

Wzorcowanie stanowisk z kontrolnymi zbiornikami dzwonowymi w zakresie małych dawek pomiarowych

Calibration of bell prover in the small volumes range

J. Wildner, A. Zadworny (Główny Urząd Miar)

M. Turkowski, M. Szudarek, A. Szczeki (Politechnika Warszawska)

W artykule przedstawiono metodę wzorcowania stanowisk z kontrolnymi zbiornikami dzwonowymi, opartą na zastosowaniu dysz Venturiego o przepływie krytycznym, jako wzorców pośredniczących. Zaproponowana metoda pozwala na wzorcowanie dawek pomiarowych o objętości od ok. 5 dm³, z niepewnością mniejszą niż 0,2 %.

This article describes proposed method, based on the Venturi sonic nozzles as a transfer standard for bell prover calibration. The method ensures a detailed evaluation of the displaced volume for doses, approximately 5 dm³, with an uncertainty better than 0,2 %.

Wprowadzenie

Dysze Venturiego o przepływie krytycznym są dobrze poznane i stosowane między innymi jako wzorce dla gazomierzy [1]. Dysze o przepływie krytycznym charakteryzują się stosunkowo dobrą dokładnością, powtarzalnością pomiaru i niezawodnością. Najczęściej pomiar strumienia masy gazu przepływającego przez dyszę o przepływie krytycznym realizowany jest w oparciu o normę PN-EN ISO 9300 [2] i opiera się na pomiarach geometrii tej dyszy. Jednak w przypadku najmniejszych dysz konieczne jest wzorcowanie dysz Venturiego o przepływie krytycznym w oparciu o inne metody [3].

Kontrolne zbiorniki dzwonowe są jednym z podstawowych wzorców służących do przekazywania jednostki objętości przepływu i strumienia objętości gazu. Znajdują się na wyposażeniu większości laboratoriów wzorcujących w dziedzinie przepływu gazu oraz w niektórych punktach legalizacyjnych gazomierzy. Najczęściej stanowiska te wzorcowane są metodą objętościową (poprzez zastosowanie kolb pomiarowych), metodą geometryczną lub przy zastosowaniu gazomierzy, jako wzorców pośredniczących.

Pracownicy Samodzielnego Laboratorium Przepływów Głównego Urzędu Miar, we współpracy z Instytutem Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej, podjęli się opracowania nowej metody wzorcowania kontrolnych zbiorników dzwonowych przy zastosowaniu dysz Venturiego o przepływie krytycznym, jako wzorca pośredniczącego.

Polskie akredytowane laboratoria pomiarowe w dziedzinie przepływu gazu deklarują CMC (Calibration and Measurement Capabilities) dla stanowisk z kontrolnymi

zbiornikami dzwonowymi na poziomie od ok. 0,2 % do ok. 0,6 % (w zależności od obiektu wzorcowania i zakresu pomiarowego), natomiast niepewność stanowisk znajdujących się w punktach legalizacyjnych nie może przekraczać wartości od 0,33 % do 1,00 % [4]. W artykule wykazano, że zaproponowana metoda pozwala na poprawienie niepewności podczas wzorcowania zbiorników dzwonowych, szczególnie w zakresie małych dawek pomiarowych, przy jednoczesnym skróceniu czasu pomiaru.

Wzorcowanie kontrolnych zbiorników dzwonowych – przegląd metod

Do najczęściej stosowanych metod wzorcowania kontrolnych zbiorników dzwonowych należą metody geometryczna i objętościowa.

Dotychczas w Polsce najczęściej stosowaną metodą wzorcowania kontrolnych zbiorników dzwonowych była metoda objętościowa (wzorcowanie za pomocą kolby pomiarowej). Podczas wzorcowania zbiornika dzwonowego odmierzane są dawki pomiarowe równe wielokrotności objętości kolby. Metoda ta uwzględnia indywidualne cechy stanowiska, m.in. takie jak niedoskonałość kompensacji ciśnienia i poziomu cieczy pod dzwonem, czy grubość filmu oleju pokrywającego powierzchnię dzwonu. Wadą tej metody jest jej czasochłonność (wzorcowanie zbiornika o objętości 0,2 m³ może zająć dwóm pracownikom od 2 do 5 dni) oraz wielkość dawek pomiarowych (są równe objętości kolby), na podstawie których wyznaczona jest charakterystyka zbiornika dzwonowego.

Metoda geometryczna polega na wyznaczeniu objętości zbiornika dzwonowego na podstawie jego wymiarów. Jest to najdokładniejsza z wymienionych metod,



Rys. 1. Układ z kolbą pomiarową 25 dm³ – wzorcowanie stanowiska z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym metodą objętościową

jednak związane są z nią liczne ograniczenia. W celu wykonania pomiarów konieczne jest zdemontowanie stanowiska, a także uwzględnienie szeregu czynników, m.in. takich jak: zmiana poziomu oleju w zbiorniku stałym i ciśnienia pod zbiornikiem dzwonowym w trakcie trwania pomiaru (wynikające z niedoskonałej kompensacji), niewłaściwe wyważenie zbiornika dzwonowego oraz grubość filmu olejowego pokrywającego jego powierzchnię. Trudności z przeprowadzeniem wzorcowania oraz uwzględnieniem ww. czynników powodują, że metodą tą wzorcowane są przede wszystkim nowe stanowiska najwyższego rzędu. W praktyce złożoność pomiaru wyklucza możliwość stosowania jej do ponownego wzorcowania kontrolnych zbiorników dzwonowych.

Duże zbiorniki dzwonowe o objętości ponad 600 dm³ mogą być również wzorcowane przy pomocy gazomierzy rotorowych lub turbinowych jako wzorców pośredniczących. Charakterystykę dzwonu wyznacza się porównując dawki odmierzone przez stanowisko dzwonowe oraz przyrząd wzorcowy. Zastosowanie gazomierzy pozwala przeprowadzić wzorcowanie w warunkach użytkowania (stanowisko dzwonowe zachowuje się jak podczas codziennej pracy). Wady metody to nieliniowość charakterystyk, długi rozruch, względnie mała rozdzielczość gazomierzy oraz odtwarzalność pomiaru.

Wśród wzorców pośredniczących można wymienić również gazomierze miechowe, bębnowe oraz przepływomierze. Jednak stosując je, uzyskuje się dużo gorsze niepewności.

Zastosowanie dysz Venturiego do wzorcowania zbiorników dzwonowych

Wzorcowanie dysz Venturiego

Dysze Venturiego o przepływie krytycznym są szczególnym rodzajem zwężek, w których prędkość gazu rośnie (wraz ze wzrostem różnicy ciśnień przed oraz za dyszą) aż do osiągnięcia prędkości krytycznej w gardzieli, która równa jest miejscowej prędkości dźwięku [2]. Przy prędkości krytycznej strumień masy gazu przepływającego przez dyszę osiąga maksymalną możliwą wartość w warunkach występujących po stronie dopływowej i proporcjonalną do ciśnienia przed dyszą.



Rys. 2. Dysza Venturiego z gardzielą toroidalną

Wartość poprawnego strumienia objętości realizowanego przez dyszę Venturiego o przepływie krytycznym można wyznaczyć na podstawie objętości powietrza zmierzonej przez wzorzec i czasu trwania pomiaru, przeliczając warunki wzorcowego zbiornika dzwonowego na warunki bazowe dyszy Venturiego [3]:

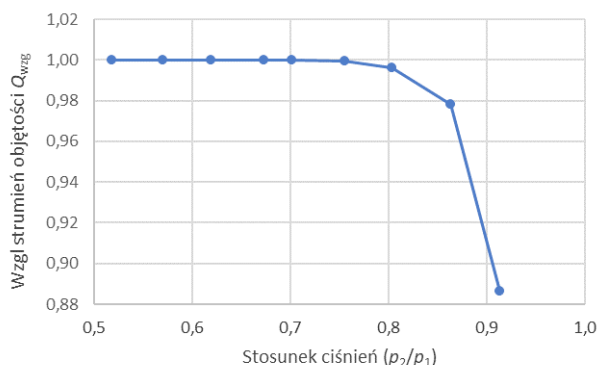
$$Q_c = \frac{V_c \cdot p_c \cdot T_1}{\tau \cdot p_1 \cdot T_c} \cdot \frac{1}{1 + 0,169 \cdot x_v} \cdot \sqrt{\frac{293,15}{T_1}} \quad (1)$$

$$x_v = \frac{1}{p_1} \left(1,00062 + 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot p_1 + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot (T_1 - 273,15)^2 \right) \cdot \exp(k_{T_1}) \cdot 10^{-2} \cdot \frac{h}{100} \quad (2)$$

$$k_{T_1} = 1,2811805 \cdot 10^{-5} \cdot T_1^2 - 1,9509874 \cdot 10^{-2} \cdot T_1 + 34,04926034 - 6,3536311 \cdot 10^3 \cdot T_1^{-1} \quad (3)$$

gdzie:

V_c – objętość odmierzona przez wzorzec,
 T_c – bezwzględna temperatura pod dzwonem,
 T_1 – bezwzględna temperatura przed dyszą Venturiego,
 p_c – bezwzględne ciśnienie pod dzwonem,
 p_1 – bezwzględne ciśnienie przed dyszą Venturiego,
 τ – czas trwania pomiaru,
 h – wilgotność względna.



Rys. 3. Charakterystyka dyszy Venturiego $Q_{nom} = 800 \text{ dm}^3/\text{h}$, gdzie Q_{wzg} określone jest jako stosunek chwilowego strumienia objętości do strumienia objętości zmierzonego przy minimalnym stosunku ciśnień (p_2/p_1)

W przeprowadzonych badaniach zastosowano m.in. dyszę Venturiego o przepływie krytycznym o strumieniu nominalnym $800 \text{ dm}^3/\text{h}$, którą wywzorcowano na stanowisku odniesienia GUM jednostki objętości przepływu i strumienia objętości gazu, otrzymując poprawną wartość strumienia objętości, odpowiadającą zadany wartościom ciśnienia przed dyszą p_1 , którą określono wzorem:

$$Q_c = 0,1558p_1 + 748,97$$

Kluczowym parametrem opisującym dyszę Venturiego jest krytyczny stosunek ciśnień $(p_2/p_1)_{cr}$, określony jako stosunek bezwzględnego ciśnienia gazu na wlocie dyszy p_2 do bezwzględnego ciśnienia gazu na wlocie dyszy p_1 , po przekroczeniu którego zmiana stosunku ciśnień nie wpływa na zmianę strumienia objętości przepływającego przez dyszę powietrza. Jeżeli zostanie spełniony warunek:

$$\frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{cr} \quad (4)$$

to przepływ przez dyszę będzie zależał tylko od warunków poprzedzających i będzie on proporcjonalny do

stałego ciśnienia przed dyszą [3]. Cecha ta sprzyja zastosowaniu dysz jako wzorców pośredniczących podczas wzorcowania stanowisk z kontrolnymi zbiornikami dzwonowymi.

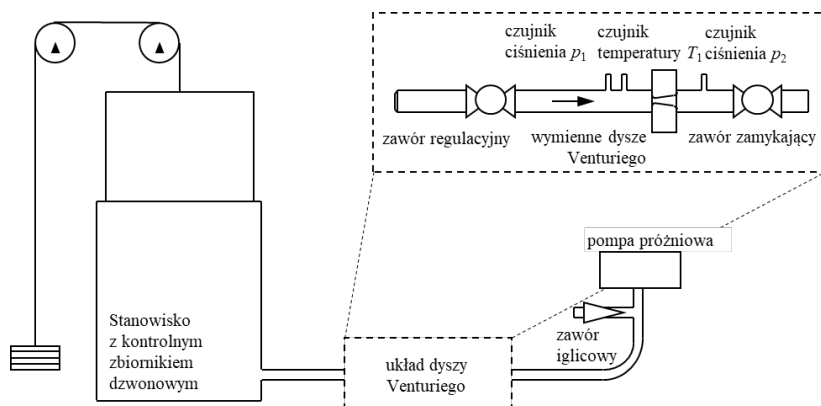
Na podstawie przeprowadzonego badania oszacowano wartość krytycznego stosunku ciśnień $(p_2/p_1)_{cr} \approx 0,70$. W sprawdzonym zakresie $(p_2/p_1) \leq 0,70$ wartość strumienia objętości nie zmieniała się więcej niż o 0,02 %.

Wzorcowanie zbiornika dzwonowego

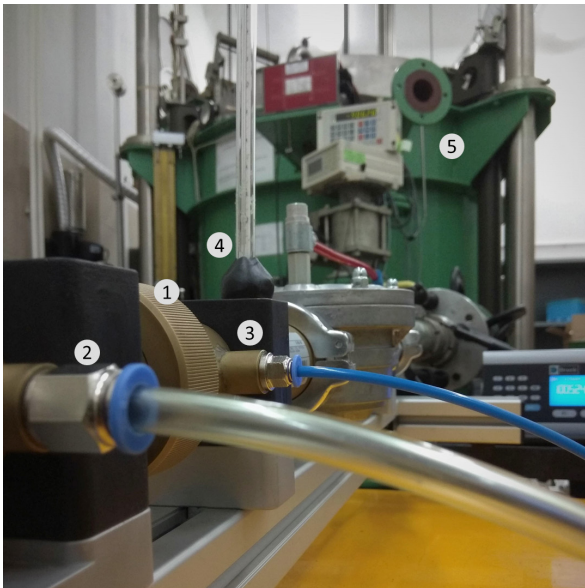
Podczas badań przeprowadzono wzorcowanie stanowiska z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym o objętości nominalnej 200 dm^3 za pomocą kolby pomiarowej o objętości nominalnej 25 dm^3 (metoda referencyjna) oraz za pomocą dyszy Venturiego o przepływie krytycznym o strumieniu nominalnym $800 \text{ dm}^3/\text{h}$.

Do stanowiska z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym (rys. 4) podłączono układ dyszy Venturiego, za którym zamontowano pompę próżniową, wymuszającą przepływ powietrza w układzie oraz zawór iglicowy służący do regulowania ciśnienia za dyszą p_2 . Układ dyszy Venturiego składał się z ograniczonego zaworami odcinka pomiarowego z zamontowaną dyszą Venturiego oraz czujnikami ciśnienia i temperatury [2]. Do pomiaru ciśnienia wewnątrz stanowiska z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym p_c oraz przed dyszą p_1 użyto ciśnieniomierza o rozdzielczości 1 Pa oraz niepewności złożonej 3 Pa , natomiast ciśnienie za dyszą p_2 mierzono z rozdzielczością 10 Pa i niepewnością złożoną 20 Pa (p_2 nie wchodzi do równania pomiaru). Pomiaru temperatury w kontrolnym zbiorniku dzwonowym T_c oraz przed dyszą T_1 dokonano termometrami o rozdzielczości $0,01 \text{ K}$ i niepewności złożonej $0,03 \text{ K}$.

Rzeczywistą objętość dzwonu wyznaczono na podstawie wzorcowego strumienia objętości realizowanego przez dyszę Venturiego i czasu trwania pomiaru, przekształcając równanie (1):



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego

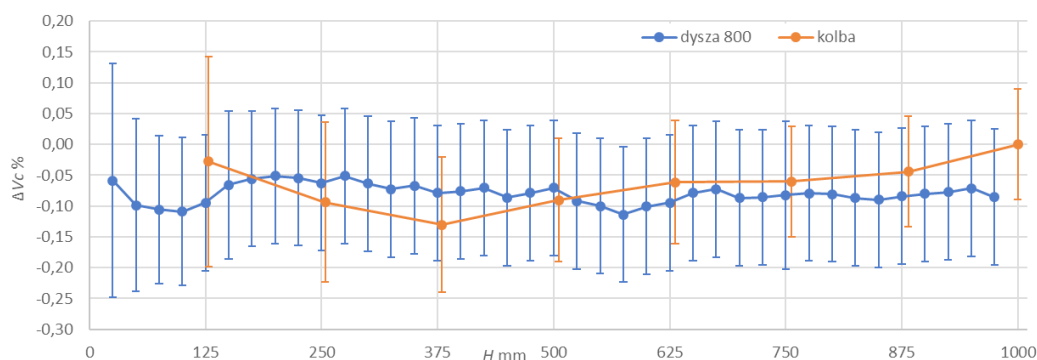


Rys. 5. Układ dyszy Venturiego podłączony do stanowiska z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym: 1 – gniazdo dyszy Venturiego, 2 – podłączenie czujnika ciśnienia za dyszą, 3 – podłączenie czujnika ciśnienia przed dyszą, 4 – termometr, 5 – stanowisko z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym

$$V_c = Q_c \cdot \tau \cdot \frac{p_1 \cdot T_c}{p_c \cdot T_1} \cdot (1 + 0,169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{T_1}{293,15}} \quad (5)$$

Na stanowisku dzwonowym, wykorzystanym w badaniach, dawki odmierzane są za pomocą listwy cyfrowej o rozdzielczości 0,01 mm, na stałe przymocowanej do zbiornika dzwonowego. Podczas wzorcowania zbiornika dzwonowego kolbą pomiarową jego charakterystykę wyznaczono sumując kolejne dawki pomiarowe. W celu umożliwienia analizy porównawczej wyniki wzorcowania, przeprowadzonego za pomocą dysz Venturiego, przedstawiono w analogicznej formie.

W poszczególnych punktach charakterystyki badanego stanowiska objętość kolejnych dawek wyznaczonych za pomocą kolby pomiarowej oraz dyszy Venturiego nie różniły się więcej niż o 0,07 %.



Rys. 6. Porównanie charakterystyk stanowiska z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym, uzyskanych za pomocą kolby oraz dyszy Venturiego, H – zmiana położenia zbiornika dzwonowego, ΔV_c – różnica między objętością dawek, wyznaczoną jedną z badanych metod a liniową charakterystyką dzwonu

Podczas wzorcowania kolbą pomiarową najmniejsza wyznaczona dawka wynosiła 25 dm³. Jeżeli laboratorium podczas wzorcowania stosuje dawki mniejsze, to ich objętość szacowana jest przy pomocy regresji liniowej. W przypadku badanego stanowiska dowiedziono, że takie rozwiązanie jest uzasadnione. Jednak zastosowanie podczas wzorcowania dyszy Venturiego pozwoliło wyznaczyć dokładne wartości dawek w zakresie od 5 dm³.

Niepewność pomiaru

Złożoną niepewność standardową V_c wyznaczenia poprawnej wartości objętości stanowiska z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym, zgodnie z zaleceniami [5, 6], można przedstawić w postaci:

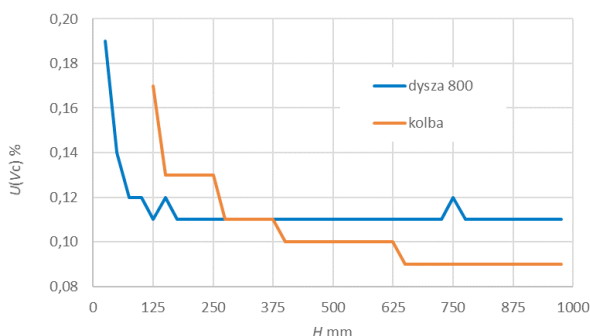
$$u(V_c) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_c}{\partial Q_c} \cdot u(Q_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial \dot{A}} \cdot u(\dot{A})\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial p_c} \cdot u(p_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial T_1} \cdot u(T_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial p_1} \cdot u(p_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial T_c} \cdot u(T_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial h} \cdot u(h)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial \delta V_c} \cdot u(\delta V_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial \delta V} \cdot u(\delta V)\right)^2} \quad (6)$$

gdzie:

- $u(Q_c)$ – niepewność standardowa związana z wyznaczeniem poprawnego strumienia objętości realizowanego przez dyszę Venturiego,
- $u(t)$ – niepewność standardowa związana z pomiarem czasu,
- $u(p_c)$ – niepewność standardowa związana z pomiarem ciśnienia bezwzględnego na stanowisku z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym,
- $u(T_c)$ – niepewność standardowa związana z pomiarem temperatury na stanowisku z kontrolnym zbiornikiem dzwonowym,
- $u(p_1)$ – niepewność standardowa związana z pomiarem ciśnienia bezwzględnego przed dyszą Venturiego,
- $u(T_1)$ – niepewność standardowa związana z pomiarem temperatury przed dyszą Venturiego,



- $u(h)$ – niepewność standardowa związana z pomiarem wilgotności przed wzorcowaną dyszą Venturiego,
- $u(\delta V_{ci})$ – niepewność standardowa związana z brakiem powtarzalności wskazań między seriami pomiarowymi,
- $u(\delta V)$ – niepewność standardowa związana z nieszczelnością układu pomiarowego.



Rys. 7. Wartości niepewności rozszerzonych $U(V)$, wyznaczonych podczas wzorcowania za pomocą kolby pomiarowej oraz dyszy Venturiego

Niepewność wyznaczenia poprawnej objętości zbiornika dzwonowego przy pomocy dyszy Venturiego, dla dawek powyżej 100 dm^3 , jest porównywalna lub nieznacznie gorsza (ok. $0,01\% - 0,02\%$) względem niepewności uzyskanych podczas wzorcowania kolbą pomiarową. W przypadku stosowania dawek z zakresu do 50 dm^3 , wzorcowanie dyszą pozwoliło poprawić niepewności w stosunku do wzorcowania kolbą o około $0,01\% - 0,06\%$.

Należy nadmienić, że na niepewność wzorcowania stanowiska dzwonowego ma wpływ wiele czynników, między innymi: warunki środowiskowe (w szczególności zmiany ciśnienia atmosferycznego podczas pomiarów), rozdzielczość i powtarzalność stanowiska, płynność pracy dzwonu, zachowywanie właściwych procedur podczas wzorcowania.

Warunki, w których przeprowadzono opisane badania, były tak dobrane, aby zminimalizować wpływ wyżej wymienionych zakłóceń. Jednak w praktyce, podczas wzorcowania stanowisk z kontrolnymi zbiornikami dzwonowymi w laboratoriach wzorcujących lub punktach legalizacyjnych, wielu źródeł niepewności nie można uniknąć, choć niekiedy mają one znaczący wpływ na niepewność pomiaru.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania dowiodły, że wzorcując stanowiska z kontrolnymi zbiornikami dzwonowymi za pomocą dysz Venturiego można uzyskać porównywalne do innych metod wyniki przy znacznie mniejszych nakładach (czas pomiaru oraz ilość osób zaangażowanych w pomiar).

Szczególne znaczenie dla laboratoriów może mieć możliwość precyzyjnego wyznaczenia dawki objętości od około 5 dm^3 , położonej w dowolnym fragmencie dzwonu, przy niepewności mniejszej niż $0,2\%$.

Literatura

- [1] Turkowski M., Błędy wzorcowania gazomierzy i przepływomierzy gazu na stanowiskach z dyszami krytycznymi, PAR nr 1 (1998), s. 27-29.
- [2] PN-EN ISO 9300: Pomiary strumienia masy gazu za pomocą dysz Venturiego o przepływie krytycznym.
- [3] Wendt G. i in., PTB Testing Instructions. Volume 25. Gas meters – Test rigs with critical nozzles, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2000, Braunschweig.
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 12 stycznia 2005 r. w sprawie tworzenia punktów legalizacyjnych.
- [5] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100: 2008.
- [6] Wyznaczanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu, EA-4/02 M:2013.