

Czesław Graczyk
Wydziałowe Laboratorium
Miernictwa i Automatyki
Procesów Energetycznych

ZWĘZKOWE METODY POMIARU STRUMIENI PŁYNÓW HETEROGENICZNYCH

Streszczenie: Treścią artykułu jest przegląd prac krajowych dotyczących pomiaru strumienia płynu heterogenicznego przy użyciu zwężki trój sygnałowej w ostatnim dziesięcioleciu. W szczególności przedstawiono rezultaty badań przeprowadzanych na Politechnice Śląskiej, Politechnice Wrocławskiej oraz w Instytucie Energetyki.

1. Wstęp

Płyny heterogeniczne występują w technice stosunkowo często. Najczęściej jest to mieszanina dwuskładnikowa fazy:

- gazowej i stałej (np. pył węglowy transportowany powietrzem)
- ciekłej i stałej (np. pył metalowy w wodzie),
- gazowej i ciekłej (np. pęcherzyki pary w wodzie).

W energetyce poważnym problemem pomiarowym jest zagadnienie pomiaru strumienia pyłu węglowego podawanego do palników kotłów parowych. Masę spalanego w kotłach pyłu węglowego określa się powszechnie drogą ważenia węgla surowego. Pomiar taki wskutek akumulacji węgla w młynowni jest miarodajny tylko przy długim okresie czasu, a zupełnie nieprzydatny dla urządzeń automatyki, wymagający mierników szybkiej odpowiedzi. Istnieją wprawdzie różne metody pomiaru strumienia pyłu (np. pomiar liczby obrotów podajnika, czy też natężenia promieniowania) lecz obarczone są różnymi wadami, dyskwalifikującymi ich przydatność dla potrzeb przemysłu [1]. Bezpośredni pomiar strumienia pyłu węglowego podawanego do palników ma istotne znaczenie dla układu regulacji spalania kotłów parowych [2], [3]. Jak wiadomo pośredni układ regulacji spalania typu "paliwo-powie-

trze" stosowany z powodzeniem przy spalaniu paliw gazowych i ciekłych nie znalazł zastosowania dla pyłu węglowego, głównie z powodu trudności pomiarowych. Przez wprowadzenie zwężki jako miernika strumienia pyłu można by układ "paliwo-powietrze" zastosować również i dla paliwa pyłowego tym bardziej, że bezpośredni układ regulacji spalania przy użyciu analizatorów O_2 lub CO_2 do dziś nie został praktycznie zrealizowany. Analizę układu automatycznej regulacji kotła z zastosowaniem trój sygnałowej zwężki pomiarowej na wylocie z młyna przeprowadzona została z pomyślnym rezultatem przez pracownię automatyki cieplnej Instytutu Energetyki w Warszawie.

2. Zwężkowe układy pomiarowe

Wpływ oddziaływania pyłu na mierniczy spadek ciśnienia gazu w normalnej zwężce dwusygnałowej opisany został po raz pierwszy przez Muschelknautza [4], który zaproponował pewne wzory korekcyjne dla pomiaru strumienia gazu.

Dla pomiaru strumienia pyłu istnieją obecnie trzy rodzaje zwężkowych układów pomiarowych.

Pierwsza metoda polega na zastosowaniu dwóch zwęzek, jednej w przewodzie gazu czystego, drugiej w przewodzie solgazu. Sposób ten zastosowany został przez Farbara [5], Antikajna [6] oraz Ssatila [7], [8], [9].

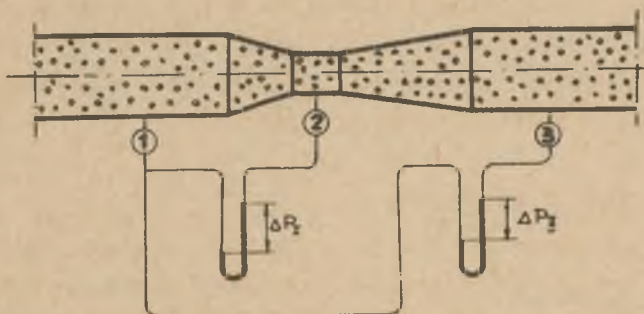
Druga metoda opiera się na użyciu dwóch różnych zwęzek zainstalowanych po sobie w przewodzie solgazu. Wykorzystując inne zachowanie się solgazu w długiej dyszy i krótkiej krecie wyprowadzić można zależności określające strumień pyłu. Podstawowe znaczenie posiada tu praca Carlsona, Frazier'a i Engdahla [10].

Trzeci sposób pomiaru polega na wykorzystaniu tylko jednej zwężki lecz trój sygnałowej zainstalowanej w przewodzie solgazu. Metoda ta zaproponowana została przez Graczyka [11], a następnie przez Bartha [12].

Ostatnia metoda z uwagi na prostotę układu, łatwość zabudowy zwężki oraz stosunkowo duże wartości obu spadków ciśnienia dla przeciętnych parametrów solgazu wykazuje przewagę nad sposobami poprzednimi.

3. Zasada działania zwężki trój sygnałowej

Schemat układu pomiarowego składającego się z klasycznej zwężki Venturiego ISO oraz dwóch manometrów różnicowych przeznaczonych dla pomiaru spadków ciśnienia Δp_I oraz Δp_{II} przedstawiono na rys. 1.



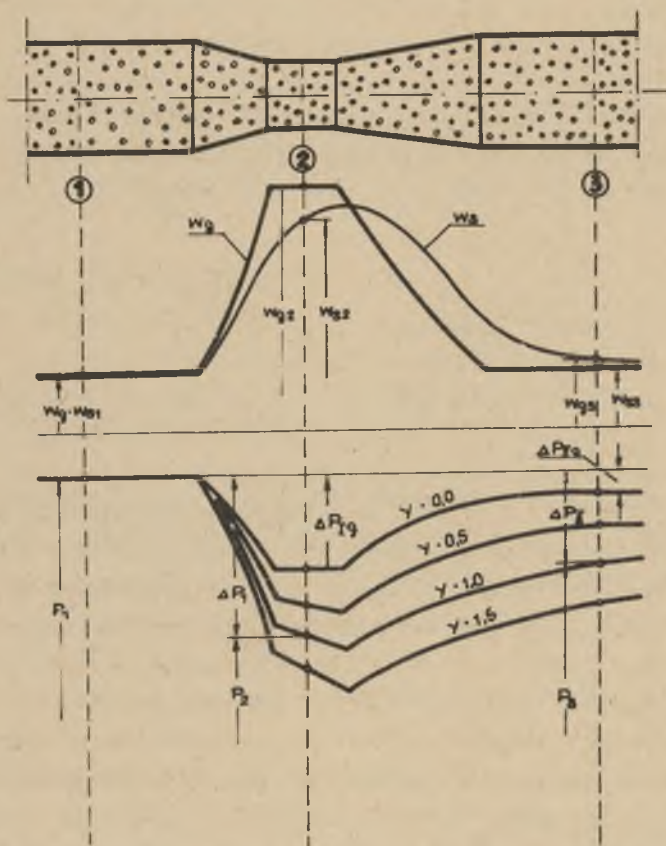
Rys. 1. Schemat działania zwężki trój sygnałowej

Wielkością charakterystyczną przepływu jest stosunek strumienia solidusu \dot{m}_s do strumienia gazu \dot{m}_g nazywany koncentracją (czasową) pyłu.

$$Y = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_g} \quad (1)$$

Na rys. 2 przedstawiono charakterystyczny rozkład prędkości ciśnień wzdłuż długości zwężki. Prędkość gazu i solidusu w punkcie 1 odbioru ciśnienia są w przybliżeniu sobie równe. W konfuźorze występuje wzrost prędkości gazu w_g , natomiast prędkość cząstki ciała stałego wzrasta wcalej. W punkcie 2 prędkość solidusu jest mniejsza od prędkości gazu. Największe różnice występują w ostatniej części zwężki. Wskutek działania inercji cząstki pyłu wyprzedzają drobiny gazu i wyhamowują swą prędkość. Różnice $(w_g - w_s)$ są tu znaczne. Za zwężką obie prędkości powracają do wartości podobnych jak na wlocie zwężki. Zmiany prędkości oraz tarcie między gazem a solidusem mają zasadniczy wpływ na przebieg ciśnienia w zwężce. Przebieg krzy-

wej piezometrycznej dla przypadku $Y = 0$ tj. gdy płynie czysty gaz jest dobrze znany z teorii przepływów płynów homogenicznych. Oznaczenia Δp_{IG} oraz Δp_{IIg} oznaczają wartości spadków przy przepływie czystego gazu.



Rys. 2. Rozkład prędkości i ciśnienia wzdłuż dyszy Venturi

Istota pomiaru polega na wykorzystaniu zjawiska szybszego wzrostu spadku Δp_{II} aniżeli Δp_I w zależności od koncentracji.

Drogą całkowania w granicach punktów 1-2 oraz 1-3 uogólnionego równania Saint-Venanta [11] płynów heterogenicznych;

$$-dp = \rho_g w_g dw_g + Y \rho_g w_g dw_s + Y dp_{fs} + dp_{fg} \quad (2)$$

gdzie:

- p - ciśnienie
 w_g, w_s - prędkość gazu i solidus
 dp_{fs}, dp_{fg} - strata ciśnień z powodu tarcia solidus oraz tarcia gazu
 ρ_g - gęstość gazu

otrzymuje się wzór określający zależność między liczbą stanowiącą stosunek obu miernioznych spadków ciśnienia od koncentracji Y ;

$$\kappa = \frac{\Delta P_{II}}{\Delta P_I} = \kappa_g \frac{1 + E_{II} Y}{1 + E_I Y} \quad (3)$$

gdzie:

E_I, E_{II} - stałe charakterystyczne.

Liczba κ_g stanowi stosunek obu miernioznych spadków ciśnienia przy przepływie gazu czystego ($Y = 0$).

Postać wzoru identyczną jak (3) można otrzymać sposobem prostym, opierając się na równaniu Gasterstaedta [13] używanym powszechnie w teorii transportu pneumatycznego.

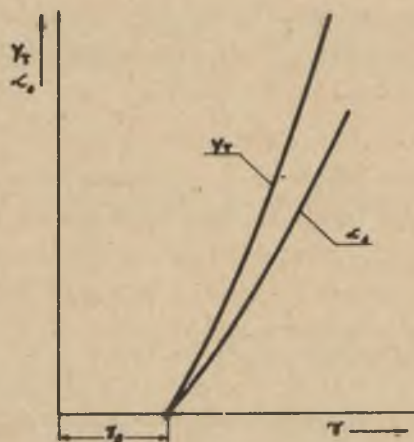
W oparciu o wzory (1) i (3) oraz równanie strumienia gazu czystego mierzonego zwężką można wyprowadzić wzór strumienia pyłu przedstawiający się w postaci praktycznej formuły następująco:

$$\dot{m}_s = 0,01252 \alpha_s d^2 \sqrt{\Delta P_I \rho_{g1}} \text{ kg/h} \quad (4)$$

gdzie:

- d mm - średnica otworu zwężki
 α_s - liczba przepływu solidus
 ρ_{g1} kg/m³ - gęstość gazu przed zwężką.

Liczba przepływu α_s podobnie jak koncentracja Y zależna jest od liczby π . Zależność ta jest analitycznie dość skomplikowana i określa się eksperymentalnie. Orientacyjny przebieg obu funkcji $Y = f(\pi)$ oraz $\alpha_s = f(\pi)$ obrazuje wykres przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Przebieg funkcji $Y = f(\pi)$ oraz $\alpha_s = f(\pi)$

3. Dotychczasowy przebieg badań

Badania przeprowadzane na Politechnice Śląskiej przez Cz. Graożyka [10], [14] w latach 1954-56 potwierdziły słuszność metody oraz celowość zastosowania klasycznej zwężki Venturiego jako zwężki trój sygnałowej. W szczególności badany był przebieg obu funkcji $\alpha_s = f(\pi)$ oraz $Y = f(\pi)$.

Z badań gliwiokich wysnuto zastępujące wnioski:

- przebieg obu funkcji jest silnie zależny od kształtu zwężki tj. stopnia rozwarcia m oraz średnicy rurociągu D ,
- znikomy wpływ posiadają takie parametry jak prędkość przepływu gazu oraz stopień rozdrobnienia pyłu (w granicach przemysłowej stosowności),
- dokładność metody oceniona była na $\pm 7\%$.

W latach 1958-61 badania nad zagadnieniem pomiaru strumienia pyłu węglowego kontynuowania były na Politechnice Wrocławskiej przez M. Teisseyre [15], który jako zwężkę trój sygnałową zastosował krezę. Nieprzydatne okazały się zwężki segmentowe. Teisseyre zastosował trzy sposoby odbioru ciśnień w krezie:

- układ A - otwory piezometryczne spadku Δp_I przy taroży,
- układ B - pierwszy otwór piezometryczny Δp_I jak dla A, natomiast drugi w przekroju "vena contracta",
- układ C - pierwszy otwór piezometryczny Δp_I w odległości 1 D przed tarożą, drugi jak dla B.

Pomiar drugiego spadku ciśnienia Δp_{II} dokonywany był zawsze przy użyciu pierwszego otworu spadku Δp_I oraz drugiego otworu zlokalizowanego tak aby E_{II} było równe $E_{II \max}$. Teisseyre postawił sobie zadanie znalezienia optymalnych miejsc odbioru ciśnień. Za kryterium optymalności przyjął założenie ekstremalnych wartości E_I , E_{II} we wzorze (3)

$$E_I = E_{\min} = 0 \quad \text{oraz} \quad E_{II} = E_{\max}.$$

Z tego punktu widzenia najbardziej korzystny dla metody trój sygnałowej Teisseyre uważa sposób C odbioru ciśnień (vena contracta). Poza tym w badaniach swych Teisseyre potwierdził brak wpływu stopnia rozdrobnienia pyłu oraz prędkości na wynik pomiaru.

W 1966 r. w Instytucie Energetyki A. Obtulowicz [16] przeprowadził badania liczby przepływu solidusu dla zwężki Venturi o dużej średnicy rurociągu ($D = 204$ mm) zainstalowanej w przewodzie pyłowym kotła OP-130 elektrowni Ostrołęka. Wzorcowanie przeprowadzane było tym razem drogą izokinetycznego poboru masy pyłu i gazu, specjalną sondą zainstalowaną w rurociągu pyłowym. Uzyskane zależności α_g , $Y = f(X)$ wykazały silny wpływ średnicy rurociągu w stosunku do danych uzyskanych w badaniach poprzednich. Obtulowicz dokładność metody pomiaru ocenił na $\pm 4,2\%$. Badania potwierdziły przydatność zwężki do pomiarów ruchomych i wykorzystane zostały dla określenia charakterystyk młyna wentylatorowego.

W 1967 roku Cz. Graczyk [17] przeprowadził badania metody w warunkach dużych prędkości przepływu (do 40 m/sek) oraz dużych koncentracji (do 35 kg s/kg g). Materiałem transportowanym był tym razem piasek formierski. Również i w tych warunkach metoda może znaleźć zastosowanie, jakkolwiek wskutek ukształtowania się charakterystyki $\alpha_s = f(x)$ błąd pomiaru będzie znacznie większy od błędu pomiaru strumienia solidusu przy małych koncentracjach.

W roku 1967 na Politechnice Śląskiej wykonana została również konstrukcja zwężkowego przepływomierza pyłowego wyposażonego w dwa przetworniki różnicy ciśnień oraz przelicznik analogowy rozwiązujący równanie (4). Wielkością wyjściową przepływomierza jest napięcie rejestrowane na automatycznym kompensatorze, a przedstawiające masowy strumień pyłu.

Metoda trój sygnałowa stosowana była parokrotnie w kraju dla krótkotrwałych pomiarów pyłów strumieni takich jak: pył węglowy, cementowy, masy formierskie w warunkach przemysłowych.

Problem przepływu oraz pomiaru strumienia pyłu transportowanego powietrzem jest omawiany w szeregu prac badawczych wykonywanych zagranicą [18], [19], [20]. Informacje jednak na ten temat są bardzo ogólnikowe lub fragmentaryczne i raczej nie są publikowane jak np. zwężki trój sygnałowe stosowane we Francji do pomiaru strumienia pyłu węglowego wdmuchiwanego do gardzieli wielkiego pieca.

4. Perspektywy rozwoju badań

Metoda zwężkowa pomiaru strumienia pyłu posiada metody konkurencyjne, z których wyróżnić można metodę elektrostatyczną oraz ultradźwiękową. Nie są one dokładniejsze, a wymagają złożonej aparatury pomiarowej.

Pomiar pyłu zwężką z racji swej prostoty oraz ścisłego powinowactwa z powszechnie stosowanymi zwężkowymi pomiarami pyłów homogenicznych posiada wszelkie dane dla powszechnego stosowania.

Jakkolwiek metoda zwężki trój sygnałowej została w przedstawionych badaniach sprawdzona, dokładność jej jest jeszcze zbyt

mała. Prace badawcze kontynuowane są w Instytucie Energetyki (Stacja w Pruszkowie oraz przy El. Łaziska) oraz w Instytucie Miernictwa i Automatyki Urządzeń Termoenergetycznych Politechniki Wrocławskiej. Te ostatnie badania prowadzone razem z Politechniką Śląską mają na celu dalsze udoskonalenie metody. Jednym z głównych zadań jest m.in. ściślejsze opisanie liczby przepływu solidusu oraz ustalenie poprawek korekcyjnych.

W kraju prowadzone są również próby zastosowania zwięzki trój sygnałowej do pomiaru pyłu zawierającego tlenki metali (cynku, miedzi) transportowane wodą. Problem ten posiada istotne znaczenie w instalacjach wzbogacania rudy. Instalacja badawcza zlokalizowana jest na terenie kopalni "Orzeł Biały" w Bytomiu. Pierwsze pomiary potwierdziły słuszność metody, jakkolwiek między spadkami ciśnień przy przepływie soli i likwidusu a samego likwidusu jest znacznie mniejsza aniżeli podobne różnice dla przypadku przepływu solgazu. Ma to zasadniczy wpływ na dokładność metody.

Z tych względów rozpoczęto badania polegające na zastąpieniu pomiaru spadków ciśnień w zwięzce trój sygnałowej, pomiarem siły elektromotorycznej indukowanej w silnym polu magnetycznym. Badania te są w toku i pierwsze rezultaty uzasadniają ich kontynuację.

LITERATURA

- [1] PADDELT E., WITTE R. - Mengenmessungen im Betrieb Leipzig 1955. Krönert.
- [2] PROFOS P. - Regelung der Dampfanlagen Springer. Berlin 1962
- [3] MASŁOW W.I., RABINOWICZ F. - Kontrol za podaczej pyli na oddielnyje goriełki Tiepłoenerygetyka nr 12, 1963.
- [4] MUSCHELKNAUTZ E. - Korrektur der Wirkdruckanzeige an Düsen und Blenden bei der Mengenmessung eines staubführenden Gasströmes. VDI-Berichte, Vol. 6, 1965.
- [5] FARBER L. - The Venturi as a Meter for Gas-Solgas Mixtures Transactions of ASME nr 7, 1953.
- [6] ANTIKAJN P.A. - Izmierenije razohoda pyli w zapylennom potokie. Tiepłoenerygetyka nr 12, 1956,

- [7] SZATIL A.A. - Izmierenie rozchoda pyłu pri pneumatranspor-
tie. Tieploenergietyka nr 8, 1957.
- [8] SZATIL A.A. - O razozetie drossalnogo pylerazohodowiera.
Tieploenergietyka nr 5, 1958.
- [9] CYGANKOW S.P. - Opredielenie razchoda zapylnnogo vozducha
pri pomoszozi drossielnoj szajby. Tieploenergietyka nr 3,
1958.
- [10] CARLSON H., FRAZIER P., ENGBAHL B. - Meter for Flowing
Mixtures of Air and Pulverized Coal. Transactions of the
ASME nr 2, 1948.
- [11] GRACZYK Cz. - Pomiar natężenia przepływu pyłu węglowego
transportowanego powietrzem przy użyciu zwężki mierniczej.
Praca doktorska, 1957.
- [12] BARTH W., NAGEL R., WAVESEN W. - Neues Verfahren zur Be-
stimmung der augenblicklich geförderten Gutmenben im Luft-
strom bei pneumatischer Forderung. Chem-Ing-Technik nr 9,
1957.
- [13] GASTERSTÄDT D. - Die experimentalle Untersuchung des pneu-
matischen Fordervorganges Z.d. VDI nr 24, 1924.
- [14] GRACZYK Cz. - The application of the Venturi tube to the
measurement of the rate of coal dust flow transported by
air Acta IMECO 1961, nr 230.
- [15] TEISSEYRE M. - Badania nad zastosowaniem kryz do pomiaru
ilości pyłu węglowego i powietrza w transporcie pneuma-
tycznym. Zeszyty Naukowe Pol. Wrocławskiej, nr 143, 1966.
- [16] OBTUŁOWICZ A. - Zastosowanie zwężki Venturiego do pomiaru
natężenia przepływu pyłu węglowego w elektrowniach Biulet-
yn Instytutu Energetyki nr 9/10. 1966.
- [17] GRACZYK Cz. - Badanie zużycia powietrza sprężonego w in-
stalacji transportu i przygotowania piasku formierskiego
huty Zygmunt. Problemy Projektowe nr 4, 1966.
- [18] JUNG R. - Die Strömungsverluste in 90° Umlenkungen beim
pneumatischen Staubtransport. BWK nr 9, 1967.
- [19] RAUSCH W. - Untersuchungen über die pneumatische Dicht-
stromförderung. Fördern u. Heben nr 12, 1966.
- [20] RYSZKA E. - Gestaltung von Gasgeschwindigkeits u. Staub-
profilen strömender Gas-Staub-Gemische in Rohrleitungen
mittels Düsen. Luft u. Kältetechnik nr 1, 1969.

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗХОДА ГЕТЕРОГЕННИЧЕСКОГО СРЕДСТВА
ПРИ ПОМОЩИ ТРЕХСИГНАЛЬНОГО СОПЛА

С о д е р ж а н и е

В статье представлены научные работы посвящены проблеме измерения расхода гетерогеннического средства при помощи трехсигнального сопла, которые были проведенные в последние десять лет в ПНР.

THE MEASUREMENT OF HETEROGENIC FLOW RATE BY MEANS OF THE NOZZLES

S u m m a r y

The article contains the review of scientific works devoted to the measurement of heterogenic flow rate, conducted in last ten years in Poland.

In particular the results of investigation performed in Silesian Techn. University, in Wrocław Techn. University and Institut of Energy are described.