

Jan BĄDROWSKI, Grzegorz KACZMARZYK

Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla  
Zabrze

## DOBÓR OPTYMALNYCH PARAMETRÓW PRACY PIONOWEGO TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO

**Streszczenie.** Przedstawiono metody optymalnego doboru prędkości gazu i średnicy przewodu transportowego oraz dmuchawy dla niskociśnieniowego pionowego transportu pneumatycznego materiałów sypkich. Metoda doboru prędkości gazu i średnicy przewodu bazuje na charakterystyce transportu  $\Delta p_p = f/u_p$ . W doborze dmuchawy wykorzystano zastrępczy schemat instalacji transportu pneumatycznego oraz efektywną charakterystykę dmuchawy.

Transport pneumatyczny to operacja coraz częściej stosowana w różnych technologiach przemysłów: chemicznego, spożywczego, rolniczego, przeróbki paliw stałych i minerałów. Jednak mimo szerokiego jej zastosowania, badania podstawowe z zakresu aerodynamiki ruchu zawieszonych ciała stałego w gazie oraz procesów międzyfazowej wymiany ciepła lub masy są stosunkowo nieliczne i dotyczą przypadków związanych z konkretną technologią.

Korelacje czy też metody projektowania i doboru parametrów ruchowych, opracowane w wyniku tych badań, mają ograniczony zakres stosowalności i nie zmieniają w sposób zasadniczy aktualnej sytuacji charakteryzującej się koniecznością prowadzenia żmudnych i kosztownych badań na instalacjach ówiercotechnicznych i półtechnicznych. Stąd też, projektując instalacje transportu pneumatycznego, a szczególnie transportu pionowego, często bez przyczyny zawiąza się prędkości gazu i spręż dmuchaw, co w konsekwencji prowadzi do nieekonomicznej, a nawet i nieprawidłowej pracy instalacji. Szczególnie duże rozbieżności obserwuje się we wskazówkach jak dobierać prędkość roboczą strumienia gazu [1, 2, 3]. Według Gorbisa [1] jako punkt odniesienia należy

przyjmować prędkość unoszenia pojedynczej cząstki zakładając, że prędkość robocza strumienia gazu powinna wynosić:

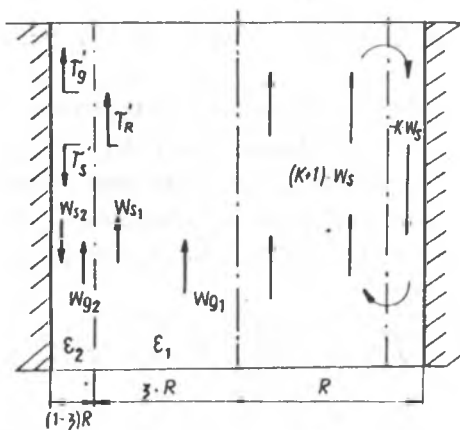
$$u_g = u_t \cdot 3,5 \left[ \frac{D}{d_p} \right]^{1/7} - 0,8$$

W pracy 2 zaleca się przyjmować prędkości większe od prędkości, przy których obserwowany jest "zawał" transportu pneumatycznego, a wyznaczanych z zależności:

$$u_{ch} = 32,3 \cdot \frac{G}{\rho_s \cdot A} - 0,97 \cdot u_t$$

Rozbieżności w kwestii określenia prędkości krytycznej "zawału" gazu są znaczne [3, 4] i formułowane przez badaczy wnioski mają bardzo ograniczony zakres stosowalności.

Prowadzone w ostatnich latach badania z zakresu aerodynamiki ruchu zawieszin gaz - ciało stałe w Instytucie Chemicznej Przerobki Węgla w Zabrze oraz w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Budowy Aparatury Politechniki Śląskiej w Gliwicach pozwoliły na opracowanie metod doboru optymalnych parametrów pracy pionowego transportu pneumatycznego materiałów sypkich. W metodach tych bazuje się na charakterystykach transportu pneumatycznego  $\Delta p_t = f/u_g$ , wyznaczanych z pierścieniowego modelu transportu pneumatycznego, opracowanego przez Nakamurę-Capesa [5]. Model ten zakłada istnienie dwóch pseudostref w strumieniu zawiesziny, tj. strefy centralnej, rdzenia, w której kierunek ruchu cząstek jest zgodny z ruchem gazu i strefy przyściennej, pierścienia, w której cząstki poruszają się w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu gazu. Model zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1. Ilustracja pierścieniowego modelu transportu pneumatycznego.

Wychodząc z równań bilansu pędu

a/ dla rdzenia

$$\rho_g \frac{d}{dH} [(W_{g1} u_w)^2 / \varepsilon_1] = -\varepsilon_1 \frac{dP}{dH} - \delta_1 [W_{g1} u_w / \varepsilon_1 - W_{s1} u_w / (1 - \varepsilon_1)]^2 \quad /1/$$

$$\rho_g \frac{d}{dH} [(W_{g1} u_w)^2 / (1 - \varepsilon_1)] = -(1 - \varepsilon_1) \frac{dP}{dH} + \delta_1 [W_{g1} u_w / \varepsilon_1 - W_{s1} u_w / (1 - \varepsilon_1)]^2 - \frac{4 \tau_g'}{3D} - \rho_s g (1 - \varepsilon_1) \quad /2/$$

b/ dla pierścienia

$$\rho_g \frac{d}{dH} [(W_{g2} u_w)^2 / \varepsilon_2] = -\varepsilon_2 \frac{dP}{dH} - \delta_2 [W_{g2} u_w / \varepsilon_2 - W_{s2} u_w / (1 - \varepsilon_2)]^2 - \frac{4 \tau_g'}{(1 - \varepsilon_2) D} \quad /3/$$

$$\rho_g \frac{d}{dH} [(W_{s2} u_w)^2 / (1 - \varepsilon_2)] = -(1 - \varepsilon_2) \frac{dP}{dH} + \delta_2 [W_{g2} u_w / \varepsilon_2 - W_{s2} u_w / (1 - \varepsilon_2)]^2 + \frac{4 (\tau_g' + \tau_{s2}')}{(1 - \varepsilon_2) D} - \rho_s g (1 - \varepsilon_2) \quad /4/$$

autorzy uzyskują dla transportu pneumatycznego nisko-ciśnieniowego w strefie ustalonego ruchu cząstek zależność na spadek ciśnienia

$$-\frac{1}{g} \frac{dP}{dH} = \rho_s [(1-\gamma^2)(1-\varepsilon_2) + \gamma^2(1-\varepsilon_1)] + \frac{4}{gD} (\tilde{v}_{g1}' + \tilde{v}_{s2}') = \varphi(\bar{\varepsilon}) \quad /5/$$

Poszczególne wielkości występujące w zależności /5/ wyznacza się zakładając, że przy danej prędkości gazu transport odbywa się przy minimum zużycia energii, tj. przy minimalnej w danych warunkach stracie ciśnienia gazu. Należy zatem dodatkowo rozwiązać:

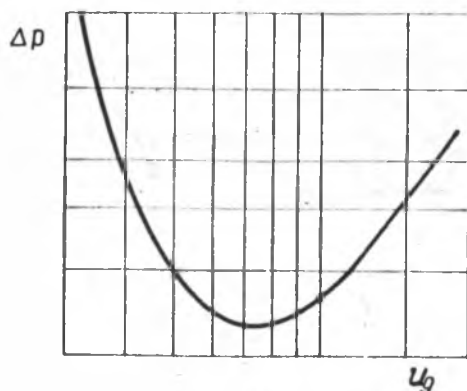
$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon_1} \left( -\frac{1}{g} \frac{dP}{dH} \right) = 0 \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial \varepsilon_2} \left( -\frac{1}{g} \frac{dP}{dH} \right) = 0 \quad ; \quad \frac{\partial}{\partial (1-\gamma^2)} \left( -\frac{1}{g} \frac{dP}{dH} \right) = 0 \quad /6/$$

wykorzystując zależności:

$$\begin{aligned} W_g &= \gamma^2 W_{g1} + (1-\gamma^2) W_{g2} \\ W_s &= \gamma^2 W_{s1} + (1-\gamma^2) W_{s2} \\ \bar{\varepsilon} &= \gamma^2 \varepsilon_1 + (1-\gamma^2) \varepsilon_2 \\ \gamma^2 W_{s1} &= (K+1) \cdot W_s \\ (1-\gamma^2) W_{s2} &= -K \cdot W_s \end{aligned} \quad /7/$$

W pracy /6/ przedstawiono porównanie różnych modeli ruchu cząstek ciała stałego w pionowym transporcie pneumatycznym, wykazując najlepszą zgodność z danymi eksperymentalnymi opisanego powyżej modelu.

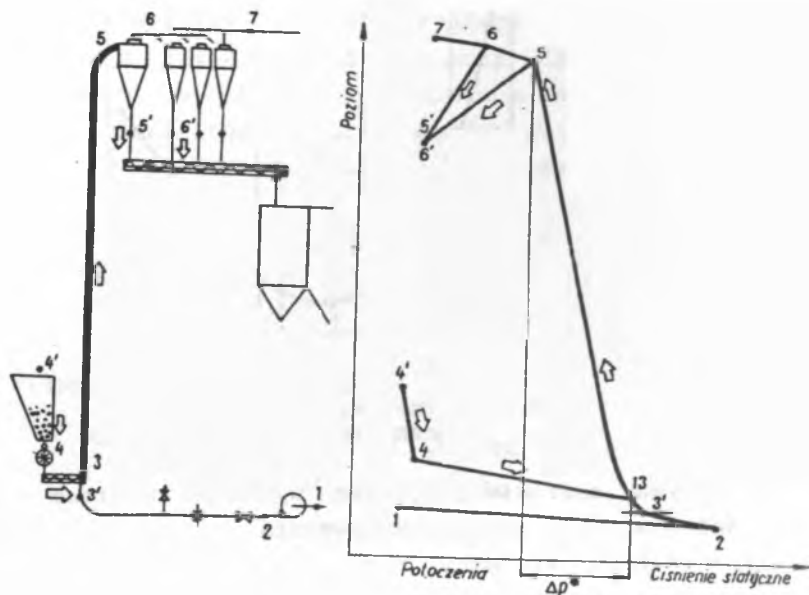
Wykorzystując pierścieniowy model pionowego transportu pneumatycznego wyznaczyć można charakterystykę transportu, tj. funkcję  $\Delta p_t = f/w_g$  dla danej średnicy przewodu i wydajności. Typowy przebieg tej funkcji przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przebieg charakterystyki transportu pneumatycznego

Krzywa charakteryzuje się wyraźnym minimum spadku ciśnienia. Fakt jego występowania przyjęto jako kryterium doboru średnicy rury transportowej i prędkości przepływu. Punktem wyjścia w opracowanej metodzie jest analiza rozkładu ciśnień statycznych w całej instalacji. Należy bowiem podkreślić, że podstawowym warunkiem poprawnej pracy instalacji pracującej z dwufazowymi układami gaz - ciało stałe jest prawidłowy rozkład ciśnień statycznych w poszczególnych węzłach: dozowania, separacji fazy stałej, magazynowania, obiegów cyrkulacyjnych [7]. Dla przykładowej instalacji z rys. 3a rozkład tych ciśnień przedstawiono na rys. 3b.

Dla odcinka pionowego transportu pneumatycznego 3-5 można zatem określić nieprzekraczalny gradient ciśnienia  $\Delta p^*$ . Z wartością tą w kolejnych iteracjach, według opracowanego algorytmu [9], porównywana jest wartość  $\Delta p_t$ , wyznaczana na podstawie znajomości punktu minimum charakterystyki transportu  $\Delta p_t = f/U_g$  dla danej średnicy rury i wydajności transportu. Zupełną zgodność obu wartości uzyskuje się zwykle już w trzeciej iteracji.



Rys. 3. Przykładowa instalacja pionowego transportu pneumatycznego i rozkład ciśnień statycznych

Opisana metoda znajduje pełne zastosowanie również przy projektowaniu instalacji, w których transport pneumatyczny połączony jest z równocześnie przebiegającymi procesami międzyfazowej wymiany ciepła lub masy. Kryterium doboru średnicy rury transportowej i prędkości ulega jednak zmianie. Zwykle bowiem projektant ma założone z bilansu materiałowego i cieplnego:

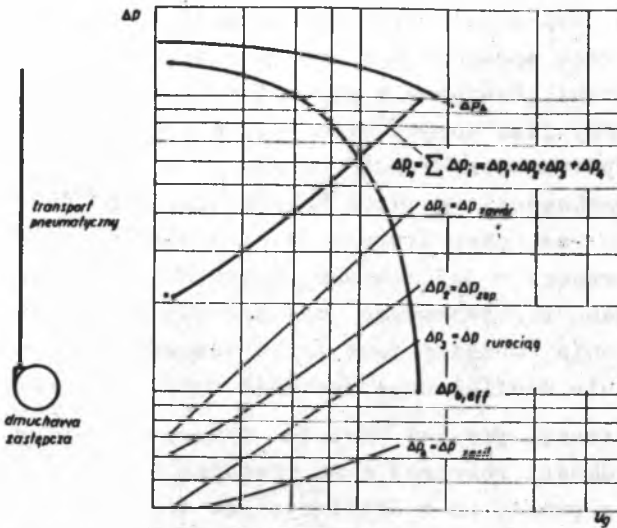
- a/ natężenia przepływu obu faz,
- b/ ustalony rozkład temperatur lub stężeń w obu fazach, w fazach wzdłuż wysokości rury transportowej lub w końcowych jej punktach

i zadaniem jego staje się takie dopasowanie średnicy, a więc i prędkości gazu, aby powierzchnia wymiany zabezpieczała uzyskanie założonego rozkładu temperatur lub stężeń na założonej wysokości.

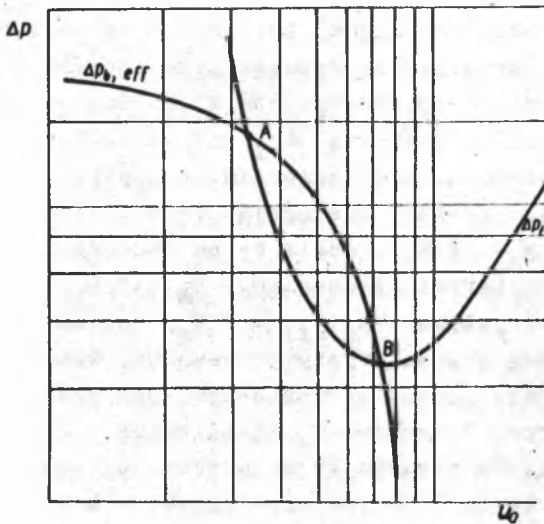
Dobór średnicy prowadzi się sprawdzając, czy wyznaczona dla danej średnicy porowatość transportu  $\bar{\epsilon}$  zabezpiecza wymagane dla procesów wymiany rozwinięcie powierzchni. Ponieważ z porowatością dla danej średnicy związany jest spadek ciśnienia w przewodzie transportowym /patrz wzory /5/ i /6/ /, zatem procedura powyższa w konsekwencji również sprowadza się do określenia punktu na charakterystyce transportu, niekoniecznie ułożonego w jej minimum. Spełnienie w tym. przypadku warunku równoczesnego wystąpienia minimalnego spadku ciśnienia możliwe jest tylko wówczas, gdy nie została wstępnie zdefiniowana wysokość rury transportowej.

Opisana powyżej metoda doboru średnicy przewodu i prędkości roboczej gazu prowadzi ostatecznie do określenia punktu na charakterystyce transportu  $\Delta p_t = f/u_g$ . Określenie tego punktu jest niezwykle istotne w dalszej procedurze doboru dmuchawy, gdyż jest to punkt pracy układu dmuchawa - sieć z armaturą - transport pneumatyczny. Poszczególne elementy instalacji, a więc: proste odcinki rurociągów, kolanka, inne zagięcia, trójniki zawory, urządzenia dozujące i oddzielające materiał sypki, można opisać, podobnie jak transport pneumatyczny, charakterystykami  $\Delta p_i = f/u_g$ . Charakterystyki te po zsumowaniu, z wyłączeniem transportu pneumatycznego, dają sumaryczną zastępczą charakterystykę elementów sieci  $\Delta p_n = f/u_g$ . Jeśli teraz charakterystykę tę odjąć od charakterystyki dmuchawy  $p_d = f/u_g$ , to uzyskaną charakterystykę  $\Delta p_{b,eff} = f/u_g$  można uważać za tzw. efektywną charakterystykę dmuchawy. Opisane powyżej postępowanie jest równoznaczne przypisaniu instalacji, np. z rys. 3a schematu zastępczego przedstawionego na rys. 4a. Na rysunku 4b zilustrowano proces konstruowania efektywnej charakterystyki dmuchawy.

Analizę układu transport pneumatyczny - dmuchawa zastępcza ze schematu przedstawionego na rys. 4 w aspekcie doboru dmuchawy prowadzi się wykorzystując charakterystykę: transportu i efektywną charakterystykę dmuchawy. Obie charakterystyki dla tego układu przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Zastępczy schemat instalacji pionowego transportu pneumatycznego i konstrukcja efektywnej charakterystyki dmuchawy



rys. 5. Przebieg charakterystyki dla schematu zastępczego



Jak widać, w odróżnieniu od typowych układów hydraulicznych rurociąg - pompa, charakterystyki te mają dwa punkty przecięcia A i B, przy czym tylko punkt B jest stabilnym punktem pracy układu dmuchawa zastępcza - transport pneumatyczny. Bliższą analizę takich układów przedstawiono w pracy [8]. Dobór dmuchawy wg opracowanej metody [10] sprowadza się do dopasowania punktu przecięcia efektywnej charakterystyki dmuchawy i charakterystyki transportu do punktu wyznaczonego podczas doboru średnicy przewodu i prędkości roboczej gazu.

Należy zauważyć, że w przypadku "czystego" transportu pneumatycznego, gdzie punkt ten znajduje się w punkcie minimum charakterystyki transportu, każdorazowo dobranie dmuchawy będzie bezpieczne, gdyż rozsuniecie punktów przecięcia charakterystyki  $\Delta p_{b,eff}$  i  $\Delta p_t$  jest znaczne. W przypadku transportu pneumatycznego z nałożonymi procesami wymiany ciepła lub masy punkt pracy może znaleźć się na lewej części charakterystyki transportu licząc od minimum i dopasowanie dmuchawy wg przebiegu jej efektywnej charakterystyki może być trudne z uwagi na znaczne zbliżenie się punktów pracy stabilnego B i niestabilnego A. W tym przypadku korzystne jest zastosowanie dmuchaw systemu Roota o bardziej, w stosunku do zwykle stosowanych dmuchaw promieniowych, pionowych charakterystykach

$$\Delta p_d = f/u_g/ \text{ i } \Delta p_{b,eff} = f/u_g/$$

Opisana procedura analizy zastępczego schematu instalacji transportu pneumatycznego pozwala na dodatkowe określenie dopuszczalnych nastaw zaworów regulujących przepływ gazu przez instalację, względnie optymalny dobór poszczególnych elementów sieci, jeśli mamy do czynienia z góry narzuconym typem urządzenia przetłaczającego. W tym przypadku sprawdzamy, jak wygląda przebieg efektywnych charakterystyk dmuchawy  $\Delta p_{b,eff}$  na tle charakterystyki transportu  $\Delta p_t$ . Należy zauważyć [8], że prawidłowa stabilna praca instalacji możliwa jest tylko w przypadku, gdy obie te charakterystyki mają punkt

przebiegu B. Stan krytyczny pracy osiągany jest w przypadku, gdy charakterystyki te stają się styczne. Eksperymentalnie ustalono [8], że po przekroczeniu punktu styczności następuje "zawał" transportu pneumatycznego.

#### LITERATURA

- [1] Gorbis Z.R.: Teploobmyen i gidromekhanika dispersnykh skvoznykh potokov, Energia, Moskwa 1970.
- [2] Leung L.S., Wills R.J., Nicklin D.J., Ind. and Eng. Chem. Process Design and Development, 10, 183/1971/
- [3] Palcjev W.C., Dmitruk E., Mukomolnoelevatornaya promyshlennost, Nr 8, /1965/
- [4] Filipov W.A., Sziszkov P.A., Potapov J.M.: Teplo- i massoobmyen dispersnykh potokov. Nauka, Minsk 1967.
- [5] Nakamura K., Capes C.E.: Can.J. Chem. Engng 51, 31, /1973/; 51, 39 /1973/.
- [6] Bandrowski J., Kaczmarzyk G., Nowak W., Ściążko M.: Inż.Chem. 7, 243, /1977/; 7, 499 /1977/.
- [7] Kunii D., Levenspiel O.: Fluidization Engineering, Wiley a. Sons, New York 1969.
- [8] Bandrowski J., Kaczmarzyk G., Raczek J., Malczyk R. Inż.Chem. 8, /1978/ in press.
- [9] Bandrowski J., Kaczmarzyk G.: Ściążko M., Inż. i Ap Chem. 16, 1 /1977, /No 5/.
- [10] Bandrowski J., Kaczmarzyk G., Raczek J.: Inż. i Ap. Chem. 17, /1978/, in press.

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ  
ВЕРТИКАЛЬНОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

## Р е з ю м е

Представлено методы оптимального подбора скорости газа и диаметра транспортного трубопровода и воздуходувки для вертикального пневматического транспорта сыпучих материалов при низком давлении. Метод подбора скорости газа и диаметра трубопровода базируется на характеристике транспорта  $p_t = f(u_g)$ . При подборе воздуховки использовано заместительную схему установки пневматического транспорта и эффективную характеристику воздуходувки.

CHOICE OF OPTIMUM OPERATING PARAMETERS  
OF VERTICAL PNEUMATIC TRANSPORT

## S u m m a r y

The paper describes the methods of optimum choice of the gas velocity, transport conduit diameter and blower type for low pressure vertical pneumatic transport of the loose materials.

The method of selection of the gas velocity and conduit diameter is based on the transport characteristic  $p_t = f(u_g)$ . For the blower choice the equivalent diagram of pneumatic transport installation and effective characteristic of the blower have been taken into consideration.