

Transfer wartości wzorca w pomiarach przepływu gazu ziemnego

Orest E. Seredyuk*, Vitalij V. Malisevich*, Zygmunt L. Warsza**

*Iwano-Frankowski Narodowy Techniczny Uniwersytet Nafty i Gazu (IFNTUNG), Ukraina

**Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Abstract: Omówiono podstawy teoretyczne i przedstawiono niekonwencjonalne rozwiązanie transferu, czyli urządzenia do przekazywania wartości miar etalonu krajowego lub wtórnych wzorców odniesienia z państwowego systemu kontroli przyrządów pomiarowych do systemu sprawdzania przyrządów do pomiarów przepływu gazu ziemnego. Uwzględnia on rodzaj medium roboczego i zmiany jego parametrów. Sprawdzono eksperymentalnie działania modelu takiego transferu opartego na zwięźce Laval'a z zastosowaniem dzwonowego stanowiska kalibracyjnego do wytworzenia roboczej wzorcowej wartości przepływu. Oszacowano niepewności składowe pomiarów przepływu za pomocą transferu.

Słowa kluczowe: pomiary przepływu gazu ziemnego, transfer wartości wzorcowej, stanowisko dzwonowe, niepewność

1. Wprowadzenie

Wysoka cena gazu ziemnego spowodowała, że w wielu krajach, a w tym i na Ukrainie prowadzi się prace badawcze i studialne dotyczące oszczędnego wykorzystywania i racjonalnego gospodarowania gazem i energią uzyskiwaną z jego spalania [1]. Zaproponowano szereg rozwiązań organizacyjnych umożliwiających zminimalizowanie zużycia, zmniejszenie strat technologicznych w sieci dystrybucyjnej oraz zrationalizowanie rozliczenia. Realizacja tych działań wymaga stworzenia jednolitego systemu nadzoru metrologicznego nad pomiarami przepływu i zużycia gazu. W tym celu konieczne jest:

- opracowanie metody oraz koncepcji i konstrukcji urządzenia, zwanego dalej transferem, do przekazywania i reprodukcji wartości miary wzorca przepływu dla kalibracji i sprawdzania gazomierzy,
- wybór i zakup lub budowa odpowiednich precyzyjnych urządzeń pomiarowych,
- opracowanie przepisów i dokumentacji instruktażowej omawiającej kolejne czynności tworzenia i przekazywania wartości tej miary.

Poniżej przedstawiono rozwiązanie i wyniki badań takiego transferu dla systemu sprawdzania gazomierzy, opracowanego i zweryfikowanego eksperymentalnie w Iwano-Frankowskim Narodowym Technicznym Uniwersytecie Nafty i Gazu na Ukrainie [4].

2. Analiza stanu zagadnienia i cel pracy

W pracy [1] dokonano analizy stanu obowiązujących na Ukrainie i w Federacji Rosyjskiej ram prawnych dotyczących pomiarów przepływu gazu ziemnego. W przepisach ukraińskich dotyczących metrologii przepływu gazu i weryfikacji działania krajowego systemu pomiarów gazu naturalnego przyjęte są do stosowania w praktyce rozwiązania po części nie spójne z państwo-

wym systemem sprawdzania narzędzi pomiarowych. Aby uzyskać spójność pomiarów należy ustalić metodykę i urządzenia do przekazywania wartości miary przepływu gazu od etalonu krajowego [2] do systemu sprawdzania przyrządów stosowanych w dystrybucji i rozliczeniach zużycia gazu ziemnego, czyli zapewnić spójność pomiarów (trasabilność miary [17]). Transfery są niezbędne do wzorcowania wyspecjalizowanych stanowisk do kalibracji przyrządów do pomiaru przepływu zużycia gazu ziemnego, czyli gazomierzy i również dla weryfikacji kalibratorów do sprawdzania działania gazomierzy w warunkach pracy u użytkownika bez demontażu [9–11]. Powinny też być one przenośne. Jest to zadanie ważne we wszystkich krajach, a w szczególności w tak rozległych przestrzennie jak Ukraina i Federacja Rosyjska.

W konstrukcji stanowisk do sprawdzania i wzorcowania gazomierzy wykorzystuje się urządzenia dzwonowe, przepływomierze wirnikowe, turbinowe, z dyszami krytycznymi i inne. Na przykład, jedno z takich stanowisk, opracowane przez Ogólnorosyjski Instytut Badań Przepływu w Kazaniu, oparte jest na dyszach krytycznych i roboczym wzorcu miary masowego przepływu medium gazowego [5].

Kalibrację i sprawdzanie gazomierzy wykonuje się zwykle przy przepływie powietrza jako medium roboczym. Natomiast dość rzadko w stanowiskach kalibracyjnych wykorzystuje się bezpośrednio przepływ gazu ziemnego jako medium robocze. Przykładem są tu stanowiska tłokowe [6]. Szczególnie dużo uwagi poświęca się obecnie doskonaleniu metody porównywania wzorców przepływu dla powietrza [7] i gazu ziemnego [8] z przeliczaniem charakterystyki kalibracyjnej wzorca roboczego otrzymanej dla powietrza, na jego charakterystykę dla gazu ziemnego o znanych parametrach. W tym też celu używa się wirnikowych lub turbinowych liczników przepływu i przeliczania wyników badań według procedury "korekta liczby Reynoldsa". Utrudnieniem w stosowaniu metody jest konieczność indywidualnych przeliczeń dla każdego rodzaju i typoszerokości wzorców.

Celem pracy było opracowanie koncepcji oraz wykonanie, uruchomienie i sprawdzenie poprawności działania modelu transferu do przekazywania wartości miary wzorcowej dla pomiarów przepływu gazu ziemnego opartego na przetworniku o zmiennej różnicy ciśnień. Transfer o tej zasadzie nie był opracowany na Ukrainie. Natomiast w NIST (USA) zbudowano stanowiska wzorcowe typu PVTt z pomiarem spadku ciśnienia zwięźkami krytycznymi [18–20]. Dodatkowo wymaga się, by transfer ten nadawał się do przenoszenia i do współpracy z dotychczas stosowanymi stanowiskami kalibracyjnymi gazomierzy z pomiarem przepływu powietrza jako medium robocze. Do oceny właściwości metrologicznych takiego transferu niezbędne jest też oszacowanie niepewności pomiarów dla określonych warunków jego pracy.

3. Istota metody

Cechą charakterystyczną proponowanego rozwiązania transferu do przekazywania wartości miary wzorca przepływu gazu jest jego poprawne działanie dla gazowego medium roboczego o różnych parametrach, w szczególności dla powietrza i gazu ziemnego. Transfer ten ma umożliwić precyzyjne określenie przepływu medium roboczego i prowadzenie porównań z wzorcami pierwotnymi i kontrolnymi. Działanie transferu opiera się na zweryfikowanych teoretycznie i eksperymentalnie modelach matematycznych opisu pomiarów przepływu medium gazowego. Powinien on spełniać wymagania metrologiczne, takie jak: dopuszczalne wartości nieusuwalnego błędu systematycznego (lub niepewności typu B), niestabilności (powtarzalności) wskazań i statystycznej standardowej niepewności typu A wyników pomiaru. Dla uzyskania założeń spełniających wymagania normy międzynarodowej [12], zbliżonej do normy UE, wybrano do realizacji koncepcję transferu z zastosowaniem przepływomierzy różnicy ciśnień. Zawiera ona wzory do wyznaczania i obliczania błędów składowych pomiaru, które zostaną uwzględnione przy oszacowaniu niepewności transferu.

Transfer, który wykorzystuje pomiar spadku ciśnienia na elemencie spiętrzającym przepływ (zweżka pomiarowa) powinien realizować następujące algorytmy [12]: dla masowego przepływu gazu

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 K_{ch} K_d (2 \Delta P \rho)^{0.5} \quad (1)$$

dla objętościowego natężenia przepływu medium w warunkach roboczych

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 K_{ch} K_d (2 \Delta P / \rho)^{0.5} \quad (2)$$

dla objętościowego przepływu przeliczonego na znamionowe warunki pomiaru

$$q_C = C \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 K_{ch} K_d \left(2 \Delta P \frac{1}{\rho_s} \frac{T_s}{T} \frac{P}{P_s} \frac{1}{K} \frac{1}{1-\beta^4} \right)^{0.5} \quad (3)$$

gdzie: C – współczynnik wpływu zwężenia przepływu zwężki wzorcowej transferu, ε – współczynnik rozprężenia gazu [12] obliczany jako

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \beta^4 + 0,93 \beta^8) \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta P}{P} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad (4)$$

gdzie: $\beta = d/D$ – względna średnica otworu wzorcowego urządzenia zwężającego transferu (d i D – odpowiednio średnica otworu zwężki wzorcowej transferu i średnica wewnętrzna przewodu pomiarowego przetwornika różnicy ciśnień przy absolutnej temperaturze gazu T); ΔP , P – spadek ciśnienia na zwężce transferu i ciśnienie absolutne przed zwężką transferu; T_s i P_s – odpowiednio temperatura i ciśnienie gazu przyjęte dla standardowych warunków pomiaru ($T_s = 293,15$ K, $P_s = 101,325$ kPa), ρ i ρ_s – gęstości gazu ziemnego w roboczych i standardowych warunkach pomiaru; k – współczynnik adiabaty gazu; K_{ch} , K_d – współczynniki korekcyjne uwzględniające odpowiednio chropowatość wewnętrznej powierzchni rury pomiarowej i stopień kra-

wędzi otworu wejściowego; K – współczynnik ściśliwości gazu ziemnego.

Wszystkie występujące w (1)–(3) parametry i współczynniki obarczone są niepewnościami wynikającymi z ich największego dopuszczalnego błędu. Największe ich wartości występują dla współczynników C i ε [12]. Nawet jeśli zaniedba się niepewność względnej średnicy β otworu zwężki wzorcowej transferu i liczby Reynoldsa Re , to niepewność współczynnika wypływu C dla wartości β od 0,2 do 0,6 zmienia się w zakresie (0,4 ... 0,5). Tak dużych niepewności nie można zaakceptować przy tworzeniu wzorca jednostki przepływu gazu. Dlatego też w celu określenia zakresu zmian wartości występującego w (1)–(3) iloczynu współczynników $C\varepsilon$, nazwanego dalej współczynnikiem wzorcowania K_{wz} , dokonano jego numerycznej symulacji. W obliczeniach ε wykorzystano wzór (4), a dla C – następującą zależność [12]:

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0,0188 + 0,0063A) \beta^{3.5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1}) \times (1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031(M_1 - 0,8M_1^{1.1}) \beta^{1.3} + M_2 \quad (5)$$

gdzie Re_D – liczba Reynoldsa dla średnicy D ; M_1 i M_2 – parametry o wartościach:

$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0.8} \quad (6)$$

$$M_1 = \frac{2L_2}{1 - \beta} \quad (7)$$

$$M_2 = 0,011(0,75 - \beta) \left(2,8 - \frac{D}{0,0254} \right) \text{ dla } D < 0,07112 \text{ m} \quad (8)$$

oraz

$$M_2 = 0 \text{ gdy } D \geq 0,07112 \text{ m} \quad (9)$$

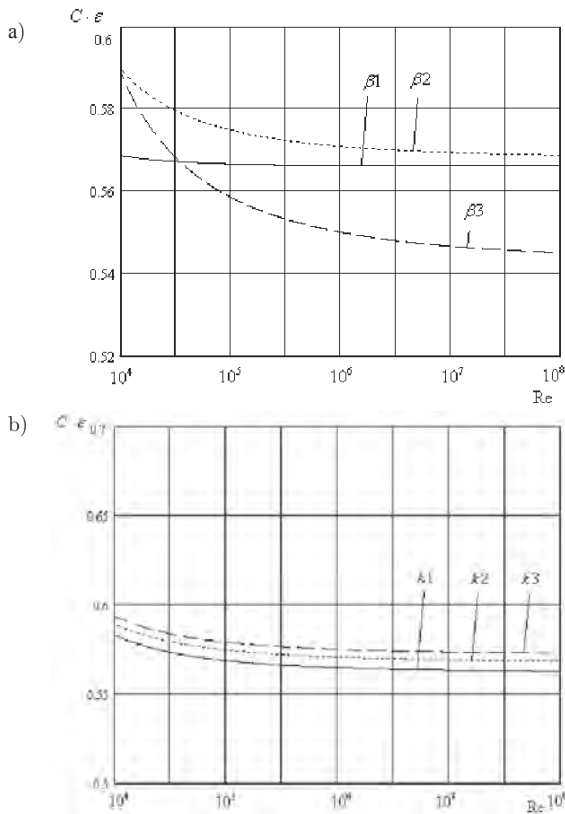
Przy kątowym sposobie odbioru ciśnienia parametry L_1 i L_2 są równe zero [12].

Z modelu matematycznego opisanego przez wzory (1)–(5) wynika, że zmiana rodzaju medium roboczego i jego parametrów wpływa na wartość liczby Reynoldsa Re_D i na współczynnik adiabaty k . Wychodząc z (2) otrzymuje się

$$K_{wz} = C \varepsilon = \frac{4q_v \sqrt{1-\beta^4}}{\pi d^2 K_{ch} K_d \sqrt{2 \Delta P / \rho}} = f(Re_D, k, \beta) \quad (10)$$

Współczynnik kalibracji K_{wz} poddano modelowaniu numerycznemu jako funkcję liczby Re_D i k przy założeniu, że średnica rury $D > 0,071$ m i współczynnik $\Delta P/P = 0,2$. Wyniki pokazano na rys. 1.

Na rys. 1 przedstawiony jest wpływ liczby Re_D , adiabatycznego współczynnika k i względnej średnicy β otworu przysłony na wartość współczynnika kalibracji K_{wz} . Pomimo że te wpływy opisuje ogólnie (10) [12], to wyniki symulacji numerycznej pozwoliły określić zakresy parametrów, w których współczynnik K_{wz} mało się zmienia. Wykryto, że dla liczby Re_D od 10^5 do 10^8 najmniejsza zmiana wartości współ-



Rys. 1. Wyniki modelowania współczynnika $C\epsilon$ w funkcji liczby Reynoldsa Re ; a) dla $k_2 = 1,43$; $\beta_1 = 0,1$; $\beta_2 = 0,5623$; $\beta_3 = 0,74$; b) dla $\beta_2 = 0,5623$; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,43$; $k_3 = 1,66$

Fig. 1. Results of the simulation of coefficient $C\epsilon$ as function of Reynolds number Re ; a) for $k_2 = 1,43$; $\beta_1 = 0,1$; $\beta_2 = 0,5623$; $\beta_3 = 0,74$; b) for $\beta_2 = 0,5623$; $k_1 = 1,2$; $k_2 = 1,43$; $k_3 = 1,66$

czynnika $K_{wz} = 0,089\%$, występuje dla $\beta = 0,1$, a największa $2,41\%$ – dla $\beta = 0,74$ (rys. 1a). Niemal taki sam wpływ na wartość K_{wz} ma zmiana adiabatycznego współczynnika k , gdyż w zakresie Re_D od 10^5 do 10^8 współczynnik K_{wz} zmienia się o ok. $1,75\%$ dla całego zakresu zmian k z $1,2$ do $1,66$ (rys. 1b). Przybliżone podobieństwo postaci krzywych z rys. 1b świadczy o wpływie rodzaju medium roboczego na współczynnik K_{wz} i o możliwości zbadania tego wpływu by ocenić błędy systematyczne i wprowadzić dla nich poprawki. Wyniki symulacji pokazują również, że zmiany współczynnika K_{wz} zmniejszają się przy mniejszych wartościach β . Stosując zależności (4)–(5) jako udoskonalone modele matematyczne, w porównaniu z zalecanymi w przepisach RD 50–213–80, zidentyfikowano obszary iloczynu $C\epsilon$ o małych zmianach nieprzekraczających $0,017\%$ i $0,37\%$ dla zakresu liczby Reynoldsa Re_D od 10^6 do 10^8 oraz odpowiednio dla $\beta = 0,1$ i $\beta = 0,5623$. Wykazano więc, że iloczyn $C\epsilon \equiv K_{wz}$ można stosować do opisu transferu miary wzorca przepływu gazu i wprowadzać poprawki dla wartości współczynnika K_{wz} uwzględniające wpływ wartości parametrów Re_D , β i k . Dzięki temu zwiększy się dokładność wzorca miary przepływu.

Z wyników modelowania współczynnika kalibracji K_{wz} wynika, że dla transferu jako urządzenia do przekazywania miary wzorca objętościowego natężenia przepływu gazu ziemnego, realizowanego w oparciu o pomiary spadku ciśnienia, powinno się stosować algorytm [13]:

$$q_{wz} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{K_{wz} K_k}{\sqrt{1 - \beta^4}} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (11)$$

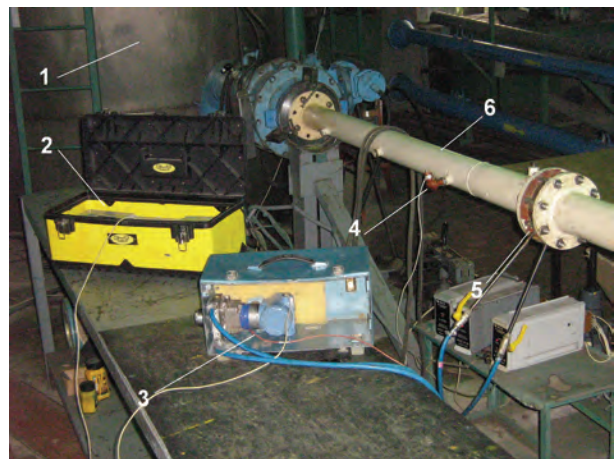
gdzie: q_{wz} – objętościowe natężenie przepływu w warunkach roboczych transferu, K_k – wynikowy współczynnik poprawkowy wyników pomiaru dla jego pracy przy gazie ziemnym.

4. Stanowisko pomiarowe i wyniki badań transferu

Dokonano aprobaty, czyli sprawdzenia poprawności działania oraz kalibracji wykonanego prototypu transferu służącego do przeniesienia miary wzorca przepływu gazu. Podczas kalibracji jego współczynnik K_{wz} wyznacza się eksperymentalnie przy użyciu pomiarowego stanowiska dzwonowego [14], zaś współczynnik K_k oblicza się według metody podanej w [13] na podstawie parametrów pracy transferu dla przepływu gazu ziemnego.

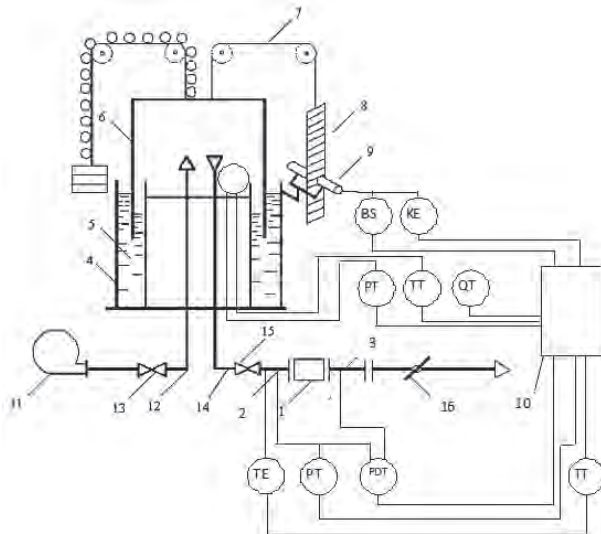
Wygląd zestawu aparatury do realizacji przekazywania wartości wzorcowych przepływu i objętości gazu przedstawia rys. 2, a schemat opisujący jego działanie podano na rys. 3.

Transfer zawiera znormalizowaną zwężkę pomiarową o średniej średnicy otworu $d = 56,00$ mm. Po obu stronach zwężki zastosowano dwa proste odcinki rur o nominalnej średnicy $D_N = 100$ mm i o długości po $20 D_N$. Mierzy się ciśnienie i temperaturę przepływającego gazu oraz różnicę ciśnień na zwężce. Do przetwarzania sygnałów służy elektroniczny przelicznik typu OE-22DM (wyprodukowany w Iwano-Frankowsku), do którego podłączone są: przetwornik ciśnienia, różnicy ciśnień i temperatury firmy Fisher Rosemount model 3095 z przetwornikiem temperatury TSP-1288. Do wzorcowa-



Rys. 2. Widok stanowiska pomiarowego do badania transferu wartości wzorcowej dla pomiaru przepływu gazu ziemnego z wykorzystaniem metody ze zwężką o zmiennym spadku ciśnienia. 1 – dzwonowe stanowisko wzorcowe do kalibrowania transferu przy przepływie powietrza, 2 – elektroniczny przelicznik dla gazu ziemnego, 3 – przetwornik ciśnienia i spadku ciśnienia na zwężce pomiarowej, 4 – przetwornik temperatury medium roboczego, 5 – zwężka do pomiaru przepływu, 6 – prostoliniowy odcinek rurociągu przed zwężką

Fig. 2. View of the stand for testing the transfer of standard flow value of the natural gas measured by differential pressure nozzle as primary sensor of type LFE (laminar flow element). 1 – bell type standard equipment for calibration transfer in air flow, 2 – electronic converter of data signals for natural gas, 3 – transmitter of pressure and differential pressure on the measuring nozzle, 4 – temperature sensor of working medium, 5 – flow measuring nozzle, 6 – linear part of the pipe before nozzle



Rys. 3. Układ wzorcowania transferu wzorca przepływu gazu na stanowisk dzwonowym (objaśnienia w tekście)

Fig. 3. Scheme of calibration of the gas flow transfer standard with use the bell stand (explanation in text)

nia transferu jako roboczego wzorca przepływu użyto stanowiska dzwonowego typu RKDU-0,44 (produkcji Iwano-Frankowskiej fabryki Prompribor) [14] z dopuszczalnym względny błąd granicznym przekazywania miary objętości gazu $\pm 0,16\%$ w zakresie przepływu (10 ... 1000) m³/h.

Wzorcowe wartości przepływu uzyskuje się przez pomiar zmian w czasie objętości gazu wypływającego z przestrzeni pomiarowej urządzenia dzwonowego. W tym celu wykonuje się kolejno poniższe czynności.

Przy zamkniętym zaworze 15 w przewodzie wylotowym 14, otwiera się zawór 13 w przewodzie wlotowym 12 i ze źródła 11 napelnia się gazem przestrzeń pod dzwonem 6 znajdującym się w zbiorniku pierścieniowym 4 i uszczelnionym cieczą 5. Po dotarciu dzwonu do wymaganego górnego położenia zawór 13 zamyka się i dostarczanie gazu ustaje. Dzwon 6 staje się zawieszony stacjonarnie. Następnie w urządzeniu nastawczym 16 zadaje się wymagane natężenie wypływu gazu i otwiera się zawór 15. Dzwon 6 pod własnym ciężarem zaczyna opadać i wypiera zgromadzony pod nim gaz, który przepływa przez zwężkę transferu 1 zaopatrzoną z obu stron w prostoliniowe odcinki przewodów 2 i 3. Czujnikiem przesunięcia dzwonu 6 jest fotolinijka 8 połączona z nim linką 7. Impulsy z fotodetektora 9 licza się elektronicznym przyrządem pomiarowym BS1-1. Kontrolują one wpływającą objętość gazu, zaś chronometr KE (2-1) mierzy czas od początku wypływu. W pamięci elektronicznego przelicznika 10 gromadzi się informację o kolejnych wartościach tych danych oraz o parametrach medium roboczego i parametrach środowiska pracy wzorca roboczego i transferu. Cykl wzorcowania kończy się, gdy dzwon 6 osiągnie najniższą krańcową pozycję i zamyka się zawór 15. Oprzyrządowanie transferu zawiera też przetwornik parametrów jakości medium roboczego Q (5-1) do wyznaczeniu współczynnika adiabaty (używany dla gazu).

Na podstawie zależności (11) dokonuje się obliczeń współczynnika kalibracji K_{wz}

$$K_{wz} = \frac{q_v \sqrt{1 - \beta^4}}{K_k \left(\frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_p}} \right)} \quad (12)$$

gdzie: q_v – natężenie objętościowego przepływu powietrza w EP podczas kalibracji za pomocą wzorca roboczego, ρ_p – gęstość powietrza przed zwężką w czasie kalibracji.

Wartość współczynnika K_k przy kalibracji transferu powietrzem przyjmuje się równy 1. Przy wyznaczaniu współczynnika kalibracji K_{wz} cykl wzorcowania powtarza się dla kilku wartości przepływów zadanych na stanowisku dzwonowym. Na podstawie (12) oblicza się współczynnik kalibracji K_{wz} jako funkcję liczby Reynoldsa Re posługując się wzorami:

$$q_{pE} = V_{pE} / \tau \quad (13)$$

$$q_v = q_{pE} \frac{p_{pE}}{p_{wz}} \frac{T_{wz}}{T_{pE}} \frac{Z_{wz}}{Z_{pE}} \quad (14)$$

$$\rho_p = \rho_{ps} \frac{p_{wz}}{p_s} \frac{T_s}{T_{wz}} \frac{Z_s}{Z_{wz}} \quad (15)$$

$$Re_D = \frac{4 q_v \rho_p}{\pi D \mu_p} \quad (16)$$

gdzie: V_{pE} , q_{pE} – objętość i przepływ objętościowy powietrza w warunkach pracy wytworzone przez wzorzec roboczy; τ – czas trwania przepływu danej objętości gazu; p_{pE} , T_{pE} , Z_{pE} – odpowiednio ciśnienie absolutne, temperatura i współczynnik ściśliwości powietrza w warunkach pracy wzorca roboczego; p_{wz} , T_{wz} , Z_{wz} – odpowiednio ciśnienie absolutne, temperatura i współczynnik ściśliwości powietrza w warunkach eksploatacyjnych transferu; ρ_{ps} , Z_s – wartości gęstości i współczynnika ściśliwości powietrza w warunkach znamionowych; μ_p – współczynnik lepkości dynamicznej powietrza w warunkach pracy transferu.

Aby podwyższyć dokładność pomiarów przeprowadzano indywidualną kalibrację wieloparametrowego przetwornika dostosowaną do warunków pracy transferu. W tab. 1 przedstawione są wyliczone średnie wartości parametrów \bar{q}_{Ei} , \bar{R}_{Ei} , \bar{K}_{Ei} dla każdej i -tej wartości przepływu gazu przez transfer przy wielokrotnym powtarzaniu wyznaczania współczynnika kalibracji K_{wz} oraz wyniki teoretycznych wartości tego współczynnika dla warunków eksperymentu. Błąd względny wyznacza się z ich różnicy

$$\delta_{ki} = \frac{\bar{K}_{wzi} - \bar{K}_{wzi}}{\bar{K}_{wzi}} \cdot 100\% \quad (17)$$

gdzie: \bar{K}_{wzi} , \bar{K}_{wzi} – średnie wartości współczynnika kalibracji otrzymane doświadczalnie i obliczone teoretycznie na podstawie wyników n pomiarów dla każdego i -tego przepływu – punkty na rys. 4.

Otrzymane wyniki wykazują, że błąd systematyczny δ_{ki} wzrasta wraz z maleniem liczby Re . Wyniki te dotyczą zakresu stosunkowo małych liczb Re ($0,4 \cdot 10^5$... $1,2 \cdot 10^5$) określonych przez parametry techniczne pracy wzorca roboczego RKDU-0,44, a zwłaszcza przez małe wartości ciśnienia roboczego nieprzekraczające 5 kPa. Jednakże ten zakres liczby Re jest dopuszczalny dla zastosowań pomiarowych przetworników przepływu gazu z wykorzystaniem różnicy ciśnień, ponieważ wg [12] dopuszczalna dla nich wartość $Re_{min} = 5000$.

Tab. 1. Wyniki wzorcowania i wyznaczone teoretycznie dane transferu wzorca przepływu gazu

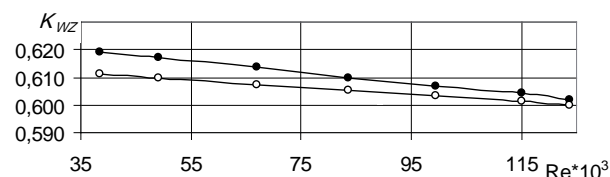
Tab. 1. Results of calibration and theoretically calculated data of the gas flow standard transfer

Nr badanego przepływu	\bar{q}_{Ei} m ³ /h	\bar{R}_{ei}	\bar{K}_{wz}	$\bar{K}_{wzt i}$	δ_{ki} %
1	154,01	38420	0,6190	0,6113	1,25
2	197,43	49190	0,6172	0,6097	1,21
3	269,34	67040	0,6135	0,6075	0,99
4	335,98	83480	0,6099	0,6054	0,73
5	401,54	99420	0,6068	0,6034	0,57
6	464,31	114990	0,6041	0,6012	0,47
7	499,29	123790	0,6017	0,5998	0,31

Rozbieżność między wynikami teoretycznymi i eksperymentalnie wyznaczonym współczynnikiem kalibracji dla zmian liczby Re z 38 420 do 123 790 przebiega w przedziale od 1,25 % do 0,31 %. Brak przecięcia się krzywych na rys. 4 wskazuje na obecność systematycznego błędu metody między obliczoną, a doświadczalnie ustaloną wartością współczynnika K_{wz} .

Natomiast zmniejszanie się błędu wraz z rosnącą liczbą Re wskazuje na prawidłowe podejście do określania współczynnika kalibracji transferu. Błąd systematyczny można zredukować przez indywidualną kalibrację. Wówczas zwiększy się dokładność wzorca w pomiarach objętości i przepływu objętościowego gazu oraz przy realizacji transferu przepływu. Na przykład krajowy etalon Ukrainy realizuje odwzorowanie i pomiary powietrza o parametrach w zakresie odpowiadającym warunkom eksploatacyjnym z nieusuwalnym błędem systematycznym $5 \cdot 10^{-4}$ i ze standardową niepewnością typu A równą $1 \cdot 10^{-3}$ [2]. Można więc na drodze eksperymentalnej wyznaczyć iloczyn $C\varepsilon$ (czyli współczynnik wzorcowania transferu) bardziej precyzyjnie niż z niepewnością 0,5 % wynikającą z obliczeń wg (4) i (5).

Po szeregowym podłączeniu omówionego transferu wzorca przepływu do innych typów urządzeń do pomiaru przepływu i objętości medium gazowego, w tym liczników turbinowych i rotorowych, realizuje się przeniesienie do nich wartości objętości i przepływu od wzorca państwowego lub wzorca wtórnego. Ponadto, połączenie szeregowo dwóch takich transferów umożliwia realizację procedury ich porównania.



Rys. 4. Charakterystyka wzorcowania transferu wartości wzorca przepływu gazu —•— dane eksperymentalne, —○— dane wyznaczone teoretycznie

Fig. 4. Calibration function of the transfer of the gas flow rate standard —•— experimental data, —○— theoretical data

5. Parametry metrologiczne transferu

Przy tworzeniu modelu metrologicznego należy uwzględnić dokładność wszystkich składników zależności (11) opisującej działanie transferu w rzeczywistych warunkach pracy podczas pomiarów. Podczas obliczania całkowitej niepewności pomiaru przepływu gazu naturalnego za pomocą transferu wyznacza się stopień oddziaływania każdego z parametrów przez pochodne cząstkowe i zakłada się brak korelacji między nimi, tj.:

$$u(q) = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial K_{wz}} \cdot u(K_{wz})\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial K_k} \cdot u(K_k)\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial d} \cdot u_B(d)\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial D} \cdot u_B(D)\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \Delta p} \cdot u_B(\Delta p)\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \rho} \cdot u(\rho)\right)^2} \quad (18)$$

gdzie: $\frac{\partial q}{\partial K_{wz}}$, $\frac{\partial q}{\partial K_k}$, $\frac{\partial q}{\partial d}$, $\frac{\partial q}{\partial D}$, $\frac{\partial q}{\partial \Delta p}$, $\frac{\partial q}{\partial \rho}$

– współczynniki wpływu do obliczenia odpowiednio niepewności parametrów K_{wz} , K_k , d , D , Δp , ρ , $u(K_{wz})$, $u(K_k)$, $u_B(d)$, $u_B(D)$, $u_B(\Delta p)$, $u(\rho)$ – standardowe niepewności wyznaczenia współczynników K_{wz} , K_k pomiaru parametrów d , D , Δp oraz obliczenia gęstości gazu naturalnego ρ .

Do oszacowania niepewności transferu stosuje się następujące oszacowania wartości parametrów geometrycznych eksperymentalnie wykonanego transferu i wartości wielkości wejściowych w warunkach jego pracy na gazie ziemnym: $\bar{d} = 43$ mm; $\bar{D} = 100$ mm; $\Delta \bar{p}_{\max} = 2,5$ kPa; $\bar{\rho}_s = 0,705$ kg/m³; $\bar{p} = 380$ kPa; $\bar{T} = 278$ K.

Najpierw ocenia się liczbowe wartości wszystkich niepewności składowych występujących w (18). Wykorzystując wyniki badań z [15] i metodę wyznaczania współczynnika kalibracji K_{wz} za pomocą wzorca realizowanego przez stanowisko dzwono-we, przyjmuje się wartość niepewności $u(K_{wz}) = 1,310 \cdot 10^{-3}$. Obliczania wartości $K_{wz} = C\varepsilon$ dokonuje się przez wyznaczenie z zależności (4) i (5) wartości współczynników $C = f(Re_D, \beta)$, $\varepsilon = f[\beta, k, (p_2/p_1)]$. Uwzględniając, że iloczyn $C\varepsilon$ dla transferu wyznacza się doświadczalnie [13], zaś wartości liczby Re charakteryzują przepływy powietrza na stanowisku wzorcowym o znanej wartości współczynnika β (określonej przez geometryczne wymiary transferu), można doświadczalnie otrzymać aproksymowane zależności $K_{vp} = C\varepsilon = f(Re_D)$ dla danej wartości wskaźnika adiabaty k i powietrza jako środowiska pracy. Rzeczywistą wartość współczynnika kalibracji transferu dla przepływu gazu ziemnego uzyskuje się wykorzystując eksperymentalnie uzyskaną wartość dla powietrza i koryguje się je następująco:

$$K_{wzg} = K_{wz} \cdot K_k \quad (19)$$

gdzie: K_{wzg} – rzeczywista wartość współczynnika K_{wz} dla pracy przy gazie ziemnym.

Współczynnik korekcyjny K_k uwzględnia wpływ rodzaju środowiska pracy dla rzeczywistych wartości wskaźnika adiabaty i stosunku ciśnień $\Delta p/p$ oraz ε wg (4).

Uwzględniając nieliniowość przy aproksymacji zależności $K_{wz} = f(Re_D)$ oraz brak takiej zależności dla obliczenia współczynnika korekcyjnego K_k , przy szacowaniu niepewności $u(K_k)$, wyznacza się minimalne i maksymalne warto-

ści K_{wz} , które mogą wystąpić podczas pracy transferu. Korzystając z wyników symulacji iloczynu $C\epsilon$ można ograniczyć zmiany wskaźnika adiabaty do zakresu 1,3–1,43 (obejmuje on wartości dla powietrza i gazu ziemnego przy ciśnieniu do 0,5 MPa i temperaturze 283 ± 10 K), jak również zakres liczb 106–108 dla strefy akceptowanej stabilności czynnika C . Dlatego też występujące w rzeczywistości wartości współczynnika K_{wz} znajdują się w przedziale 0,5667–0,5692 odpowiadającym zakresowi zmian współczynnika korygującego K_k . Wartości krańcowe oblicza się jako:

$$K_{k\min} = \frac{K_{wz\min}}{\bar{K}_{wz}} = 0,99779, \quad K_{k\max} = \frac{K_{wz\max}}{\bar{K}_{wz}} = 1,00220$$

gdzie \bar{K}_{wz} – średnia wartość z zakresu obliczonych wartości współczynnika $C\epsilon$.

Zakłada się też, że wartość tego współczynnika w zakresie jego zmian ma rozkład równomierny. Wówczas standardową niepewność pomiaru $u(K_k)$ wyznacza się jako typu B:

$$u(K_k) = \frac{K_{k\max} - K_{k\min}}{\sqrt{12}} = 1,2704 \cdot 10^{-3} \quad (20)$$

Według [4] wynik pomiaru średnicy otworu przetwornika pomiarowego (zweźki lub kryzy) nie powinien różnić się od średniej o więcej niż $\pm 0,05\%$, a wynik pomiaru średnicy wewnętrznej rury przepływomierza o zmiennym spadku ciśnienia – nie więcej niż $\pm 0,3\%$. Dlatego też, niepewności standardowe $u_B(d)$, $u_B(D)$ dla pomiarów średnicy otworu zweźki $\bar{d} = 43$ mm i średnicy wewnętrznej rury $\bar{D} = 100$ mm można wyznaczyć metodą typu B dla trójkątnego rozkładu wartości, powszechnie stosowanego dla pomiaru liniowych wymiarów obiektów cylindrycznych:

$$u_B(d) = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot \bar{d}}{100\sqrt{24}} = 8,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$u_B(D) = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot \bar{D}}{100\sqrt{24}} = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (21)$$

Szacunkowa wartość niepewności $u_B(\Delta p)$ dla pomiaru różnicy ciśnień na transferze z zastosowaniem miernika ciśnienia o klasie dokładności 0,1 ($\delta(\Delta p) = \pm 0,1\%$) i zakresie pomiarowym 2,5 kPa będzie:

$$u_B(\Delta p) = \frac{2 \cdot \delta(\Delta p) \cdot \Delta \bar{p}_{\max}}{100\sqrt{36}} = 0,833 \text{ Pa} \quad (22)$$

Całkowita niepewność $u(\rho)$ pomiaru gęstości gazu w warunkach pracy określa się na podstawie pomiarów pośrednich przy braku korelacji między wartościami parametrów użytych do obliczania gęstości gazu.

$$\rho = \rho_s \cdot \frac{p}{p_s} \cdot \frac{T_s}{T \cdot K} \quad (23)$$

Całkowita niepewność w warunkach pracy na stanowisku $u(\rho) = 2,212 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ [15].

Występujące w (18) współczynniki wpływu dla każdego z parametrów oblicza się z (11) jako pochodne cząstkowe. Otrzymane zależności i ich oszacowania liczbowe podano w tab. 2.

Dla wybranych wartości parametrów podanych w tabeli 2, obliczona z (11) wartość przepływu gazu w warunkach roboczych

$$q = 0,0353 \text{ m}^3/\text{s} \quad (127,08 \text{ m}^3/\text{h}) \quad (24)$$

Tab. 2. Niepewności parametrów transferu i ich współczynniki wpływu

Tab. 2. Uncertainties of standard transfer parameters and their influence coefficients

Parametry	Niepewności parametru	Współczynniki wpływu
$\bar{K}_{wz} = 0,56795$	$u(K_{wz}) = 1,310 \cdot 10^{-3}$	$\frac{\partial q}{\partial K_{wz}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\bar{E}_z \bar{d}^2 \bar{D}^2}{\sqrt{\bar{D}^4 - \bar{d}^4}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta \bar{p}}{\bar{\rho}}} = 6,199 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s};$
$\bar{K}_k = 0,99999$	$u(K_k) = 1,2704 \cdot 10^{-3}$	$\frac{\partial q}{\partial K_k} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\bar{K}_{wz} \bar{d}^2 \bar{D}^2}{\sqrt{\bar{D}^4 - \bar{d}^4}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta \bar{p}}{\bar{\rho}}} = 3,508 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s};$
$\bar{d} = 43 \text{ mm}$	$u_B(d) = 8,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$\frac{\partial q}{\partial d} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\bar{K}_{wz} \bar{K}_k \bar{d} \bar{D}^2}{\sqrt{\bar{D}^4 - \bar{d}^4}} \left(1 + \frac{\bar{d}^4}{\bar{D}^4 - \bar{d}^4} \right) \sqrt{\frac{2\Delta \bar{p}}{\bar{\rho}}} = 1,689 \text{ m}^2/\text{s}$
$\bar{D} = 100 \text{ mm}$	$u_B(D) = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}$	$\frac{\partial q}{\partial D} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\bar{K}_{wz} \bar{K}_k \bar{d}^2 \bar{D}}{\sqrt{\bar{D}^4 - \bar{d}^4}} \left(1 - \frac{\bar{D}^4}{\bar{D}^4 - \bar{d}^4} \right) \sqrt{\frac{2\Delta \bar{p}}{\bar{\rho}}} = 2,469 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
$\Delta \bar{p} = 2,5 \text{ kPa}$	$u_B(\Delta p) = 0,833 \text{ Pa}$	$\frac{\partial q}{\partial \Delta p} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\bar{K}_{wz} \bar{K}_k \bar{d}^2 \bar{D}^2}{\sqrt{\bar{D}^4 - \bar{d}^4}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\bar{\rho}\Delta \bar{p}}} = 7,016 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \cdot \text{s}/\text{kg}$
$\rho = 2,827 \text{ kg/m}^3$	$u(\rho) = 2,212 \cdot 10^{-3}$	$\frac{\partial q}{\partial \rho} = -\frac{\pi}{4} \cdot \frac{\bar{K}_{wz} \bar{K}_k \bar{d}^2 \bar{D}^2}{\sqrt{\bar{D}^4 - \bar{d}^4}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta \bar{p}}{2\bar{\rho}^3}} = 6,203 \cdot 10^{-3} \text{ m}^6/(\text{s} \cdot \text{kg})$

Po podstawieniu do (18) obliczonych niepewności standardowych i odpowiadających im wartości współczynników wpływu z tab. 2 otrzymuje się wartość standardowej niepewności pomiaru przepływu gazu ziemnego

$$u(q) = 9449 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

a względna standardowa niepewność całkowita

$$\delta u(q) = \frac{u(q)}{\bar{q}} \cdot 100 = \pm 0,267 \%. \quad (24)$$

Rozszerzoną niepewność pomiaru q za pomocą transferu oblicza się dla przyjętego poziomu ufności, np. $P = 0,95$ mnożąc wynik (25) przez współczynnik rozszerzenia $k_0 = 2$, tj.

$$U_r(q) = k_0 \delta u(q) = \pm 0,53 \%. \quad (25)$$

6. Wnioski

Opracowano metodę przekazywania wartości miary wzorca przepływu gazu ziemnego. Można ją stosować przy zmianach zarówno parametrów roboczych badanego gazu, jak i jego rodzaju. Dodatkową jej zaletą jest możliwość zapewnienia spójności pomiarów przy przejściu z objętościowego do masowego przepływu gazu z pominięciem wytycznych [16].

Proponowana koncepcja pozwala udoskonalić znane procedury, jak również rozwiązać zadanie techniczne realizacji nowej struktury systemu sprawdzań przyrządów do pomiaru natężenia przepływu objętości i masy gazu ziemnego, który można utworzyć przy zastosowaniu jednego państwowego lub pierwotnego wzorca przepływu objętości gazu.

Opracowano urządzenie – transfer do przekazywania wartości wzorca przepływu gazu ziemnego z zastosowaniem przepływomierzy o zmiennym spadku ciśnienia i przetestowano jego działanie. Dzięki temu możliwe jest stworzenie nowego typu standardowego wyposażenia pomiarowego (transferu i wzorce robocze) dla systemu sprawdzań gazomierzy wraz z uwzględnieniem optymalnego ich projektowania.

Na podstawie badań modelu tego transferu dokonano też aprobaty jego funkcjonowania. Pozytywne wyniki badań uzasadniły wystąpienie o przyznanie patentu Ukrainy [13].

Przedstawiona koncepcja budowy transferów wartości wzorca przepływu w oparciu o śledzenie ich charakterystyk metrologicznych spełnia też wymagania przepisów krajów SNP, w tym standardu Ukrainy [2].

Koncepcja ta może również znaleźć praktyczne zastosowanie w badaniach związanych z budową jednolitego europejskiego wzorca metra sześciennego gazu ziemnego [8].

Dokonano oszacowania niepewności pomiaru przepływu gazu z wykorzystaniem zaproponowanego transferu. Wykazano, że rozszerzona niepewność przepływu gazu ziemnego nie powinna przekroczyć $\pm 0,53 \%$. Jest to w pełni do zaakceptowania dla tego typu wzorcowych urządzeń pomiarowych.

Ogromnymi zaletami prezentowanego transferu w stosunku do podobnych przyrządów pomiarowych będzie wysoka niezawodność ze względu na brak części ruchomych w przetworniku pomiarowym, przenośność, a także możliwość bezpośredniego pozyskiwania miary objętościowego przepływu powietrza od etalonu państwowego lub wzorca kontrolne-

go i możliwość pracy zarówno z powietrzem, jak i z gazem ziemnym jako medium roboczym.

Publikacja ta, poza zapoznaniem Czytelnika z oryginalnym ukraińskim opracowaniem transferu wzorca przepływu gazu, może być pomocna w doskonaleniu systemu nadzoru metrologicznego systemu sprawdzań gazomierzy w Polsce [3] oraz w jego porównaniach międzynarodowych w ramach Unii Europejskiej i z innymi krajami ościennymi.

Bibliografia

1. Pistun E.P., Chehovskiy S.A., Seredyuk O.E., Goncharuk M.I., *Naukowe podstawy stworzenia prawnej i technicznej bazy kontroli racjonalnego wykorzystania gazu ziemnego* [Науківі основи створення нормативної та технічної бази контролю раціонального використання природного газу]. „Наука та інновації” 2005. T.1, № 1, 150–166 (w języku ukraińskim).
2. *Метрологія. Державна повітряна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу*, (Ukraińska norma państwowa schematu sprawdzania objętości i przepływu gazu) ДСТУ 3383: 2007.– (obowiązuje od 2007.07.01), Держспоживстандарт України, 2007. – III, 9 с.
3. PN-EN ISO 5167, *Pomiary strumienia płynu za pomocą zwęzek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym*. Części 1 do 4 :2005.
4. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009(ISO 5167-2:2003, NEQ). *Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв*. Частина 2. *Діафрагми*. Технічні вимоги. – (obowiązuje od 2010.04.01). Держспоживстандарт України, 2011. – IV, 43 с.
5. Gerasimov A.P., Iwanow V., Krasavin V.M. et al, *The Area of Application of Laval Nozzles in Flow-Rate Measurement Technique*. [Zakres zastosowania dysz Lavalowa w technice pomiarów przepływu] „Measurement Techniques” (Springer), 2005 Vol. 48, No 4, 381–387. Translated from: *Izmeritel'naja Tekhnika* 2005, № 4, 48–52.
6. Kolpak B.D., Kruk O.P., Seredyuk O.E. et al, *Metrological certification of a piston flowmeter for natural gas flows/ Metrologiczna certyfikacja tłokowego stanowiska do pomiarów przepływu gazu ziemnego/*. Measurement Techniques, 1995, vol. 38, no. 11, 1249–1253. Translated from “Izmeritel'naja Tekhnika”, 1995. № 11. 28 –30.
7. Petryshyn I.S., Seredyuk O.E.: *Технічне забезпечення звіряння еталонів об'єму та витрати газу, Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2001. № 1. 49–51 (w języku ukraińskim).
8. Dopheide D., Mickan B., Kramer R. et al, *The International World Reference Value for High Pressure Natural Gas Flow*. Metrologiya ta vimiryuvalna tehnika (Metrologiya 2006: Prace naukowe V Międzynarodowej Konferencji naukowo-technicznej Tom 1. Charków, 2006. Institut Metrologii, 15–25.
9. Seredyuk O., Vitvitskiy L., Vinnichuk A., Warsza Z., *Metoda wyznaczenia parametrów metrologicznych gazomierza domowego*, „Gaz Woda i Technika Sanitarna”, 9/2011, 7–10.

10. Seredyuk O., Vynnychuk A., Vitvitskiy L., Warsza Z., *Budowa, analiza i ocena niepewności pomiarów zestawu kalibracyjnego do sprawdzania gazomierzy u użytkownika*. „Pomiary Automatyka Kontrola”, 2012, №1 (vol. 58), 9–14.
11. Seredyuk O., Vynnychuk A., Vitvitskiy L., Warsza Z., *Wyznaczanie parametrów metrologicznych gazomierza domowego bez jego demontażu*, „Polski Instalator” 11/2011, 44–51.
12. Norma GSOEI. *Pomiar natężenia przepływu i objętości cieczy i gazów za pomocą wzorcowych urządzeń zwężających. Część 2. Membrany. Techniczne wymagania* (ISO 5167-2:2003): Standard 8.586.2 – 2005 r. [wprowadzony 01.01.2008]. M.: Standartinform, 2007. – IV, 38. (Interstate Standard).
13. Seredyuk O.E., Crook I.S., Rudko V.P. et al, Pat. nr 25 208 U Ukraina, IPC (2006) G01F25/00. *Wzorzec przekazywania jednostki objętości masy i zużycia gazu ziemnego* [Еталон передавання одиниці об'єму, маси та витрати природного газу] № u 2007 04218; zgłoszenie 16.04.07, wyd. 25.07.07, Bull. No 11.
14. Brodin I.S., Seredyuk O.E.: *Improved functional algorithm and design for Bell-type flowmeters*. [Poprawa algorytmu pracy i konstrukcji dzwonowego stanowiska do pomiarów przepływu] Measurement Techniques (Springer), 1989, vol. 32, no 5, 437–440 Translated from „Izmeritel'naja Technika” 1989. № 5. 24–26
15. Seredyuk O.E., *Аналіз невизначеності вимірювань при передаванні одиниці витрати природного газу / O.E. Середюк, Л.А. Витвицька // Методи та прилади контролю якості*. – 2006. № 17. 58–62.
16. Norma GSOEI. *Podstawowy standard państwowy i schemat sprawdzeń za pomocą pomiaru przepływu masowego gazu w zakresie od $4 \cdot 2/10 \dots 2,5 \cdot 10^2$ kg/GOST 8.369–79*. – [Wprowadzony 01.01.1981]. Moskwa: Изд-во стандартов (Wydawnictwo Norm), 1980.
17. Piotrowski J., Kostyrko K., *Wzorcowanie aparatury pomiarowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
18. Wright J.D., *What is the “best” transfer standard for gas flow?* [www.cstl.nist.gov].
19. Wright J.D., *Laboratory Primary Standards in Flow Measurement. Practical Guides for Measurement and Control*. 2nd edition, Spitzer D.W. (ed.), The Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, North Carolina, 2001, 731–760.
20. Wright J.D., Johnson A.N., Moldover M.R., *Design and Uncertainty Analysis for a PVTt Gas Flow Standard*, NIST J. of Res., 2003. ■

Transfer of standard values for measurement of natural gas rate

Abstract: The methodological study and technical solution for creation the transmission of standard values of the natural gas consumption using variable differential pressure flow meters were proposed and justified. The possibility of transferring of the standard gas flow rate values for natural gas consumption measurements taken from the State standard (etalon) or from the second level reference standards in the State verification system with taking

to consideration changes of gas parameters and type of working medium (air or natural gas) were conducted. The experimental verification of the designed transfer unit model based on Laval type nozzle and the bell calibration stand to create the working standard was held. Uncertainty and its components for measurement of the natural gas flow by this transfer are estimated.

Keywords: standard of gas flow, natural gas, transfer, bell type calibration stand, uncertainty

Prof. dr hab. inż. Orest E. Seredyuk

Uzyskał stopień kandydata nauk technicznych w 1990 r. i doktora nauk technicznych (habilitacja) w 2009 roku, profesor Katedry „Metody i narzędzia kontroli jakości i certyfikacji produktów” w Iwano-Frankowskim Narodowym Uniwersytecie Technicznym Nafty i Gazu (IFNTUNG), Ukraina. Tematyka naukowa: opracowanie i badania urządzeń kalibracyjnych do pomiaru przepływu i objętości powietrza i gazu ziemnego oraz metrologiczne właściwości liczników i przepływomierzy



Autor ponad 150 publikacji naukowych, w tym 30 patentów i 2 przewodników.

e-mail: feivt@nung.edu.ua

mgr inż. Vitalij V. Malisevich

Inżynier fizyk o specjalności „Przyrządy i systemy badań nieniszczących” w 2008 r. ukończył studia i zdobył dyplom specjalisty (inżyniera) w Iwano-Frankowskim Narodowym Uniwersytecie Technicznym Nafty i Gazu (IFTUNG) na Ukrainie. Aspirant na studiach doktoranckich w Katedrze „Metody i przyrządy kontroli jakości i certyfikacji produkcji” tej uczelni.



Kierunek badań naukowych: przyrządy do diagnostyki i kontroli stanu technicznego liczników i mierników przepływu gazu, badania metrologiczne gazomierzy. Autor 15 publikacji naukowych.

e-mail: feivt@nung.edu.ua

doc. dr inż. Zygmunt L. Warsza

Ukończył Miernictwo Elektryczne na Politechnice Warszawskiej 1959, doktorat 1967, docent 1970. Praca: Instytut Elektrotechniki 1958–63 (i 1994–95), Politechnika Warszawska 1960–70; zorganizował i prowadził: Wydział Transportu Politechniki Świętokrzyskiej (dziekan 1970–76), Ośrodek Aparatury Pomiarowej IMGW 1978–82, Zakład Automatykacji i Techniki Pomiarowej Instytutu Chemii Przemysłowej 1983–91. Doradca Ministra Edukacji Narodowej 1992–94. W latach 1983–92 i 1994–2002 wykładał na Politechnice Radomskiej metrologię i diagnostykę techniczną. Obecnie: w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Specjalista z kilku dziedzin pomiarowych. Autor ok. 170 publikacji, 2 monografii, wielu prac badawczych, konstrukcyjnych i patentów, promotor 2 doktorantów.



e-mail: zlw@op.pl