

Orest SEREDYUK¹, Lydia VITVITSKIY¹, Anna VINNICHUK¹, Zygmunt WARSZA²¹ IWANO-FRANKOWSKI NARODOWY TECHNICZNY UNIWERSYTET NAFTY I GAZU, Ukraina² PRZEMYSŁOWY INSTYTUT AUTOMATYKI I POMIARÓW PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa**Budowa, analiza i ocena niepewności pomiarów zestawu kalibracyjnego do sprawdzania gazomierzy u użytkownika****Prof. dr inż. Orest E. SEREDYUK**

Uzyskał stopień kandydata nauk technicznych w 1990 r. i doktora nauk technicznych (habilitacja) w 2009 roku. Jest profesorem w katedrze Metod i Przyrządów Kontroli Jakości i Certyfikacji Produktów Iwano-Frankowskiego Narodowego Uniwersytetu Technicznego Nafty i Gazu (IFNTUNG), Ukraina. Tematyka naukowa: opracowanie i badania urzędów kalibracyjnych do pomiaru przepływu i objętości powietrza i gazu ziemnego oraz metrologiczne właściwości liczników i przepływomierzy gazu ziemnego.

e-mail: feivr@nimg.edu.ua

**Mgr inż. Anna VINNICHUK**

W 2004 r. ukończyła studia magisterskie w Iwano-Frankowskim Narodowym Uniwersytecie Technicznym Nafty i Gazu (IFNTUNG) (Ukraina), o specjalności Metrologia i technika pomiarowa. Aspirantka w katedrze "Metody i przyrządy kontroli jakości i certyfikacji produktów". Zainteresowania badawcze: rozwój wyposażenia do kalibracji i badania właściwości metrologicznych gazomierzy. Autorka ponad 20 publikacji.

e-mail: annavyn@ukr.net

**Doc. dr inż. Lydia A. VITVITSKIY**

Uzyskała stopień kandydata nauk technicznych w 1996 r. Pracuje na stanowisku docenta w katedrze "Metody i przyrządy kontroli jakości i certyfikacji produktów" Iwano-Frankowskiego Narodowego Uniwersytetu Technicznego Nafty i Gazu (IFNTUNG) (Ukraina). Tematyka naukowa: badania w zakresie metrologii przepływu cieczy i gazów. Autorka ponad 60 publikacji naukowych, w tym 10 patentów.

e-mail: L.Vytvitska@gmail.com

**Doc. dr inż. Zygmunt Lech WARSZA**

Ukończył Miernictwo Elektryczne w PW (1959), doktorat 1967, docentura 1970. Pracował w Instytucie Elektrotechniki (1958-63, 1994-95) i w Katedrze Miernictwa El. PW. (1960-70). Zorganizował: Wydział Transportu Politechniki Świętokrzyskiej w Radomiu (dziekan 1970-76). Pracował w Ośrodku Aparatury Pomiarowej IMGW (1978-81) i Zakładzie Techniki Pomiarowej i Automatyzacji w Instytucie Chemii Przemysłowej (1983-91). Do 2002 r. wykładał metrologię i diagnostykę techniczną w Pol. Radomskiej. Obecnie pracuje w PIAP.

e-mail: zlw@op.pl

**Streszczenie**

Uzasadniono potrzebę sprawdzania parametrów metrologicznych gazomierzy u odbiorcy bez konieczności ich demontażu i ze stosowaniem gazu ziemnego jako medium roboczego. Omówiono budowę stanowisk do pomiaru przepływu i objętości gazu stosowanych do sprawdzania gazomierzy oraz zaproponowano oryginalną koncepcję rozwiązania przenośnego zestawu kalibracyjnego (kalibratora) z zastosowaniem jako czujników przepływu wywzorcowanych dysz pomiarowych montowanych w instalacji odbiorczej za gazomierzem podłączonym do sieci zasilającej. Opracowano model matematyczny układu pracy kalibratora i oszacowano jego standardową i rozszerzoną niepewność pomiarów. Sformułowano wnioski i podano literaturę. Metoda i oryginalne rozwiązanie tego urządzenia zostało opatentowane w Ukrainie. Powinno ono zainteresować specjalistów i użytkowników gazu z innych krajów, w tym też z Polski.

Słowa kluczowe: gazomierz, przenośny kalibrator, niepewność pomiaru.

Design, theory and accuracy of the calibration device of domestic gas meters "in situ"
Abstract

In Introduction the need to develop a method and device to control the metrological parameters of household gas meters at their place of operation without dismantling and with using natural gas as a working medium is shortly described. On the analysis base some methods for measurement of the flow and flow volume used to calibration of gas meters of natural gas used in Ukraine and other countries are described, as well as the proposed construction is shown. As reference sensors of flow are used the calibrated nozzles which are mounted in series with the installation of the recipient household gas meter attached to the gas network. Mathematical model of this device has been formulated, and after detailed analysis its standard and extended uncertainty was evaluated. Conclusions and literature is also included. Above calibration method and device was patented in Ukraine and should be of interest for gas specialists in Poland and in other countries.

Keywords: gas meter, mobile calibrator, measurement uncertainty.

1. Wstęp

Ograniczone zasoby i wzrastające ceny gazu ziemnego powodują, że oszczędne gospodarowanie jego zużyciem staje się naczyniem chwili ważnym i wspólnym dla większości krajów. Polska i Ukraina większość gazu ziemnego kupują za granicą. Wiąże się to z zapewnieniem odpowiednio dokładnych i wiarygodnych pomiarów jego zużycia nie tylko w przemyśle, ale i w sferze bytowo-komunalnej. Gazomierz, podobnie jak liczniki zużycia innych mediów, np. energii elektrycznej i wody, wykalibrowane przez producenta, przed ich zamontowaniem u odbiorcy legalizuje się na stacjonarnym stanowisku kalibracyjnym w upoważnionym laboratorium. Pomiar wykonuje się dla przepływu powietrza jako medium roboczego. Kolejną kalibrację przeprowadza się dopiero po długoletnim okresie eksploatacji określonym w obowiązujących w danym kraju przepisach. Sprawdzanie poprawności działania gazomierzy w okresie pomiędzy kalibracjami i w miejscu ich eksploatacji (*in situ*) nie jest obligatoryjne. Przeprowadza się je tylko wtedy, gdy dostawca lub odbiorca podejrzewa nieprawidłowość działania (np. zatrzymanie się wskazań lub odczyty odbiegające znacznie od przeciętnych), ze względu na koszty takiej procedury, obejmującej sprawdzenie, dwukrotny dojazd obsługi i czynności montażowe. Tak więc nawet w długim okresie czasu niektóre gazomierze mogą mierzyć nieprawidłowo.

Parametry metrologiczne gazomierzy dla gazu ziemnego różnią się od otrzymywanych przy sprawdzaniu przepływem powietrza [F1, F2]. Potwierdzają to też przeprowadzone w Polsce badania gazomierzy miechowych [F3]. Sprawdzanie ich wskazań dla przepływu gazu naturalnego jako mierzonego medium, czyli w warunkach rzeczywistych byłoby bardziej właściwe niż wprowadzanie poprawek o szacowanych wartościach. Do sprawdzania gazomierzy bezpośrednio u odbiorców i bez ich demontażu niezbędne jest specjalne urządzenie zwane dalej kalibratorem. Urządzenia takie nie są jednak obligatoryjnie używane w praktyce. Wynika to z bardziej zaawansowanych wymagań przy ich obsłudze i z braku odpowiednich przepisów prawnych do ich stosowania w eksploatacji. Przepisy ukraińskie (i polskie też) obejmują jedynie pomiary na stacjonarnym stanowisku do sprawdzania

i kalibracji gazomierzy dostarczanych przez producenta oraz po upływie ustalonego okresu eksploatacji, lub po ich naprawie.

W polskim gazownictwie niektóre oddziały PGNIG jako dostawcy gazu przy konieczności doraźnego sprawdzenia gazomierza miechowego u odbiorcy posługują się porównaniem jego wskazań i gazomierza miechowego typu G4 firmy METRIX dołączanego przed nim elastycznymi przewodami. Takie rozwiązanie wystarcza jedynie do stwierdzenia poprawności działania gazomierza, ale nie do wyznaczenia jego parametrów metrologicznych. Polskie gazownictwo i Czytelników jako odbiorców gazu powinna więc zainteresować opracowana na Uniwersytecie Technicznym Nafty Gazu w Iwano-Frankowsku na Ukrainie (dawnej Stanisławów) metoda i model kalibratora oraz wyniki sprawdzania nim gazomierzy bez dokonywania demontażu.

2. Budowa i działanie stanowiska do sprawdzania gazomierzy bez ich demontażu

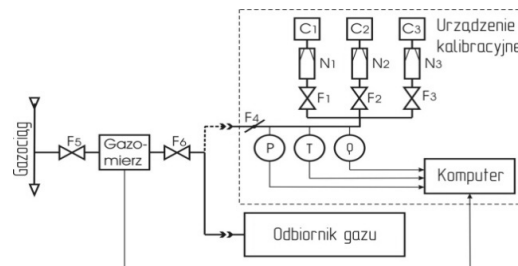
Do kalibracji i sprawdzania parametrów metrologicznych gazomierzy stosuje różne rodzaje stanowisk laboratoryjnych. Pomiar przeprowadza się zarówno przy przepływie powietrza jak i dla gazu ziemnego jako medium robocze. Literatura na ten temat jest bardzo uboga, głównie podawana przez producentów stanowisk i służbę miar [8 - 11]. W [1] omówiono parametry techniczne i właściwości metrologiczne kilku stanowisk kalibracyjnych. W Ukrainie używa się stanowiska dzwonowe, w których przepływ wytworzonej zadanej objętości gazu mierzy się licznikiem wzorcowym oraz stanowiska wykorzystujące dysze pomiarowe. Takie dwa urządzenia kalibracyjne opracowano też w Rosji. W urządzeniu "Kramb-M [F4] przyrządami wzorcowymi są strumieniowe i turbinowe - typu roller-blade (rolkowo-łopatkowe) liczniki zużycia gazu o zakresie (0,03 - 6) m³/h i błędzie podstawowym ±0,5%, zaś w urządzeniu SPU-3 [F5] przyrządem kontrolnym jest przepływomierz strumieniowy o zakresie (0,02- 40) m³/h z błędem podstawowym ±1%. W dostępnych źródłach informacji o obu tych urządzeniach nie podano jednak metody kalibracji ich przyrządów wzorcowych dla pomiarów gazu naturalnego. Nie pozwala to na wiarygodną ocenę, czy dla kalibracji przeprowadzanej gazem uzyskuje się dokładności pomiarów podawane przez producenta. Ostatnio do kontroli i diagnostyki gazomierzy stosuje się też urządzenia przenośne do pomiaru przepływu objętościowego w miejscu ich instalacji, czyli *in situ*, nie wymagające ich demontażu, np. w budynkach mieszkalnych.

Polskie gazownictwo nie używa takich specjalnych kalibratorów, a jedynie sprawdza się wskazania gazomierzy u odbiorcy gazomierzem wzorcowym typu G4 dołączanym elastycznymi przewodami od strony zasilania instalacji [F3]. Ponadto w Politechnice Gdańskiej w 2005 r. opracowano i zbadano zestaw aparatury do sprawdzania *in situ* gazomierzy sieciowych dla Pomorskiej Spółki Gazowej [4, 5]. Przyrządem kontrolnym był przepływomierz termooanemometryczny. Wyniki były pozytywne, ale taki zestaw kalibracyjny nie został wdrożony do eksploatacji.

Z tej krótkiej charakterystyki stanu techniki sprawdzania gazomierzy wynika waga i aktualność badań nad nowymi rozwiązaniami urządzeń kontrolno-pomiarowych do badania gazomierzy *in situ*. Prace takie prowadzi Uniwersytet Techniczny Nafty i Gazu w Iwano-Frankowsku. Urządzenie kontrolno-diagnostyczne opracowane do tego celu nazywane będzie dalej krótko kalibratorem.

Sprawdzanie gazomierzy w miejscu instalacji i bez ich demontażu można różnie realizować technicznie. Istotnym problemem przy tworzeniu urządzeń do badania gazomierzy stosowanych w gospodarstwach domowych jest opracowanie czujników do dokładnych pomiarów małych przepływów i ich kalibracja dla pomiarów gazu ziemnego. Omawiany kalibrator działa według oryginalnej koncepcji. Pomiar zużycia gazu przeprowadza się w nim metodą pośrednią [2]. Cechą charakterystyczną jest użycie jako wzorcowych czujników przepływu specjalnie zaprojektowanych spiętrzających kryz pomiarowych. Podłącza się je w instalacji gazowej w szereg z badanym gazomierzem, a do pomiarów

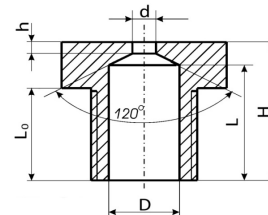
wykorzystuje się przepływ gazu ziemnego pobieranego z sieci. Schemat rozwiązania układu kalibracyjnego wybranego do realizacji i badań przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu do sprawdzania gazomierzy stosowanych w gospodarstwach domowych *in situ* bez ich demontażu: F₁, ... F₆ – zawory, N₁, ... N₃ – wzorcowe kryz pomiarowe wykalibrowane na różne przepływy, P, T, Q – czujniki ciśnienia, temperatury i gęstości gazu
Fig. 1. Scheme of the calibration system for testing household gas meters *in situ* without dismantling: F₁, ... F₆ – valves, N₁, ... N₃ – measuring nozzles (orifices) calibrated for different flows, P, T, Q – sensors of pressure, temperature and gas density

Opisano działanie tego układu. Kalibrator dołącza się w instalacji odbiorczej za gazomierzem zamiast kuchenki lub innego odbiornika gazu. Zawiera on wcześniej wykalibrowany jeden, lub kilka czujników przepływu (spiętrzających dysz pomiarowych) N1 ... N3. Gaz ziemny, pobierany podczas pomiarów z sieci zasilającej można spalać podobnie jak w zwykłej kuchence lub piecyku gazowym i wówczas kalibrator ma na wylocie palniki gazu C1 ... C3. Podczas sprawdzania, gaz przepływa przez gazomierz znajdujący się pomiędzy zaworami F5 i F6 i następnie poprzez otwarty jeden, lub więcej zaworów F1 ... F3 dopływa do wejścia (wlotu) jednego, lub kilku czujników przepływu N1, ... N3 (zależnie od wymaganej liczby punktów pomiarowych) i w końcu spala się w palnikach C1 ... C3. Do ustawiania wartości przepływu gazu mierzonego przez gazomierz służy zwór F4. W doprowadzeniach do kalibratora przed dyszami są jeszcze: czujnik ciśnienia P, czujnik temperatury T i odprowadzenie do pomiaru gęstości gazu ρ. Ich sygnały podaje się do komputera (docelowo do wyspecjalizowanego układu mikroprocesorowego). Do komputera wprowadza się też początkowe i końcowe odczyty gazomierza, aby przy pracy kalibratora wyznaczyć przepływ określonej objętości gazu.

Rysunek 2 przedstawia w przekroju wygląd i oznaczenia podstawowych wymiarów dyszy pomiarowej stosowanej w kalibratorem, zaś w tabeli 1 podano wartości wymiarów dla trzech jej wykonania wraz z parametrami metrologicznymi dla pomiaru powietrza i gazu ziemnego.



Rys. 2. Przekrój dyszy pomiarowej stosowanej w kalibratorem do sprawdzania *in situ* gazomierzy w gospodarstwach domowych
Fig. 2. Full-section of the measurement nozzle applied in the calibration device for *in situ* testing of household gas meters

Przy bardzo dokładnej weryfikacji właściwości metrologicznych gazomierza konieczna jest też znajomość ciśnienia i temperatury otoczenia, struktury składników gazu ziemnego (mierzonej chromatografem gazowym) i parametrów konstrukcyjnych odbiorczej instalacji gazowej.

Zastosowanie na wylocie gazu ziemnego specjalnego urządzenia do jego zasysania lub gromadzenia powoduje, że nie trzeba go spalać i zanieczyszczać otoczenia. Jednocześnie można wówczas znacząco rozszerzyć zakres pomiarowy przepływów, dla których wyznacza się parametry metrologiczne gazomierzy.

Tab. 1. Porównanie wymiarów i parametrów metrologicznych trzech dysz pomiarowych stosowanych w kalibratorze do gazomierzy
 Tab. 1. Comparison of metrological parameters and dimensions of three measurement nozzles used in calibrator to check the gas meters

Nr	d mm	D mm	Powietrze $\rho_c=1,205 \text{ kg/m}^3$		Liczba Reynoldsa -	Gaz ziemny $\rho_c=0,7 \text{ kg/m}^3$
			$\Delta p_{\min} \dots \Delta p_{\max}$ Pa	$Q_{\min} \dots Q_{\max}$ m^3/h		
1	0,56	2,5	330...1650	0,016...0,038	150...360	0,018...0,043
2	1	2,5	600...1650	0,07...0,12	660...1150	0,08...0,14
3	1,5	2,5	600...1650	0,13...0,22	1250...2050	0,15...0,24

3. Model matematyczny układu kalibratora

Przy tworzeniu modelu matematycznego działania układu kalibracyjnego do sprawdzania gazomierzy *in situ* można zrezygnować z korygowania zależności wskazań od temperatury i ciśnienia, gdyż urządzenie kalibracyjne dołącza się zwykle niedaleko od gazomierza i na obu ich wejściach wartości tych parametrów nie różnią się. Po przeprowadzeniu odpowiedniej analizy metrologicznej można też pominąć składowe niepewności pochodzące od wpływu termodynamicznych i hydrodynamicznych procesów w instalacji pomiędzy gazomierzem i wejściem kalibratora.

Algorytm działania urządzenia kalibracyjnego opisuje następujący model matematyczny:

$$V_{GO} = \tau \sqrt{\frac{p_S}{\rho_S T_S}} \frac{T_G K_G}{p_G} \sum_{i=1}^n \alpha_i \varepsilon_i F_i \sqrt{\Delta p_i \frac{p_i}{T_i K_i}} \quad (1)$$

$$p_G = f(p_i, T_i, \rho_S, K_i, T_B, y_p) \quad (2)$$

$$T_G = f(p_i, T_i, \rho_S, K_i, T_B, y_T) \quad (3)$$

$$\delta_G \equiv \frac{V_G - V_{GO}}{V_{GO}} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie: V_G, V_{GO} – zmierzone i obliczone objętości gazu przepływającego przez gazomierz, τ – czas przepływu tych objętości gazu; α_i, ε_i – współczynnik przepływu i współczynnik korygujący rozprężanie (ekspansję) gazu i -tego elementu spiętrzonego N_i (np. kryzy); F_i – powierzchnia otworu czujnika N_i ; $\Delta p_i, p_i, T_i$ – różnica ciśnień, ciśnienie i temperatura na wlocie N_i ; K_b, K_G – współczynnik ściśliwości gazu przed czujnikiem N_i i w gazomierzu, p_S, T_S, ρ_S – ciśnienie, temperatura i gęstość gazu w warunkach normalnych (wa w Ukrainie absolutne ciśnienie i temperatura: 101325 Pa i 293,15 K; w Polsce - dla procesu spalania i objętości: $t1/t2 - 298,15 \text{ K}$ (25°C)/ $273,15 \text{ K}$ (0°C), $p1=p2=101,325 \text{ kPa}$); T_B – temperatura otoczenia; - wypadkowe współczynniki od zmian ciśnienia i temperatury dla przepływu gazu w instalacji domowej.

Współczynniki y_p, y_T są funkcjami długości, średnicy, chropowatości powierzchni wewnętrznej rur, oporów przepływu i innych parametrów połączenia gazomierza z czujnikiem.

W przypadku, gdy jako czujnik przepływu dołączona jest tylko jedna kryza pomiarowa N_i oraz przy założeniu jednakowego współczynnika ściśliwości gazu w przewodzie przed gazomierzem zależności (1) - (3) upraszczają się następująco

$$V = B \cdot \tau \cdot \frac{T_G}{p_G} \cdot N_K \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P \cdot K}{T \cdot \rho_S}} \quad (5)$$

$$p_G = P + \Delta P_L \quad (6)$$

$$T_G = T - \Delta T_L \quad (7)$$

$$\text{gdzie: } B = \sqrt{2 \frac{p_S}{T_S}} = \sqrt{2 \frac{101325}{293,15}} = 26,2922 \text{ (Pa/K)}^{1/2} \text{ - stały współ-}$$

czynnik, V - obliczona objętość gazu, która przepłynęła przez gazomierz, $N_K = \alpha F \varepsilon$ - współczynnik czujnika N_i otrzymany w wyniku jego kalibracji, P, T - absolutne ciśnienie i temperatura gazu przed czujnikiem N_i , K - współczynnik ściśliwości gazu, $\Delta P_L, \Delta T_L$ - spadek ciśnienia i różnica temperatur na odcinku instalacji od gazomierza do czujnika N_i .

Przy stosowaniu uproszczonego modelu matematycznego (5) - (7) opisującego działanie kalibratora zakłada się eksperymentalne wyznaczenie parametrów ΔP_L i ΔT_L jako zależnych od warunków jego pracy. Dokonano uogólnienia otrzymanych zależności i przed czujnikiem N_i , dopuszczalnego ze względu na małe ciśnienie dla różnych zakresów liczb Reynoldsa Re uwzględniających laminarny, przejściowy i turbulentny przepływ strumienia gazu. Dla zakresu liczby Reynoldsa aż do 14000 spadek ciśnienia gazu na długości 1 m prostoliniowego odcinka rury stalowej opisuje się uproszczoną zależnością:

$$\Delta p(Re) = 8 \cdot 10^{-7} Re^2 + 0,0038 Re - 2,9869 \text{ Pa} \quad (8)$$

z błędem aproksymacji 0,0035.

Natomiast z pomiarów strat ciśnienia przy przepływie gazu przez zgięcie rury stalowej o 90° dla tego samego zakresu liczby Reynoldsa uzyskano

$$\Delta p(Re) = 10^{-7} Re^2 + 0,0008 Re + 0,051 \text{ Pa} \quad (9)$$

z błędem aproksymacji 0,0077.

Badania procesów termodynamicznych w gazociągach pozwoliły na ustalenie zależności dla zmiany temperatury gazu ziemnego przy nagrzewaniu się wywołanym tarciem o ścianki stalowego rurociągu. Zależy ona od liczby Reynoldsa Re i innych parametrów ośrodka i wynosi w przybliżeniu

$$\Delta T' = 0,00795 Re \frac{d\mu}{\rho} \quad (10)$$

gdzie: d - średnica wewnętrzna rurociągu; $\rho = \frac{p_S p T_S}{p_S T K}$ - gęstość

plynącego gazu; $\mu = 3,24 \frac{\sqrt{T} + 1,37 - 9,09 \rho_S^{0,125}}{\sqrt{\rho_S + 2,08 - 1,5(x_a + x_y)}}$ - współczynnik

lepkości dynamicznej gazów; p, T, K - bezwzględne ciśnienie i temperatura oraz współczynnik ściśliwości gazu ziemnego na początku badanego odcinka gazociągu; x_a, x_y - stężenie objętościowe w molach azotu i dwutlenku węgla w gazie ziemnym.

Poza zmianami temperatury gazu wskutek tarcia, należy też uwzględniać zmiany spowodowane wymianą ciepła z otoczeniem. Opisuje to formuła podana przez Shukhova [3]. Dla rurociągu we wnętrzu budynków

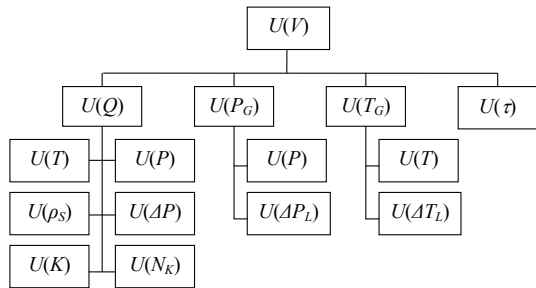
$$T_x = T_B + (T - T_B) e^{-\frac{\pi k d x}{c Q \rho}} \quad (11)$$

gdzie: T_x - temperatura gazu w odległości x od początku rurociągu, k - współczynnik przenikania ciepła z gazu do środowiska, c - ciepło właściwe barometryczne gazu (przy stałym ciśnieniu); Q - natężenie przepływu objętościowego.

4. Opis metrologiczny układu kalibratora

Dokładność pomiaru objętości V gazu pobranego z sieci metodą pośrednią z użyciem kalibratora szacuje się przez całkowitą niepewność $U(V)$. Na podstawie uproszczonego modelu (5) - (7)

działania układu z rys 1 podano na rys. 3 model metrologiczny identyfikujący niepewności składowe.



Rys. 3. Niepewności w układzie do sprawdzania gazomierzy *in situ*
Fig. 3. Uncertainties of the system for checking gas meters *in situ*

Występują w nim cztery główne składowe niepewności $U(V)$: $U(Q)$ – niepewność wyznaczenia przepływu objętościowego gazu $Q=V/\tau$, $U(P_G)$ i $U(T_G)$ – niepewności wyznaczenia ciśnienia i temperatury gazomierza oraz $U(\tau)$ – niepewność pomiaru przedziału czasu przepływu określonej objętości gazu przez gazomierz. Trzy z tych składowych są ze sobą skorelowane, gdyż $U(Q)$ i $U(T_G)$ zależą wspólnie od $U(T)$, zaś $U(Q)$ i $U(P_G)$ – od $U(P)$. Po dalszej ich dekompozycji daje się wyodrębnić nieskorelowane niepewności składowe od 9 wielkości wpływających.

Wzór (5) opisujący pomiary metodą pośrednią pobranej objętości gazu kalibratorem ma postać iloczynową

$$V = \prod_{i=1}^9 (X_i)^{n_i} \quad (12)$$

Jest to zależność prosta, lecz nieliniowa. Dla małych wartości błędów względnych $\delta(X_i)$ występujących w procesie sprawdzania i dla ich wariancji można z dopuszczalnym w praktyce przybliżeniem zastosować liniowe prawo propagacji. Wówczas bieżący względny błąd δ_V dla pomiarów pośrednich według (12) wyniesie

$$\delta_V = \sum_{i=1}^9 n_i \delta(X_i). \quad (13)$$

Jest to suma błędów względnych $\delta(X_i)$ czynników X_i pomnożonych przez ich wykładniki potęgowe n_i . Z (13) dla błędów bezwzględnych otrzymuje się odpowiednio

$$\Delta_V = \sum_{i=1}^9 n_i \frac{V}{X_i} \Delta(X_i) \quad (14)$$

gdzie $n_i \frac{V}{X_i} = \frac{\partial V}{\partial X_i}$.

Stąd, po zastosowaniu liniowej propagacji dla wariancji nieskorelowanych niepewności standardowych $U(X_i)$ otrzymuje się, że dla pomiaru objętości gazu V kalibratorem w układzie z rys. 1 złożona niepewność standardowa $U(V)$ wynosi

$$U(V) = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial \tau} U(\tau)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T_G} U(T_G)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial N_K} U(N_K)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_G} U(P_G)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_s} (\rho_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial T} (T)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \Delta P} U(\Delta P)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P} U(P)\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial K} U(K)\right)^2} \quad (15)$$

Przy sprawdzaniu gazomierza kalibratorem oblicza się niepewność $U(V)$ dla znamionowych warunków pracy. Gdy warunki te są

inne, wprowadza się odpowiednie poprawki uwzględniające dopuszczalne zmiany czynników wpływających.

5. Oszacowanie dokładności kalibracji

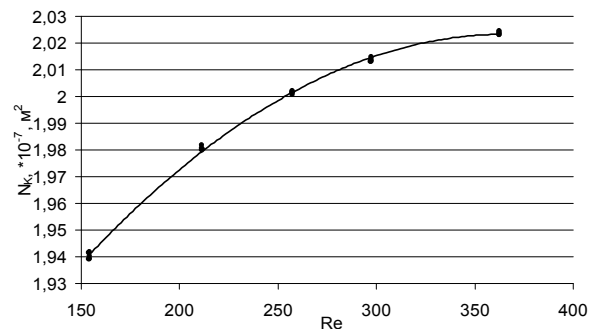
Niepewność całkowitą sprawdzania gazomierzy za pomocą kalibratora z rysunku 1 szacuje się z (15) dla znamionowych warunków pracy. Wyznacza się ją z wartości niepewności standardowych $U(X_i)$ o składowych typu A i B dla wszystkich dziewięciu wielkości wpływających oraz ich współczynników wagi $\frac{\partial V}{\partial X_i}$.

Omówiono to w skrócie.

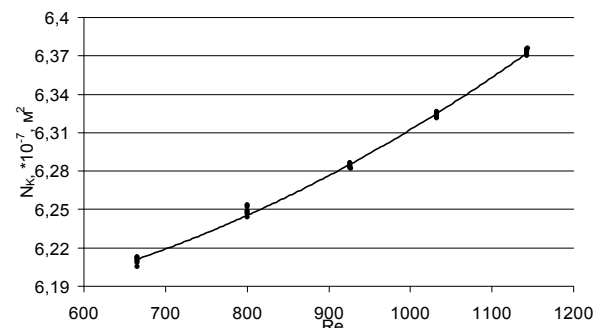
Znamionowe warunki pracy zestawu kalibracyjnego są następujące: $P_G=103625$ Pa, $N_K=6 \cdot 10^{-7}$ m³, $\Delta P=2000$ Pa, $\rho_s=0,7$ kg/m³, $P=103325$ Pa, $K=0,999$, $T=293$ K, $\tau=600$ s. Z (5) wyznaczono objętość V gazu przepływającego z instalacji przez gazomierz badany i kalibrator o tych wartościach parametrów. Wynosi ona $2685 \cdot 10^{-2}$ m³.

Niepewność wzorcowania (kalibracji) współczynnika przetwarzania N_K czujnika N_i zależy od niepewności wzorcowego urządzenia do pomiaru objętości gazu $U_B(N_K)$, niepewności $U_A(N_K)$, obliczania wartości tego współczynnika z wielokrotnie powtarzanych pomiarów przy użyciu przyrządu wzorcowego do pomiaru objętości przepływającego gazu, np. pomiarowego zestawu dzwonowego i niepewności jego wartości związanej z aproksymacją liczby Reynoldsa $U_A(N_{Ka})$. Do wzorcowania czujników użyto wzorcowego stanowiska dzwonowego o granicznym błędzie względnym pomiaru objętości gazu $\pm 0,15\%$. Wyniki wzorcowania dwóch dysz jako czujników pomiarowych podano na rys. 4. Ich liczby Reynoldsa Re wyznaczano dla wlotu dyszy.

a)



b)



Rys. 4. Zależność współczynnika kalibracji dysz od liczby Reynoldsa, a) – dysza o średnicy otworu 0,56 mm i średnicy wlotu 2,5 mm; b) – o średnicy otworu 1,00 mm i średnicy wlotu dyszy 2,5 mm

Fig. 4. Relationship of nozzle calibration factors and Reynolds number: a) – for the nozzle of hole diameter 0.56 mm and inlet diameter 2.5 mm; b) – the diameter of the hole diameter of 1.00 mm and 2.5 mm nozzle inlet

Błąd bezwzględny stanowiska wzorcowego dla mierzonej objętości $0,03$ m³ wynosi

$$\Delta(V) = 0,03 \cdot 0,15/100 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3.$$

Błąd bezwzględny obliczenia współczynnika kalibracji dla nastawy ciśnienia w stanowisku dzwonowym 1,5 kPa, temperatury 293 K i normalnej gęstości powietrza przed czujnikiem N_i wyniesie $\Delta(N_K)=2\cdot 10^{-9}$ m². Przy równomiernym rozkładzie tego błędu niepewność standardowa typu B współczynnika kalibracji

$$U_B(N_K) = \frac{\Delta(N_K)}{\sqrt{3}} = 1,155 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2.$$

Niepewność standardową typu A współczynnika kalibracji dla powtarzanych pomiarów wyznaczono przez obliczenie odchyłeń standardowych jego wartości od wartości średniej. Składowa ta nie przekraczała:

$$U_A(N_K) = 9,74 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2.$$

Niepewność standardowa typu A określona jako wartość odchyłeń standardowych danych otrzymanych eksperymentalnie od ich uśrednionych krzywych z rys.3a,b wyniosła:

$$U_A(N_{K_a}) = 3,390 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2.$$

Ostatecznie złożona niepewność współczynnika kalibracji

$$U(N_K) = \sqrt{U_B(N_K)^2 + U_A(N_K)^2 + U_A(N_{K_a})^2} = 1,204 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$$

Do pomiaru nadciśnienia przed czujnikiem N_i użyto manometru różnicowego firmy Rozemount 3051N o górnym krańcu zakresu pomiarowego 4 kPa, sygnale wyjściowym 15 V i błędzie granicznym $\pm 0,075\%$. Błąd bezwzględny pomiarów wynosi

$$\Delta(\Delta P) = \frac{0,075 \cdot 4}{100} = 0,003 \text{ kPa}.$$

Przy założeniu, że dla danego zakresu pomiarów błąd bezwzględny może wystąpić z jednakowym prawdopodobieństwem, określa się standardową niepewność składowej typu B jako

$$U_B(\Delta P) = \frac{\Delta(\Delta P)}{\sqrt{3}} = 1,73 \cdot 10^{-3} \text{ kPa}.$$

Ciśnienie absolutne na wejściu urządzenia (jego wlocie) jest sumą ciśnienia atmosferycznego i nadciśnienia. Ciśnienie atmosferyczne mierzono barometrem typu Bamm-1B (górną kres zakresu pomiarowego 106 kPa, błąd dopuszczalny $\pm 0,2\%$, błąd bezwzględny 0,212 kPa). Stąd całkowity błąd bezwzględny określenia ciśnienia wlotowego $\Delta(P)=0,212+0,003=0,215$ kPa i przy rozkładzie równomiernym niepewność standardowa typu B pomiaru ciśnienia absolutnego:

$$U_B(P) = \frac{\Delta(P)}{\sqrt{3}} = 0,124 \text{ kPa}$$

Temperaturę gazu mierzy się czujnikiem o górnej granicy zakresu 50 °C i błędzie bezwzględnym 0,3 °C. Niepewność standardowa typu B dla pomiarów temperatury wynosi:

$$U_B(T) = \frac{\Delta(T)}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ °C}$$

Oszacowanie niepewności współczynnika ściśliwości K gazu przeprowadzono na podstawie podanego w przepisach ukraińskich błędzie metody jego pomiaru $\pm 0,13\%$ i jego średniej wartości dla znamionowych warunków pracy urządzenia równej 0,9990. Stąd błąd bezwzględny $\Delta(K) = 0,00129$ i niepewność standardowa:

$$U_B(K) = \frac{\Delta(K)}{\sqrt{3}} = 7,452 \cdot 10^{-4}.$$

Dokładność pomiaru gęstości gazu w warunkach standardowych zależała od wyników analizy laboratoryjnej przeprowadzanej chromatografem "Kristall-2000M". Jego błąd bezwzględny wynosi $\Delta(\rho_S) = 0,002$ kg/m³. Stąd otrzymuje się:

$$U_B(\rho_S) = \frac{\Delta(\rho_S)}{\sqrt{3}} = 1,154 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3.$$

Ciśnienie w gazomierzu określano przez pomiar ciśnienia na jego wejściu, a spadek ciśnienia w rurach pomiędzy nim i kalibratorem obliczono według (6). Z uzyskanych eksperymentalnie zależności przybliżonych (8) - (9) wynika, że różnica spadku ciśnienia od wartości wielomianu aproksymującego dane pomiarowe, czyli niepewność standardowa typu A, $U_A(\Delta P_L)$ nie przekracza 10 Pa. Stąd niepewność określenia ciśnienia w gazomierzu:

$$U(P_G) = \sqrt{U_B(P)^2 + U_A(\Delta P_L)^2} = 0,125 \text{ kPa}.$$

Temperaturę gazu w gazomierzu określa się z temperatury na wejściu kalibratora i jej zmian pod wpływem wymiany ciepła i tarcia o ściankę gazociągu, obliczanych za pomocą (10) - (11). Wyniki przeprowadzonych badań [3] wykazały, że błąd bezwzględny określenia w taki sposób temperatury na wylocie gazomierza nie przekracza 0,3 °C i można przyjąć, że

$$U_B(\Delta T_L) = \frac{\Delta(\Delta T_L)}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ °C}.$$

Ponieważ temperaturę gazomierza określa się według (7), to niepewność przy obliczaniu jego temperatury wynosi:

$$U(T_G) = \sqrt{U_B(T)^2 + U_B(\Delta T_L)^2} = 0,245 \text{ °C}.$$

Niepewność pomiaru czasu przepływu gazu przez gazomierz przy pracy kalibratora wyznacza się na podstawie błędzie stopera elektronicznego. Przy dzisiejszym wysokim poziomie elektroniki cyfrowej jego błąd bezwzględny nie przekracza 0,001 s i można zaniedbać wynikający stąd składnik niepewności całkowitej.

W kolumnie 2 tabeli 2 zestawiono wzory dla powyższych niepewności składowych wraz z oszacowanymi ich wartościami. Natomiast kolumna 3 zawiera wzory i wartości współczynników wagi dla każdej z tych niepewności składowych oraz ich wartości obliczone dla znamionowych parametrów pracy urządzenia.

Dla danych z tabeli 1 otrzymano całkowitą niepewność standardową $1,712 \cdot 10^{-4}$ m³ oraz niepewność rozszerzoną o współczynniku rozszerzenia $k_p=2$ nie przekraczającą $3,43 \cdot 10^{-4}$ m³. Wyznaczono też względne wartości niepewności całkowitej i rozszerzonej dla wartości parametrów mierzonych układem kalibracyjnym. Wynoszą one odpowiednio 0,63% i 1,26%.

Zdaniem twórców tego rozwiązania urządzenia kalibracyjnego do badania właściwości metrologicznych gazomierzy bez demontażu oraz otrzymane wartości liczbowe niepewności pomiarowej dla jego modelu uzasadniają dalszą kontynuację realizacji tej koncepcji zestawu kalibracyjnego do postaci prototypu i serii informacyjnej. Po opracowaniu i zbadaniu tego prototypu budowanego już z przeznaczeniem do jego powielania, wprowadzaniu ulepszeń oraz opracowaniu i zatwierdzeniu odpowiednich przepisów dla stosowania tej metody pomiaru w gazownictwie, uzasadnione będzie wdrożenie takiego kalibratora do produkcji i stosowania w praktyce eksploatacyjnej w Ukrainie jako uzupełnienie stacjonarnych urządzeń kalibracyjnych.

Tab. 2. Wzory i wartości składowych niepewności i ich współczynników wagi dla układu pomiarowego kalibratora gazomierzy z rys. 1

Tab. 2. Formulas and values of the uncertainty components and their weight coefficients for the measuring system of gas meter calibrator from Fig. 1

Lp.	1. Parametr wpływający	1. Niepewności składowe		2. Ich współczynniki wagi*	
		Wzór	Wartość	Wzór	Wartość
1	Temperatura gazu T przed czujnikiem	$U_B(T) = \frac{\Delta(T)}{\sqrt{3}}$	0,173 K	$\frac{\partial V}{\partial T} = -\frac{1}{2} \frac{V}{T}$	-4,582 m ³ /K
2	Ciśnienie gazu P przed czujnikiem	$U_B(P) = \frac{\Delta(P)}{\sqrt{3}}$	0,124 kPa	$\frac{\partial V}{\partial P} = \frac{1}{2} \frac{V}{P}$	1,299 · 10 ⁻⁷ m ³ /Pa
3	Spadek ciśnienia ΔP na czujniku	$U_B(\Delta P) = \frac{\Delta(\Delta P)}{\sqrt{3}}$	1,73 · 10 ⁻³ kPa	$\frac{\partial V}{\partial \Delta P} = \frac{1}{2} \frac{V}{\Delta P}$	6,713 · 10 ⁻⁶ m ³ /Pa
4	Gęstość ρ_S gazu ziemnego	$U_B(\rho_S) = \frac{\Delta(\rho_S)}{\sqrt{3}}$	1,154 · 10 ⁻³ kg/m ³	$\frac{\partial V}{\partial \rho_S} = -\frac{1}{2} \frac{V}{\rho_S}$	-0,019 m ⁶ /kg
5	Kalibrowany współczynnik N_K	$U(N_K) = \sqrt{U_B(N_K)^2 + U_A(N_K)^2 + U_A(N_{Ka})^2}$	1,204 · 10 ⁻⁹ m ²	$\frac{\partial V}{\partial N_K} = \frac{V}{N_K}$	4,475 10 ⁴ m
6	Współczynnik ściśliwości gazu K	$U_B(K) = \frac{\Delta(K)}{\sqrt{3}}$	7,452 · 10 ⁻⁴	$\frac{\partial V}{\partial K} = \frac{1}{2} \frac{V}{K}$	0,013 m ³
7	Temperatura gazu w gazomierzu T_G	$U(T_G) = \sqrt{(U_B(T))^2 + (U_B(\Delta T_L))^2}$	0,245 K	$\frac{\partial V}{\partial T_G} = \frac{V}{T_G}$	9,164 · 10 ⁻⁵ m ³ /K
8	Ciśnienie gazu w gazomierzu P_G	$U(P_G) = \sqrt{(U_B(P))^2 + (U_A(\Delta P_L))^2}$	0,125 kPa	$\frac{\partial V}{\partial P_G} = -\frac{V}{P_G}$	-2,591 · 10 ⁻⁷ m ³ /Pa
9	Czas pomiaru objętości gazu τ	$U(\tau)$	10 ⁻⁴ s	$\frac{\partial V}{\partial \tau} = \frac{V}{\tau}$	4,475 · 10 ⁻⁵ m ³ /s

* Odpowiednimi pochodnymi cząstkowymi opisano współczynniki wagi (współczynniki wrażliwości) niepewności składowych)

6. Wnioski

- Opracowano zestaw kontrolno-pomiarowy, nazwany w skrócie kalibratorem, służący do sprawdzania parametrów metrologicznych gazomierzy w miejscu ich użytkowania bez demontażu.
- Jako czujniki do pomiaru przepływu gazu naturalnego zastosowano specjalne wywzorcowane elementy spiętrzające (dysze pomiarowe), które umożliwiają sprawdzanie zainstalowanych gazomierzy w rzeczywistych warunkach eksploatacji.
- Wyznaczone eksperymentalnie współczynniki kalibracyjne dysz oraz badania ciśnienia i temperatury gazu w instalacjach mieszkalnych potwierdziły zasadność stosowania tej koncepcji.
- Stworzono model działania i model metrologiczny układu kontrolno-pomiarowego opracowanego dla sprawdzania gazomierzy *in situ*. Zidentyfikowano dziewięć składowych jego całkowitej niepewności pomiarowej i oszacowano ich odchylenia standardowe typu A i B. Wyznaczono standardową i rozszerzoną wartości tej niepewności. Potwierdziły one przydatność proponowanego układu do budowy mobilnego stanowiska do sprawdzania liczników przepływu gazu ziemnego.
- Innowacyjność prezentowanej koncepcji została potwierdzona przyznaniem w Ukrainie patentu [6];
- Wykazano, że zaprezentowana koncepcja konstrukcji przenośnego kalibratora gazomierzy nadaje się do realizacji. Opracowany według niej kalibrator byłby pożytecznym uzupełnieniem stacjonarnych stanowisk wzorcująco-diagnostycznych.
- Kontynuowane są eksperymentalne badania właściwości eksploatacyjnych i metrologicznych zbudowanego próbnego układu kalibratora.
- Dostępność urządzeń do sprawdzania parametrów metrologicznych gazomierzy w miejscu ich użytkowania wraz ze stworzeniem przepisów dla takiego sprawdzania może znacznie poprawić wiarygodność zliczania zużycia gazu naturalnego i stanowić podstawę do oszczędnego nim gospodarowania.
- Opracowane na uczelni w Iwano-Frankowsku oryginalne rozwiązanie zestawu kalibracyjnego dla sprawdzania gazomierzy bezpośrednio u odbiorców indywidualnych powinno zainteresować też dostawców gazu w innych krajach, w tym i w Polsce.

7. Literatura

- Seredyuk O.Ye., Chehovskiy S.A., Vynnychuk A.G.: Techniczne i metrologiczne podstawy budowy diagnostycznych stanowisk dla liczników gazu, Naftowa i gazowa promislowitz nr 62006, s. 38-42 (ukr.)
- Seredyuk A.E., Vynnychuk A.G.: Mobilne stanowisko do bezdemontażowego diagnozowania liczników gazu Naftowaja energetika, 2007, nr 3, s.76-80 (ukr.)
- Vynnychuk A.G., Seredyuk A.E.: Badanie wpływu temperatury czynnika w sieciach gazowych budynków dla celów projektowania urządzeń do kalibracji liczników gazu. Metrologija ta priladi, 2010, nr. 24-30 (ukr.)
- Łętowski S., Słomiński P., Słomiński W.: Pomiary strumienia gazu ziemnego przepływomierzem termoanemometrycznym, cz.1 - Analiza teoretyczna. PAK nr 7/8, 2005 s. 29-32.
- Łętowski S., Słomiński P., Słomiński W.: Pomiary strumienia gazu ziemnego przepływomierzem termoanemometrycznym, cz.2 Badania na obiekcie rzeczywistym. PAK nr10, 2005 s. 8-11.
- Seredyuk A.E., Czechovskiy S.A., Vynnychuk A. et al.: Metoda diagnozowania i badań gazomierza. Pat. 16 522 U Ukraina, IPC (2006). G 01 F 25/00. Nr u200601289, Publ. 09.02.2006, wyd.15.08.2006, Bul. nr 8.
- ISO/DIN 5221. Draft international standard. Guide to methods of measuring air flow rate in an air handling duct. 1980.
- Wright John D.: What is the "Best" Transfer Standard for Gas Flow? www.cstl.nist.gov
- Wright, J. D.: Laboratory Primary Standards in Flow Measurement. Practical Guides for Measurement and Control. 2nd edition, D. W. Spitzer editor, The Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, North Carolina, 2001, 731- 760.
- Wright J. D., Johnson A. N., Moldover M. R.: Design and Uncertainty Analysis for a PVTt Gas Flow Standard, NIST J. of Res., 2003.
- www.nist.gov/calibrations/flow_measurements.cfm,(18015C)
Literatura firmowa:
- [F1]Rotary Meters. Prospekt firmy Romet Ltd. – Bul. No 303, 2001, p.26.
- [F2]Membranovy plynometry G4, G6 (tup PG), G1.6, G2.5, G4, tup BK / Prospekt firmy Premagas, 2000. s.12.
- [F3]Gazomierz miechowy G4 /Prospekt firmy Zakład Wytwórczy Urządzeń Gazowniczych INTERGAZ, AGA Katowice 1999, s.2.
- [F4]Urządzenie do sprawdzania gazomierzy KRAB-M http://www.irga.ru/Produktion/sredstva-poverki/Krab_M.html
- [F5]Urządzenie do sprawdzania gazomierzy SPU-3 (<http://www.turbo-don.ru>)

otrzymano / received: 16.10.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.12.2011

artykuł recenzowany / revised paper