

Jerzy SZULIKOWSKI
Politechnika Śląska

ANALIZA METROLOGICZNA ASPIRACYJNEJ SONDY ZEROWEJ PYŁOMIERZA GRAWIMETRYCZNEGO P-10ZA

Streszczenie. W artykule przedstawiono efekty prac dotyczących zagadnienia dokładności pobierania pyłu w próbce zapyłonego gazu w odniesieniu do aspiracyjnej sondy zerowej pyłomierza grawimetrycznego P-10ZA. Dokonano opisu matematycznej zależności aproksymacyjną, tzw. charakterystyki poboru sondy zerowej, będącej efektem eksperymentalno-obliczeniowej metody badawczej. Opracowano program komputerowy służący do obliczania błędu poboru poszczególnych frakcji pyłu w pobranej próbce i stąd - rzeczywistych stężeń frakcyjnych i stężenia całkowitego pyłu w gazie w kanale dla pomiaru grawimetrycznego dokonywanego pyłomierzem P-10ZA. Przedstawiono przykład obliczeniowy, uzyskany w wyniku zastosowania opracowanego programu komputerowego.

METROLOGICAL ANALYSIS OF THE PRESSURE BALANCE – TYPE ASPIRATION PROBE OF THE GRAVIMETRIC DUST SAMPLER P-10ZA

Summary. In the paper, the results were presented of the works on the problem of accuracy of sampling particulate matter from ducted gas for the case of the performance of the pressure balance-type aspiration probe being a part of the gravimetric sampler P-10ZA. A so-called sampling characteristic of the pressure balance-type probe was described by an approximation function, this characteristic being a result of an experimental and computational method applied. A computer programme was developed which serves to calculate the sampling error of particular dust fractions present in the drawn gas sample, and thus to determine true total and size fractional concentrations of the gas, while carrying out gravimetric measurement by means of the P-10ZA sampler. An example of calculation made using the computer programme developed was presented.

1. Wstęp

Dokładność (reprezentatywność) pobierania pyłu w próbce zapyłonego gazu zasysanego sondą aspiracyjną pyłomierza jest ważnym zagadnieniem w grawimetrycznych pomiarach zapylenia gazów w kanałach przepływowych.

Przyjmowane powszechnie założenie, że reprezentatywność poboru zachodzi dla cienkościennych końcówek aspiracyjnych przy poborze izokinetycznym jest pewnym przybliżeniem [1]. Nawet bowiem dla tych warunków geometrycznych i kinetycznych lepkość gazu i ścianki końcówki powodują zaburzenie przepływu i odmienność trajektorii cząstek pyłu i gazu w rejonie otworu wlotowego sondy. W rezultacie powoduje to określoną rozbieżność w stężeniach frakcyjnych i całkowitych w pobranej próbce (w sondzie) i w strumieniu głównym w przepływie niezaburzonym.

Dla konkretnej sondy, błąd poboru fazy stałej jest tym większy, im warunki zasysania bardziej odbiegają od izokinetycznych.

Znajomość dokładności poboru dla konkretnych sond ma szczególnie duże znaczenie w przypadku pomiarów dokładnych, jak np. stosowanych we wzorcowaniu pyłomierzy opartych na pośredniej metodzie pomiaru czy w pomiarach arbitrażowych.

Aby dokładność poboru dla danej sondy mogła być określona, niezbędne jest poddanie jej badaniom posługującym się odpowiednią metodą.

2. Metoda badawcza

Opracowana w tym celu metoda badawcza, szczegółowo przedstawiona w [1-3], o użytecznym przeznaczeniu prowadzi do odpowiedzi na pytanie: jak w stosunku do stężeń pyłu w kanale kształtują się stężenia frakcyjne w próbce aerozolu pobranej sondą przy określonych kinetycznych warunkach poboru i właściwościach fizycznych transportowanego kanałem zapyłonego gazu?

Posługuje się ona technikami badawczymi z dziedziny aerodynamiki i mechaniki aerozoli i polega na:

- pomiarowo-obliczeniowym ustaleniu pola prędkości gazu w rejonie wlotu do sondy,
- obliczeniowym ustaleniu trajektorii różnych cząstek stałych i stąd - dokładności ich poboru,

- sformułowaniu uogólnionej zależności pomiędzy dokładnością poboru poszczególnych frakcji pyłu a wielkościami bezwymiarowymi charakteryzującymi zjawisko zasysania układu dwufazowego przez sondę, tj. charakterystyki poboru.

W metodzie tej pomiary pola prędkości gazu przeprowadza się na stanowisku z tunelem aerodynamicznym i obejmują one dyskretne pole składowej osiowej prędkości gazu. Ustalenie pola składowej promieniowej prędkości gazu oraz trajektorii cząstek stałych dokonuje się na drodze obliczeniowej z wykorzystaniem techniki komputerowej.

3. Charakterystyka poboru sondy

Opisaną powyżej metodę zastosowano do przebadania, opracowanej w Katedrze Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania, aspiracyjnej sondy zerowej pyłomierza grawimetrycznego. Sonda ta (rys.1) wyposażona jest w pięć wymiennych końcówek aspiracyjnych o średnicach otworu wlotowego $d_a = 10; 13; 16; 20$ i 25 mm.

W wyniku badań [2] określono charakterystykę poboru sondy jako funkcję graficzną $P(H, Stk)$, gdzie:

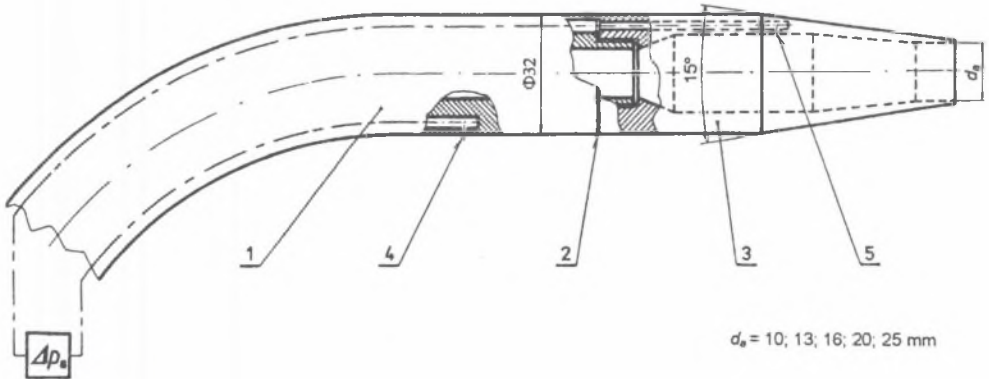
$$P = \frac{s_a}{s} \quad (1)$$

$$H = \frac{w_a}{w} \quad (2)$$

$$Stk = \frac{d^2 \cdot \rho_p \cdot w}{18 \cdot d_a \cdot \mu} \quad (3)$$

Funkcja ta w postaci dyskretnej przedstawiona jest na rys.2.

Aby ułatwić korzystanie z charakterystyki poboru, funkcję dyskretną poddano aproksymacji zależnością matematyczną. W tym celu wzięto pod uwagę znane ogólne zależności $P(H, Stk)$ odnoszące się do sond ostrokrawędziowych i dla H obejmującego zakres $0,7+1,3$, tj. dla warunków odpowiadających przeprowadzonym badaniom sondy zerowej. Zależności te, wg [4], przedstawiają się następująco:



Rys. 1. Aspiracyjna sonda zerowa

1 – trzon sondy, 2 – uszczelka, 3 – końcówka aspiracyjna, 4 – otwór impulsowy odbierający ciśnienie z zewnętrznej powierzchni sondy, 5 – otwór impulsowy odbierający ciśnienie z wewnętrznej powierzchni sondy

Fig. 1. Aspiration pressure balance – type probe

1 – probe stem, 2 – seal, 3 – aspiration nozzle, 4 – piezometric hole on the outer surface of the probe, 5 – piezometric hole on the inner surface of the probe

wg Daviesa:
$$P = l + \left(\frac{l}{H} - l \right) \cdot \left(l - \frac{l}{1 + C \cdot Stk} \right) \quad (4)$$

wg Belyaeva i Levina:
$$P = l + \left(\frac{l}{H} - l \right) \cdot \frac{C_1 + C_2 \cdot \frac{l}{H}}{C_1 + C_2 \cdot \frac{l}{H} + Stk^{-1}} \quad (5)$$

wg Liu i in.:
$$P = l + \left(\frac{l}{H} - l \right) \cdot \frac{l}{1 + C \cdot Stk^{-1}}, \quad \text{dla } H \leq 1 \quad (6)$$

oraz
$$P = l + \left(\frac{l}{H} - l \right) \cdot \frac{l}{1 + C \cdot \left(\frac{l}{H} \right)^{0.5} \cdot Stk^{-1}}, \quad \text{dla } H > 1 \quad (7)$$

gdzie: C, C_1, C_2 - stałe

W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że żadna z zależności (4) do (7) nie nadaje się do aproksymacji z dostateczną dokładnością funkcji dyskretnej $P(H, Stk)$. Po dokonaniu szczegółowej analizy charakterystyki poboru sondy ostatecznie określono ogólną postać funkcji aproksymacyjnej jako:

$$P = 1 + \left(\frac{1}{H} - 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{1 + a_4 \cdot Stk^m}{1 + a_5 \cdot Stk^{m+0.5} \cdot H^n} \right) - \frac{a_1 \cdot Stk}{Stk^2 + a_2 \cdot Stk + a_3} \quad (8)$$

gdzie:

dla: $0.7 \leq H \leq 1.3$

$$a_1 = 0,086$$

$$a_2 = 2,81$$

$$a_3 = 0,358$$

dla: $0.7 < H < 1$ $1.3 > H \geq 1$

$$a_4 = 0,026 \quad -0,035$$

$$a_5 = 3,03 \quad 1,51$$

$$m = 0,473 \quad 0,233$$

$$n = 0,165 \quad 3,08$$

Poszukiwanie wartości współczynników $a_1 + a_5$ oraz wykładników m i n w zależności (8) przeprowadzono metodą minimalizacji sumy kwadratów odchyłeń procedurą solver w arkuszu kalkulacyjnym Excel. W celu podniesienia dokładności aproksymacji, współczynniki a_4 i a_5 oraz wykładniki m i n określono oddzielnie dla $H < 1$ i dla $H \geq 1$.

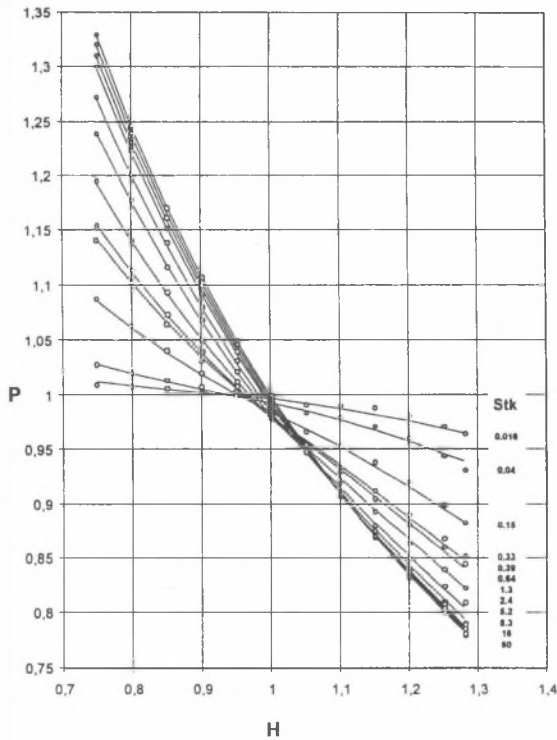
Obraz graficzny funkcji aproksymacyjnej (8) oraz funkcji dyskretnej $P(H, Stk)$ przedstawiono na rys.2.

Obliczony współczynnik korelacji wynosi 0,9998, co świadczy o dobrej dokładności dokonanej aproksymacji.

4. Komputerowy program obliczeniowy

Opracowana i przebadana w Katedrze Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania sonda zerowa znalazła zastosowanie w automatycznym pyłomierzu gravimetrycznym P-10ZA, służącym do pomiaru stężenia i strumienia masy pyłu w kanałach przepływowych zgodnie z metodyką określoną normą [5].

Zgodnie z tą metodyką, wykorzystując wyniki pomiaru stężenia pyłu uzyskiwane dla pyłomierza P-10ZA, stworzony został algorytm, a na jego podstawie program komputerowy służący do obliczania rzeczywistych (skorygowanych w stosunku do "zmierzonych" pyłomierzem) stężeń frakcyjnych i stężenia całkowitego pyłu w gazie w kanale.



Rys. 2. Zależność dokładności poboru P od ilorazu prędkości H i liczby Stokesa Stk dla danych uzyskanych na drodze eksperymentalno-obliczeniowej (\circ) i wg funkcji aproksymacyjnej (8) (—) dla sondy zerowej pyłomierza P-10ZA

Fig. 2. Relationship between sampling accuracy P , velocity ratio H and Stokes number Stk for the pressure balance-type probe of the P-10ZA sampler: (\circ) – data obtained by means of experiment and calculations, (—) – approximation after equation (8)

Wartości rzeczywistych stężeń pyłu s'_i , s' uzyskuje się opierając się na: "zmierzonej" pyłomierzem wartości stężenia całkowitego pyłu s , ilorazie prędkości H i innych parametrach poboru, składzie ziarnowym pobranej próbki pyłu $K_i(\bar{d}_i)$ oraz charakterystyce poboru sondy $P_i(H, Stk_i)$.

Błąd pobrania określonej frakcji pyłu δ_i i błąd stężenia całkowitego δ wyznacza się z zależności:

$$\delta_i = P_i - 1 \quad (9)$$

$$\delta = \frac{s - s'}{s'} \quad (10)$$

W obliczeniach dokładności poboru P_i wg zależności (8), występującą w niej liczbę Stokesa określa się wzorem (3) z tym, że w miejsce prędkości gazu w należy podstawić średnią prędkość gazu w przekroju \bar{w} , a w miejsce średnicy cząstki d średnicę reprezentatywną i -tej frakcji pyłu \bar{d}_i .

Ekran opracowanego programu komputerowego SONDA, zawierający konkretny przykład obliczeniowy, przedstawia rys.3.

Program składa się z 4 segmentów. Segmenty 1 i 2 zawierają dane pochodzące z protokołu pomiarowego pyłomierza P-10ZA. W segmencie 3 należy podać skład ziarnowy i gęstość pyłu, uzyskane w wyniku analizy próbki pyłu zatrzymanego w filtrze mierniczym pyłomierza.

Obliczanie skorygowanych stężeń pyłu dla pomiaru grawimetrycznego, pyłomierzem P-10ZA

1. PARAMETRY POBORU

$d_s = 10$ mm
 $\bar{w} = 25,60$ m/s
 $h = 1,10$ -
 $t = 86,3$ °C
 $\rho = 0,989$ kg/m³
 $\rho_u = 1,335$ kg/m³
 $\rho_{su} = 1,358$ kg/m³
 $s = 5,0250$ g/m³

3. SKŁAD ZIARNOWY PYŁU

i	\bar{d}_i μm	K_i %
1	1,0	10,0
2	2,5	12,0
3	5,0	15,0
4	7,5	18,0
5	10,0	20,0
6	15,0	14,0
7	25,0	11,0
suma:		100,0

$\rho_p = 3200$ kg/m³

2. SKŁAD CHEMICZNY GAZU

i	składnik gazu suchego	U_{svj} % obj.
1	Azot N2	78,8
2	Dwutlenek węgla CO2	12,6
3	Tlen O2	8,6
suma:		100,0

$X = 0,025$ kg/kg

4. WYNIKI OBLICZENI

$\mu = 20,09 \cdot 10^{-6}$ kg/m·s Oblicz

i	Stk_i	s_i g/m ³	s'_i g/m ³	δ_i %
1	0,023	0,5025	0,5107	-1,60
2	0,142	0,6030	0,6325	-4,67
3	0,566	0,7537	0,8145	-7,46
4	1,274	0,9045	0,9885	-8,50
5	2,265	1,0050	1,1029	-8,88
6	5,096	0,7035	0,7735	-9,05
7	14,156	0,5527	0,6077	-9,04

$s^t = 5,4303$ g/m³ $\delta = -7,46$ %
 $s^u = 7,3300$ g/m³
 $s^{su} = 7,4563$ g/m³ Protokół

Rys. 3. Ekran programu komputerowego SONDA z przykładem obliczeniowym
 Fig. 3. Screen of the computer programme SONDA with a calculation example

Wyniki obliczeń w postaci wartości skorygowanych stężeń frakcyjnych i stężenia całkowitego pyłu oraz błędy względne ich określenia w pomiarze grawimetrycznym, przedstawia segment 4.

Z załączonego przykładu obliczeniowego wynika m. in., że dla ilorazu prędkości gazu $H = 1,1$ (dopuszczalnego, wg normy [5], dla pomiarów dokładnych) błędy pomiarowego określenia stężeń frakcyjnych są znaczne i przykładowo wynoszą: $-4,7\%$ dla średnicy ziarna pyłu $2,5 \mu\text{m}$, $-7,5\%$ dla średnicy $5 \mu\text{m}$ i $-8,9\%$ dla średnicy $10 \mu\text{m}$. Wartości tych błędów uzyskane dla $H = 1,2$ (dopuszczalnego dla niektórych pomiarów technicznych i pomiarów orientacyjnych) wynoszą odpowiednio: $-8,3\%$, $-12,9\%$ i $-15,6\%$.

5. Podsumowanie

- Określona w wyniku badań tzw. charakterystykę poboru aspiracyjnej sondy zerowej pyłomierza grawimetrycznego aproksymowano z dobrą dokładnością zależnością matematyczną (8).
- Opracowano program komputerowy, wykorzystujący opisaną matematyczną zależnością charakterystykę poboru sondy zerowej, do obliczania rzeczywistych stężeń frakcyjnych i stężenia całkowitego pyłu w kanale przepływowym w pomiarze grawimetrycznym - dokonywanym pyłomierzem P-10ZA.
- Wobec znaczących wartości błędu poboru dla anizokinetycznych (w zakresie dopuszczalnym przez normę [5]) warunków zasysania próbki aerozolu, zastosowanie opracowanego programu komputerowego wyraźnie poprawia dokładność pomiaru grawimetrycznego, co ma szczególnie duże znaczenie w pomiarach zapylenia wykorzystywanych, np.: w badaniach urządzeń odpylających, we wzorcowaniu pyłomierzy opartych na pośredniej metodzie pomiaru (np. optycznych) czy w pomiarach arbitrażowych.

Wykaz oznaczeń

d - średnica cząstki pyłu

\bar{d}_i - średnica reprezentatywna i-tej frakcji pyłu

d_a - średnica otworu wlotowego sondy

$H = w_d/w$ - iloraz prędkości gazu określający kinetyczne warunki zasysania

K_i - masowy udział i-tej frakcji pyłu w pobranej próbce

$P = s_d/s$ - dokładność poboru

s, s_i - stężenie pyłu w niezaburzonej strumieniu gazu w kanale, i-tej frakcji pyłu

s_a - stężenie pyłu w otworze wlotowym sondy

s^*, s_u^*, s_{su}^* - skorygowane stężenie pyłu w gazie dla warunków: rzeczywistych, umownych, umownych gazu suchego

s_i^* - skorygowane stężenie i-tej frakcji pyłu w gazie dla warunków rzeczywistych

Stk, Stk_i - liczba Stokesa, dla i-tej frakcji pyłu

t - temperatura gazu w kanale

u_{svj} - objętościowy udział j-ego składnika gazu suchego

w - prędkość niezaburzonego przepływu gazu w miejscu poboru w kanale

\bar{w} - średnia prędkość przepływu gazu w przekroju pomiarowym w kanale

w_a - średnia prędkość gazu w otworze wlotowym sondy

X - stopień zawilżenia gazu

δ, δ_i - błąd określenia stężenia pyłu, i-tej frakcji pyłu

Δp_s - różnica ciśnień odbieranych z sondy zerowej

μ - lepkość dynamiczna gazu

ρ, ρ_u, ρ_{su} - gęstość gazu dla warunków: rzeczywistych, umownych, umownych gazu suchego

ρ_p - gęstość bezwzględna pyłu

LITERATURA

1. Szulikowski J., Kateusz P. i in.: Typoszereg sondy na zerową różnicę ciśnień dla zakresu prędkości gazu 5-30 m/s. Sprawozdanie z etapów 1-4 pracy. Politechnika Śląska, Gliwice 1986-1989.
2. Szulikowski J.: Charakterystyka poboru aerozolu sondą. IV Ogólnopolskie Seminarium "Zastosowanie Mechaniki Płynów w Ochronie Środowiska '91", Gliwice - Wiśla 1991.
3. Szulikowski J., Kateusz P., Rylik P.: Konstrukcja aparatury do pomiaru zapylenia gazów przemysłowych. Określenie dokładności poboru pyłu w zależności od geometrycznych i kinetycznych warunków zasysania aerozolu sondą pyłową. Sprawozdanie z pracy BK-55/RIE-1/94, Politechnika Śląska, Gliwice 1994.

4. Zhang Z. Q., Liu B.Y.H.: On the empirical fitting equations for aspiration coefficients for thin-walled sampling probes. *Journal of Aerosol Science*, 1989 vol.20 No.6 s.713-720.
5. PN-Z-04030/7:1994 – Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zdzisław Kabza

Abstract

What is an essential question in gravimetric measurements of dust content of gases in ducts is accuracy of sampling dust that is taken together with dust-loaded gas sample sucked by an aspiration probe of a sampler. In the paper, the results were presented of the works dealing with this problem in reference to the pressure balance-type aspiration probe being a part of the gravimetric sampler P-10ZA. A so-called sampling characteristic of the pressure balance-type probe was described by an approximation function, this characteristic being a result of an experimental and computational method applied. A computer programme was developed which serves to calculate the sampling error of particular dust fractions present in the drawn gas sample, and thus to determine true total and size fractional concentrations of the gas, while carrying out gravimetric measurement by means of the P-10ZA sampler. Since the dust sampling error at anisokinetic conditions (as those permissible ones defined by the Polish standard) appears significant, the use of the developed computer programme considerably improves the accuracy of a gravimetric measurement. It is of a particularly great importance in the measurements of dust content of flue gases which are the basis of dust separator testing, calibration of optical monitors or allowable emission arbitration tests.