

Ewa JÓSKO<sup>1</sup>, Stanisław WITCZAK<sup>2</sup>

e-mail: ewajosko@op.pl

<sup>1</sup> Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska; WAKRO Sp. z o. o., Krępna<sup>2</sup> Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska

## Analiza systemów transportu pneumatycznego materiałów sypkich

## Wprowadzenie

W pracy przedstawiono analizę porównawczą wybranych modeli obliczeniowych wykorzystywanych do projektowania przemysłowych instalacji transportu pneumatycznego dla substancji drobno mielonych oraz pyłów. Przedstawione modele są wykorzystywane do obliczeń transportu pneumatycznego niskociśnieniowego tłoczącego, ssącego i tłocząco-ssącego dla materiałów sypkich i suchych o frakcji do 50 mm [3] (przykładowo piasku, zboża, produktów spożywczych, odpadów drzewnych). Dla projektanta takiego typu instalacji najważniejszymi parametrami są opory przepływu oraz zapotrzebowanie powietrza do transportu, ponieważ na podstawie tych wielkości dobiera się urządzenie zasilające.

Obliczenia przeprowadzono dla materiału modelowego o następujących właściwościach:

- gęstość właściwa materiału:  $\rho_m = 2000 \text{ kg/m}^3$ ,
- średnica cząstek materiału:  $d_z = 0,1 \text{ mm}$ .

Na podstawie przykładu przemysłowego przyjęto, że materiał jest transportowany rurociągiem poziomym o długości  $L = 100 \text{ m}$  i średnicy  $d = 82,5 \text{ mm}$  za pomocą powietrza. Obliczenia zostały wykonane dla kilku wartości wydajności masowej w zakresie  $m = (0,28 \div 0,56) \text{ kg/s}$ , przy średniej koncentracji masowej ciała stałego w mieszaninie  $\mu = 3$  oraz średniej prędkości przepływu powietrza  $w_p = 20 \text{ m/s}$ . Jako kryterium oceny poszczególnych modeli przyjęto wartości różnicy ciśnienia niezbędnej do transportu określonego strumienia mieszaniny powietrza i ciała stałego.

## Modele obliczeniowe

Obliczeniom porównawczym poddano trzy modele scharakteryzowane w tab. 1, które w głównej mierze opierają się na modyfikacji równania Darcy'ego-Weisbacha słusznego dla przepływów jednofazowych. Zmiany te polegają na uwzględnieniu w nich wpływu obecności cząstek ciała stałego w strumieniu powietrza na warunki ich transportu pneumatycznego poprzez modyfikacje sposobu obliczania współczynników oporu liniowego  $\lambda$ .

## Model Strumińskiego

Na podstawie przyjętych założeń projektowych  $m$ ,  $\mu$ ,  $\rho_m$ ,  $w_p$  w pierwszym etapie obliczeń według tego modelu [1] należy określić objętościowe natężenie przepływu  $V_p$ , na podstawie wzoru

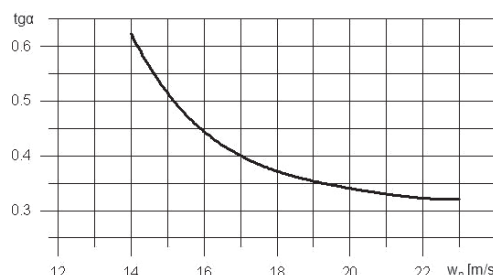
$$V_p = \frac{m}{\mu \rho_p} \quad (1.2)$$

a następnie wyznaczyć wartość współczynnika oporu liniowego dla powietrza  $\lambda_p$  ze wzoru Nikuradse (1.1).

Kolejnym etapem obliczeń jest określenie na podstawie wzoru (1) oporów przepływu transportowanej mieszaniny powietrza i ciała stałego. Występujący w równaniu (1) współczynnik doświadczalny  $\text{tg}\alpha$  uwzględnia charakterystyczne dla warunków transportu pneumatycznego zależności między prędkością powietrza a prędkością materiału; wpływ właściwości cząstek materiału na ich tarcie o powierzchnię rurociągu i tarcie powietrza o rurociąg, długość odcinków prostych i poziomych, stosunek tych długości oraz wpływ średnicy rurociągu. Wartość tego współczynnika zależy głównie od prędkości transportu i należy go wyznaczać z wykresu przedstawionego na rys. 1.

Tab. 1. Modele obliczeniowe

| Lp.  | Autor                         | Model   | Nr wzoru |
|--|-------------------------------|---|----------|
| 1  | Strumiński [1]                | $\Delta P = (1 + \mu \text{tg}\alpha) \lambda_p \frac{w_p^2 \rho_p L}{2 d}$           | (1)      |
|  |                               | gdzie: $\lambda_p = 0,032 + \frac{0,221}{Re_p^{0,237}}$<br>$\text{tg}\alpha = f(w_p)$ | (1.1)    |
| 2  | Gwoździecki, Świątkiewicz [2] | $P_p = P_k \sqrt{1 + w_p^2 \frac{L}{d}}$  | (2)      |
|  |                               | gdzie: $\lambda = \beta \mu$  | (2.1)    |
|  |                               | $\beta = f(S)$<br>$S = \frac{\mu L w_p^2}{d_w}$                                       | (2.2)    |
| 3  | Piątkiewicz [3]               | $\frac{P_1^2 - P_2^2}{2P_2} = \lambda \frac{w_p^2 \rho_p L}{2 d}$                     | (3)      |
|  |                               | gdzie: $\lambda = \lambda_p + \mu \lambda_c$  | (3.1)    |
|  |                               | $\frac{1}{\sqrt{\lambda_p}} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda_p}) - 0,8$                       | (3.2)    |
|  |                               | $\lambda_c = 2,1 \mu^{-0,3} Fr_w^{-1} Fr_c^{0,25} \left(\frac{d}{d_z}\right)^{0,1}$   | (3.3)    |
|  |                               | $Fr_w = \frac{w_{p1}^2 - w_{p2}^2}{2 \hat{g} d}$                                      | (3.4)    |
| $Fr_c = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2 \hat{g} d}$ | (3.5)                         |   |          |

Rys. 1. Zależność współczynnika  $\text{tg}\alpha$  od prędkości przepływu powietrza

## Model Gwoździeckiego i Świątkiewicza

Korzystając z tego modelu [2] prędkość przepływu powietrza wyznacza się w oparciu o wzór empiryczny

$$w_p = \alpha \sqrt{0,001 \rho_p} + B L^2 \quad (2.3)$$

gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem uwzględniającym wielkość cząstek materiału (Tab. 2), a  $B = (2 \div 5) \cdot 10^{-5}$  – współczynnikiem empirycznym, w którym mniejsze wartości należy przyjmować dla suchych materiałów pylistych.

Prędkość przepływu otrzymana w analizowanym przykładzie obliczeniowym ze wzoru (2.3) odpowiadała wartości liczbowej założonej lub obliczonej według innych modeli. Następnie określa się zapotrzebowanie powietrza do transportu na podstawie wzoru

$$V_p = \frac{\pi d_w^2}{4} w_p \quad (2.4)$$

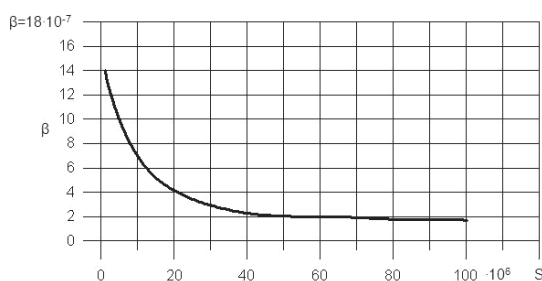
Współczynnik koncentracji  $\mu$  oblicza się z zależności

$$\mu = \frac{m}{V_p \rho_p} \quad (2.5)$$

Tab. 2. Współczynnik  $\alpha$  uwzględniający granulację materiału

| Rodzaj                      | Największy wymiar cząsteczki $d_z$ , mm | $\alpha$ |
|-----------------------------|---|----------|
| Pylisty                     | 0,001–1                                 | 10–16    |
| Ziarnisty jednorodny        | 1–10                                    | 17–20    |
| Drobnokawałkowy jednorodny  | 10–20                                   | 20–22    |
| Średniokawałkowy jednorodny | 40–80                                   | 22–25    |

Obliczenia oporów przepływu dla rurociągu poziomego należy wykonać wykorzystując wzór (2), w którym współczynnik oporu ruchu  $\lambda$  zależy od koncentracji mieszaniny materiału transportowanego i powietrza oraz współczynnika doświadczalnego  $\beta$  wg wzoru (2.1), zależnego od wielkości  $S$  opisanej wzorem (2.2). Współczynnik  $\beta$  dla instalacji tłoczących określa się na podstawie wykresu przedstawionego na rys. 2, a dla instalacji ssących przyjmuje się stałą jego wartość  $\beta = 1,5 \cdot 10^{-7}$ .



Rys. 2. Współczynnik  $\beta$  w zależności od  $S$  dla instalacji tłoczących

### Model Piątkiewicza

W tym modelu [3] na podstawie przyjętego współczynnika koncentracji  $\mu$ , podobnie jak w modelu *Strumińskiego* [1], oblicza się strumień objętościowy powietrza ze wzoru (1.2). Należy również przed przystąpieniem do obliczeń założyć zadany spadek ciśnienia na rurociągu  $\Delta P_{1-2}$  oraz spadek ciśnienia w urządzeniu odbiorczo-odpylającym  $\Delta P_2$ . Na podstawie tych założeń należy określić gęstość powietrza, prędkość oraz ciśnienie na początku i końcu rurociągu z następujących wzorów:

$$P_2 = \Delta P_2 + P_N \quad (3.4)$$

$$P_1 = \Delta P_{1-2} + P_2 \quad (3.5)$$

$$\rho_{p2} = \frac{\rho_p P_2}{P_N} \quad (3.6)$$

$$\rho_{p1} = \frac{\rho_2 P_1}{P_2} \quad (3.7)$$

$$w_{p1} = \frac{m}{\mu A \rho_{p1}} \quad (3.8)$$

$$w_{p2} = \frac{w_{p1} P_1}{P_2} \quad (3.9)$$

gdzie:  $P_N$  oznacza ciśnienie w warunkach normalnych, a  $\rho_N$  – gęstość powietrza w warunkach normalnych.

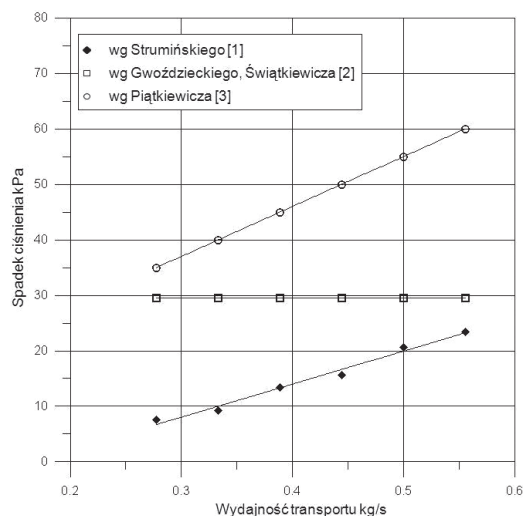
W przypadku transportu niskociśnieniowego o koncentracji masowej  $\mu = 3$ , zakłada się stosunek prędkości fazy stałej do gazu w zakresie  $c/w = 0,5 \div 0,8$  i na tej podstawie określa się prędkość  $c$  materiału w rurociągu.

Wykorzystując obliczone prędkości faz wyznacza się liczbę *Froude'a* dla poszczególnych składników mieszaniny dla parametrów opisanych wzorami (3.4) i (3.5).

Opory przepływu oblicza się wykorzystując równanie (3), w którym występujący współczynnik oporu mieszaniny  $\lambda$  wyznacza się ze wzoru (3.1). Współczynnik oporu ruchu powietrza  $\lambda_p$  zależy od liczby *Rey-*

*nolds* i dla ruchu burzliwego wyznaczany jest z równania *Prandtla* (3.2), natomiast współczynnik oporu ruchu dla ciała stałego  $\lambda_c$  odpowiednio ze wzoru (3.3).

Wyniki obliczeń oporów przepływu na podstawie wszystkich analizowanych modeli różnych autorów przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zależność wartości oporów przepływu od wydajności masowej transportu

### Wnioski

Opisane modele różnią się między sobą podejściem do obliczeń. W modelach *Strumińskiego* [1] i *Piątkiewicza* [3] należy założyć współczynnik koncentracji  $\mu$ , co determinuje końcowe wyniki obliczeń, ponieważ przy jego stałej wartości wraz ze wzrostem wydajności  $m$  zwiększa się strumień przepływającego powietrza, a wraz z nim wartość oporów przepływu. Z kolei w przypadku obliczeń według propozycji *Gwoździeckiego* i *Świątkiewicza* [2], koncentrację transportową oblicza się przy stałym przepływie powietrza, w rezultacie czego na rys. 3 opory opisuje stała wartość na poziomie około 30 kPa.

Otrzymane wartości liczbowe oporów przepływu różnią się między sobą. Rozbieżności te dla modeli *Piątkiewicza* [3] i *Strumińskiego* [1] sięgają około 30 kPa. Jest to związane ze sposobem obliczania współczynników oporu oraz doбором współczynników doświadczalnych.

Największe wartości uzyskano dla modelu *Piątkiewicza* [3], który uwzględnia w obliczeniach zmianę właściwości oraz prędkości gazu na początku i na końcu przewodu transportowego, a także na podstawie licznych badań doświadczalnych przeprowadzonych dla różnych materiałów definiuje współczynnik oporów ruchu dla materiału sypkiego  $\lambda_c$ . Natomiast najniższe wartości oporów przepływu uzyskano dla modelu *Strumińskiego* [1], w którym obliczenia wykonuje się analogicznie jak dla przepływu czystego gazu w przewodzie, uwzględniając jedynie współczynnik doświadczalny  $t_{ga}$  zależny od prędkości przepływu powietrza.

Dokonując wyboru metody obliczeniowej należy zwrócić uwagę na to, aby dany model jak najdokładniej opisywał warunki ruchu cząstek ciała stałego w powietrzu oraz uwzględniał wszystkie czynniki mające wpływ na jego transport. Spośród przedstawionych metod obliczeniowych w największym stopniu spełnia te warunki model *Piątkiewicza* [3].

Przedstawione obliczenia porównawcze mogą być wskazówką przy doborze właściwej metodyki obliczeniowej.

### LITERATURA

- [1] J. *Strumiński*: Transport pneumatyczny. IPP 64, Warszawa 1968.
- [2] M. *Gwoździecki*, H. *Świątkiewicza*: Przenośniki. WNT, Warszawa 1979
- [3] Z. *Piątkiewicz*: Transport pneumatyczny. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.