W/(m <sup>2</sup> KA)
$\partial \alpha / \partial R_w$	*	-10 143,0 W/(m <sup>2</sup> K $\Omega$ )
$\partial \alpha / \partial d_w$	*	-1,462 $\cdot 10^9$ W/(m <sup>3</sup> K)
$\partial \alpha / \partial l_w$	*	1,462 $\cdot 10^6$ W/(m <sup>3</sup> K)
$\partial \alpha / \partial T$	*	69,278 W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )

\* Wzorów o dużym rozmiarze tu nie podawano. Pochodne cząstkowe obliczono za pomocą programu Mathcad.

Po zróżniczkowaniu wyrażenia (4) otrzyma się wzór dla niepewności standardowej objętościowego przepływu gazu:

$$u_B(q_S) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_S}{\partial V} u_B(V)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_S}{\partial K q_S} u_B(K q_S)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_S}{\partial \tau} u_B(\tau)\right)^2} \tag{8}$$

gdzie:  $\frac{\partial q_S}{\partial V}$ ,  $\frac{\partial q_S}{\partial Kq_S}$ ,  $\frac{\partial q_S}{\partial \tau}$  – parametry wpływu niepewności standardowych  $u_B(V)$ ,  $u_B(Kq_S)$ ,  $u_B(\tau)$  parametrów  $V$ ,  $Kq_S$ ,  $\tau$  na niepewność  $u_B(q_S)$  przepływu  $q_S$ .

Niepewność standardową pomiaru gazomierzem objętości gazu oblicza się ze wzoru:

$$u_B(V) = \frac{\delta_V \cdot V}{100 \cdot \sqrt{3}} \quad (9)$$

gdzie:  $V$  – zmierzona objętość gazu;  $\delta_V$  – dopuszczalny względny błąd pomiarowy gazomierza w warunkach pracy.

Zastosowany na stanowisku laboratoryjnym gazomierz miechowy miał błąd  $\delta_V = \pm 2\%$ . Niepewność objętości gazu zadawanej w badaniach  $V = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ,  $u_B(V) = 9,584 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ .

Dokładność użytego cyfrowego chronometru wynosiła  $\Delta(\tau) = \pm 0,1 \text{ s}$ . Stąd wartość standardowej niepewności pomiaru czasu  $u_B(\tau)$ :

$$u_B(\tau) = \frac{\Delta(\tau)}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ s} \quad (10)$$

Niepewność standardowa przeliczenia współczynnika  $Kq_S$  przepływu gazu do warunków standardowych wynosi  $u_B(Kq_S) = 3,5 \cdot 10^{-3}$  [18]. W stosunku do jej wartości maksymalnej (zbliżonej do jedności), wynosi to 0,35%. Dla obliczonych wartości liczbowych niepewności składowych ze wzoru (8) otrzymano niepewność standardową natężenia przepływu  $u_B(q_S) = 1,903 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Po podstawieniu obliczonych ocen niepewności standardowych  $u_B(q_S)$  i  $u_B(H_S)$  do (5), oraz uwzględniając, że

$$\frac{\partial e}{\partial q} = H, \quad \frac{\partial e}{\partial H} = q,$$

uzyskano niepewność standardową wartości energetycznej gazu ziemnego  $u_B(e) = 173,58 \text{ J/h}$ . Dla przyjętych w przykładzie średnich wartości parametrów  $\bar{q} = 1,627 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{H} = 34,08 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ , z wzoru (1) otrzymuje się wartość energetyczną gazu  $\bar{e} = 5,543 \cdot 10^3 \text{ J/h}$ .

Względna standardowa niepewność pomiaru energii wynosi

$$\delta U_E = \frac{u_B(e)}{\bar{e}} \cdot 100 = 3,13\%. \text{ Względna niepewność rozszerzona } k_p \delta U_E \text{ będzie zależeć od współczynnika rozszerzenia } k_p$$

dla wypadkowego rozkładu błędów. Dla prawdopodobieństwa  $P=0,95$  i rozkładu normalnego współczynnik rozszerzenia wynosi 2.

Oszacowania standardowych niepewności parametrów i niepewności pomiaru energii gazu ziemnego dla przykładowo przyjętych danych zestawiono w tabeli 3.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono zasady budowy i funkcjonowanie stanowiska laboratoryjnego do badań eksperymentalnych dokładności

**Tabela 3. Wartości parametrów i ich niepewności standardowe dla przykładowych danych układu do zliczania energii przepływającego gazu**

Table 3. Parameter values and their standard uncertainties for given as example data of the system to counting the energy of flowing gas

Parametr	Wzór	Wartość
$\alpha$	(3)	2312,96 W/(m <sup>2</sup> ·K)
$u_B(\alpha)$	(7)	6,81 W/(m <sup>2</sup> ·K)
$\bar{H}$	(2)	34,08 · 10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup>
$u_B(H_S)$	(6)	9,9 · 10 <sup>5</sup> J/m <sup>3</sup>
$\bar{q}$	(4)	1,627 · 10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /h
$u_B(q_S)$	(8)	1,9 · 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s
$\bar{e}$	(1)	5,543 · 10 <sup>3</sup> J/h
$u_B(e)$	(5)	173,6 J/h
$\delta U_E$	$\frac{u_B(e)}{\bar{e}} \cdot 100$	3,13 %

metody termooanemometrycznej *hot-wire* przy jej zastosowaniu w pomiarach energii gazu ziemnego. Rezultatem wykonanych badań są charakterystyki kalibracyjne układu pomiarowego do realizacji pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego przy użyciu tej metody (rys 4). Przedstawiają one zależność sygnału wyjściowego układu przetwornika *hot-wire* od zmian wartości energetycznej gazu ziemnego o trzech wartościach opałowych w zakresie (7759–8538) kcal/m<sup>3</sup> i przepływach objętościowych do 0,6 m<sup>3</sup>/h.

W szczególności zrealizowano podane poniżej zadania.

- Określono zasadę funkcjonowania i specyfikę stanowiska laboratoryjnego do badań termooanemometrycznej metody pomiaru wartości energetycznej przepływającego gazu.
- Na podstawie wyników badań uzyskano parametry do kalibracji przyrządu wykorzystującego metodę termooanemometryczną do pomiaru i zliczania wartości energetycznej gazu ziemnego.
- Ustalono eksperymentalnie zależność wyjściowego sygnału przetwornika od wartości energetycznej gazu naturalnego dla zakresu wartości opałowej (7759–8538) kcal/m<sup>3</sup> i natężeń przepływu do 0,6 m<sup>3</sup>/h.
- Zaproponowano nowe rozwiązanie urządzenia do realizacji monitorowania wartości energetycznej gazu ziemnego metodą termooanemometryczną z wykorzystaniem przetwornika przepływu gazu z czujnikami różnicy ciśnienia.
- Przeprowadzono szczegółową analizę metrologiczną wartości składowych niepewności typu B modelowanego na stanowisku układu pomiarowego do bezpośredniego pomiaru energii gazu ziemnego i otrzymano względną niepewność standardową 3,13%.

Badania doświadczalne, analiza metrologiczna uzyskanych wyników i symulacje [19, 20] potwierdzają poprawność wstępnych założeń teoretycznych [14] o możliwości zastosowania proponowanego rozwiązania przetwornika termooanemometrycznego

w pomiarach dostarczanej energii gazu ziemnego. Przy wykorzystaniu przetworników *hot-wire* rysuje się możliwość realizacji prostych przyrządów do bezpośredniego monitorowania wartości energetycznej gazu ziemnego. Zastosowanie w praktyce tej koncepcji wymaga jeszcze dalszych badań różnych rozwiązań konstrukcyjnych i doskonalenia układu pomiarowego.

Trudno obecnie przewidzieć, czy przetworniki oparte na metodzie termoanemometrycznej będą mogły zastąpić któryś z dotychczasowych rodzajów aparatury stosowanej do pomiarów ciepła spalania gazu jako podstawy rozliczeń energii dostarczonego gazu. Jednakże mogą je uzupełnić, np. gdy technologia u odbiorcy przemysłowego wymaga monitorowania i szybkiej sygnalizacji zmian wartości tego ciepła w dostarczonym gazie.

W pracy badano oryginalną metodę polegającą na wyznaczeniu zmian wartości niedostępnego w danych warunkach lub trudno mierzalnego parametru mieszaniny (ciepło spalania gazu ziemnego) na podstawie pomiaru łatwiej mierzalnego jej parametru (przewodności cieplnej). Parametry te nie są powiązane ze sobą bezpośrednią zależnością przy czynowo-skutkową, ale znane są ich zależności od składu mieszaniny. Metoda taka jest w pełni wiarygodna tylko dla badania parametrów różnych mieszanin dwuskładnikowych. Możliwość jej zastosowania i niepewność pomiaru przy większej liczbie składników wymaga modelowania i badań statystycznych.

Omówione w tej pracy badania i modelowanie zmian parametrów gazu ziemnego przy dopuszczalnych zmianach jego składu [20] powinny zainteresować nie tylko osoby zajmujące się pomiarami gazów palnych, ale i innych czytelników.

## Bibliografia

1. DSTU ISO 15112:2009 Norma ukraińska: Pryrodny haz. Vyznachennya enerhiyi: [ważna od 2011-01-01].
2. ISO 15112:2007 Natural Gas – Energy determination.
3. EN 1776:2015 Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements.
4. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 28. 06. 2013 r. w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie paliwami gazowymi.
5. Boguta A.: *Application of the LabVIEW environment in testing automotive thermoanemometric flow meters. Econtechmod*. An international quarterly journal. 2017, vol. 06, no. 1, 123–131.
6. Cebula A., *Experimental and numerical investigation of thermal flow meter*. “Archives of thermodynamics”, Vol. 36, Iss. 3, 2015, 149–160, DOI: 10.1515/aoter-2015-0027.
7. Khamshah N. Abdalla A.N., et all, *Temperature compensation of hot wire mass air flow sensor by using fuzzy temperature compensation scheme*. “Scientific Research and Essays”. Vol. 8(4), 2013, 178–188, DOI: 10.5897/SRE11.2211.
8. Khamshah N. Abdalla A.N., et all, *Issues and temperature compensation techniques for hot wire thermal flow sensor: A review*. “International Journal of the Physical Sciences”, Vol. 6(14), 2011, 3270–3278, DOI: 10.5897/IJPS11.630.
9. Khamshah N., Abdalla A.N., Badaruddin M., *Temperature compensation of a thermal flow sensor by using temperature compensation network*. Proceedings of National Conference on Postgraduate Research (NCON-PGR) 2009, 1st Oct. 2009, Malaysia, 10–17.
10. Rupnik K., Kutin J., Bajsić I., *A method for gas identification in thermal dispersion mass flow meters*. “Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering”, Vol. 60, No. 9, 2014, 607–616, DOI: 10.5545/sv-jme.2014.1889.
11. Rosłonek G., *Uwarunkowania wdrożenia rozliczeń paliw gazowych w jednostkach energii w krajowym systemie gazowniczym*. Konferencja FORGAZ 2014: Techniki i technologie dla gazownictwa – pomiary, badania, eksploatacja, „Prace naukowe Instytutu Nafty i Gazu”, Nr 194, 2014, 139–143.
12. Rosłonek G., *Kierunki rozwoju standardów technicznych IGG w obszarze analityki paliw gazowych metodą chromatografii gazowej*, „Nafta-Gaz”, R. 72, Nr 6, 2016, 431–435, DOI: 10.18668/NG.2016.06.06.
13. Chekhovskiy S., Serediuk O., Romaniv V., Malisevych V., *Calculation of natural gas adjusted for its energy parameters*. Konferencja FORGAZ 2014: Techniki i technologie dla gazownictwa – pomiary, badania, eksploatacja, „Prace naukowe Instytutu Nafty i Gazu”, Nr 194, 2014, 191–200.
14. Serediuk O.E., Malisevych V.V., *Theoretical basis of using of head flowmeter to determine the energy value of natural gas*. “Metrolohiya ta pryklady”. No. 5, 2014, 38–47 (in Ukrainian: *Teoretychni zasady zastosovannya napirnoho vytratomira dlya vyznachennya enerhetychnoyi tsinnosti pryrodnoho hazu*).
15. Serediuk O.E., Malisevych V.V., *Partial flowmeter* (in Ukrainian: *Partsiial'nyy vytratomir*). Patent 99887 C2 Ukraine, IPC (2012.01) G 01 F 1/00 No. a201114278; declared 02.12.11; published 10.10.12, Bulletin No. 19.
16. D6F-V03A1 MEMS Flow Rate Sensor. www.omron.com.
17. Malisevych V.V., Serediuk O.E., Serediuk D.O., *Metrological model of a pressure flow meter in controlling the energy value of natural gas*. “Ukrayins'kyy metrolohichnyy zhurnal”, No. 1, 2015, 58–63 (in Ukrainian: *Metrolohichna model' napirnoho vytratomira pry kontroli enerhetychnoyi tsinnosti pryrodnoho hazu*).
18. Serediuk O.E., Malisevych V.V., Serediuk D.O., Malisevych N.M., *The metrological model of measuring of natural gas energy with the using of the variable pressure-drop flow meters*. “Systemy obrobky informatsiyi”, No. 6(143), 2016, 139–142, (in Russian: *Metrologicheskaya model' izmereniya energeticheskoy tsennosti prirodnogo gaza s ispol'zovaniyem raskhodomerov peremennogo perepada davleniya*).
19. Serediuk O., Malisevych V.V., Warsza Z.L., *Metrological parameters of the natural gas flow rate standard based on the variable pressure drop flowmeter*. (Conference no ID 228), Proceedings of a meeting held 11–13 September 2013, Cracow, Poland. Measurement and Quality Control. IMEKO TC14 Int. Symposium. 11th 2013. (ISMQC 2013), Currant Associates, Inc (Aug. 2014) USA 251–254, ISBN: 9781632668172.
20. Seredyuk O., Malisevych V., Warsza Z.L., *Symulacja związku właściwości cieplnych i energii gazu ziemnego w pomiarach jego przepływu*. „Przemysł Chemiczny”, T. 96, Nr 10, 2017, 2065–2069, DOI: 10.15199/62.2017.10.6.
21. Serediuk O., Malisevych V., Warsza Z.L., *Metoda termoanemometryczna pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego*. „Przemysł Chemiczny”, T. 96, Nr 11, 2017, 2243–2246. DOI: 10.15199/62.2017.11.5.



# Study of metrological properties of thermo-anemometric method of natural gas energy measurement

**Abstract:** The thermo-anemometric method of direct measurement of the energy value of the flowing natural gas is presented. It is based on two transducers: thermo-anemometric (hot-wire) and differential pressure. The design and operation of the laboratory stand for testing this method has been described. Based on the experimental results, the calibration characteristics of the thermo-anemometric transducer and the dependence of its output on the calorific value of the natural gas for the range of (7759–8538) kcal/m<sup>3</sup> and flows to 0.6 m<sup>3</sup>/h were determined. An analysis of uncertainty components of B-type measurements was carried out using this method and its standard uncertainty was assessed. This is an example of an indirect method for examining changes of the tested parameter dependent on the composition of the gas if its direct measurements are difficult or impossible to perform. Instead, another parameter is measured, which depends in a known manner on the composition of the gas as a mixture. Such method can find many other different applications.

**Keywords:** natural gas, energy value, combustion heat (calorific value), gas energy measurement, thermo-anemometer, calibration characteristics, measurement uncertainty

prof. dr nauk techn. inż.

Orest E. Serediuk

O\_Serediuk@ukr.net

Uzyskał stopień kandydata nauk technicznych w 1990 r. i doktora nauk technicznych (habilitacja) w 2009 r. Profesor katedry „Metody i narzędzia kontroli jakości i certyfikacji produktów” w Ivano-Frankivskim Narodowym Uniwersytecie Technicznym Nafty i Gazu (IFNTUNG), Ukraina. Pełni obecnie funkcję dziekana wydziału. Tematyka naukowa: opracowanie i badania urządzeń kalibracyjnych do pomiaru przepływu i objętości powietrza i gazu ziemnego oraz metrologicznych właściwości przepływomierzy i liczników gazu ziemnego. Autor ponad 200 publikacji naukowych, w tym 30 patentów i 2 przewodników.



kandydat nauk techn.  
inż. Vitalij V. Malisevich

feivt@nung.edu.ua

W 2008 r. ukończył studia w Ivano-Frankivskim Technicznym Uniwersytecie Nafty i Gazu (IFNTUNG) jako dyplomowany inżynier fizyk o specjalności „Przyrządy i systemy badań niszczących”. Po aspiranturze na tej uczelni uzyskał w 2013 r. stopień kandydata nauk technicznych.

Kierunek badań naukowych: przyrządy do kontroli i diagnostyki stanu technicznego liczników i mierników przepływu gazu, badania metrologiczne gazomierzy. Autor 19 publikacji naukowo-technicznych.



doc. dr inż. Zygmunt Lech Warsza

zlw1936@gmail.com

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej 1959, doktorat 1967, docent od 1970. Praca: Instytut Elektrotechniki 1958–1963 i 1994–1995, Politechnika Warszawska 1960–70, Politechnika Świętokrzyska 1970–1978 (organizator i dziekan Wydziału Transportu w Radomiu), Organizator i kierownik: Ośrodka Aparatury Pomiarowej w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej 1978–1982 oraz Zakładu Automatyki i Pomiarów w Instytucie Chemii Przemysłowej 1983–1992. Doradca Ministra Edukacji Narodowej 1992–1995, Politechnika Radomska 1983–2002. Obecnie główny specjalista w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Autor ponad 250 publikacji, 6 monografii, kilkudziesięciu prac badawczych i konstrukcyjnych, 11 patentów oraz promotor 2 doktorów. Prezes Polskiego Towarzystwa Metrologicznego. Członek stowarzyszenia PolSPAR oraz Akademii Metrologii Ukrainy.

