

EWA JÓSKO*

PAWEŁ SKOTNICKI**

Ocena wpływu kształtu dyszy ssącej na wydajność i opory przepływu w podciśnieniowym transportie pneumatycznym

W pracy przedstawiono wyniki badań nad określeniem wpływu kształtu dyszy ssącej na wydajność i opory przepływu dwufazowego gazu i ciała stałego w typowej instalacji podciśnieniowego transportu pneumatycznego. Do analiz wykorzystano płaskie dysze ssące o kącie rozwarcia $\alpha = 40^\circ$ i 60° . W przypadku płaskich dysz stożkowych, dzięki rozwinięciu powierzchni kontaktu dyszy z lustrem materiału, więcej powietrza jest pobierane przez dyszę, przez co maleje ryzyko blokady rurociągu. Takie rozwiązanie pozwala na zastosowanie tego typu dysz do transportu materiałów drobnoziarnistych, które ze względu na ograniczone możliwości dysz rurowych nie mogły być transportowane podciśnieniowo.

1. Wprowadzenie

1.1. Transport pneumatyczny

Transport pneumatyczny jest metodą, która wykorzystuje ruch powietrza powstały w wyniku różnicy ciśnień pomiędzy początkiem a końcem przewodu transportowego, do przemieszczania materiałów sypkich. Ze względu na łatwość aplikacji, możliwość prowadzenia rurociągów w pionie i poziomie, hermetyczność, a także niskie koszty jest jednym z najpopularniejszych sposobów transportu materiałów sypkich.

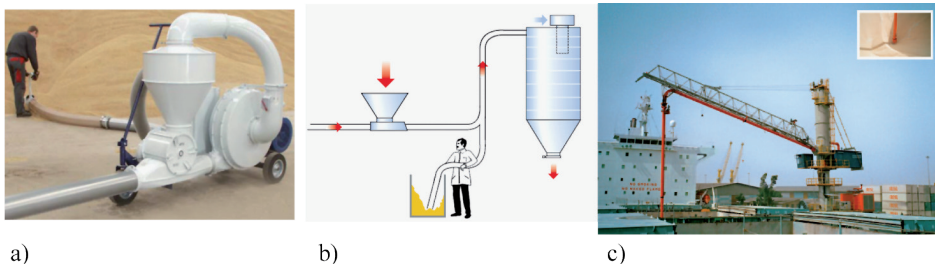
Każda instalacja transportu pneumatycznego zbudowana jest z następujących elementów:

* Mgr inż., Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny.

** Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu.

- źródła powietrza, którym może być: wentylator, dmuchawa, kompresor lub pompa próżniowa;
- urządzeń podających, takich jak: dysze ssące, inżektory, dozowniki celkowe, podajniki komorowe;
- rurociągów transportowych, które stanowią: rury stalowe, przewody elastyczne, kolana, rozdzielacze dwu- i wielodrogowe;
- urządzeń odbierających, takich jak: cyklony, filtry, filtrocyclony, bufory i silosy.

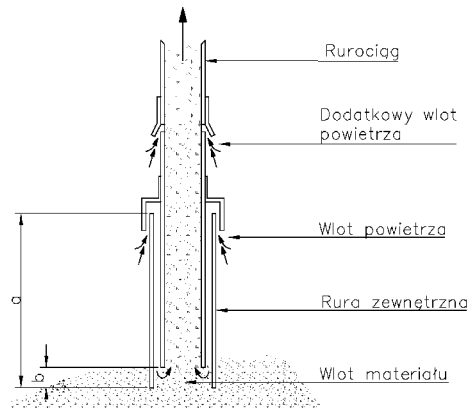
W zależności od sposobu wytwarzania różnicy ciśnień układy transportu pneumatycznego można podzielić na: ssące (podciśnieniowe), tłoczące (nadciśnieniowe) i mieszane (ssąco-tłoczące). Powszechnie w instalacjach przemysłowych do rozładunku autocystern i przemieszczania materiału sypkiego w procesie technologicznym stosuje się instalacje nadciśnieniowe wykorzystujące urządzenia podające, takie jak: dozowniki celkowe, inżektory, pompy Fullera, podajniki komorowe itp. Z kolei systemy transportu podciśnieniowego i układy mieszane stosowane są do przemieszczania materiałów sypkich z otwartych beczek, zbiorników, otwartych przym i ładowni statków (ryc. 1). W tego rodzaju systemach elementem pobierającym surowiec jest dysza ssąca. W ssącym transporcie pneumatycznym, ze względu na stosowanie podciśnienie do 0,05 MPa, długość drogi transportu jest ograniczona do ok. 100 m, co pozwala na przemieszczanie niewielkich ilości materiału sypkiego. Niemniej jednak tego rodzaju transport jest wykorzystywany w procesach dozowania materiałów sypkich.



Ryc. 1. Przykłady zastosowania podciśnieniowego transportu pneumatycznego: a) maszyna ssąco-tłocząca [1], b) załadunek silosu [2], c) rozładunek statku [3]

1.2. Dysza ssąca

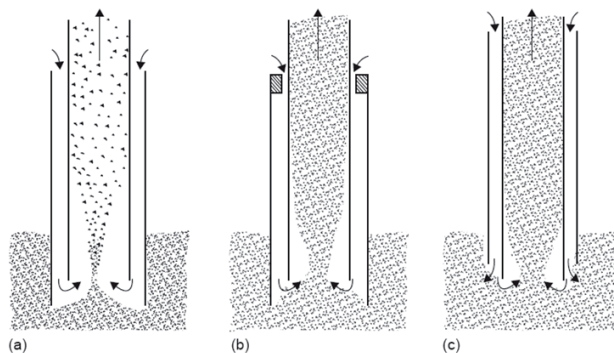
Dysze ssące stosuje się w przypadku bezpośredniego dostępu do górnej powierzchni materiału sypkiego. Jej konstrukcja powinna umożliwiać swobodny przepływ materiału bez pulsacji i blokowania się rurociągu, nawet w przypadku głębokiego zanurzenia w materiale. W tym celu do wlotu dyszy należy dostarczyć odpowiednią ilość powietrza konieczną do transportu materiału sypkiego.



Ryc. 2. Budowa rurowej dyszy ssącej [4]

Najbardziej popularnym typem dyszy jest dysza zbudowana z dwóch współosiowych rur wewnętrznej i zewnętrznej, określana często jako rurowa (ryc. 2). Utworzona pomiędzy rurami pierścieniowa szczelina umożliwia zasysanie materiału sypkiego i dopływ zewnętrznego powietrza. W tym obszarze tworzy się mieszanina dwufazowa materiału sypkiego i powietrza, która jest transportowana dalej rurociągiem do urządzenia odbiorczego. Powietrze z otoczenia zasysane jest przez otwór znajdujący się na wysokości „a” rury zewnętrznej powyżej linii materiału.

Regulacji wydajności transportu pneumatycznego można dokonać przez zmianę wysokości szczeliny „b”. Obniżenie tej wysokości powoduje zwiększenie koncentracji ciała stałego w powietrzu, a zatem zwiększa się wydajność. Odwrotny efekt uzyska się zwiększając wysokość „b”. Inne sposoby regulacji wydajności rurowych dysz ssących przedstawiono na rycinie 3.



Ryc. 3 Sposoby regulacji rurowych dysz ssących [4]

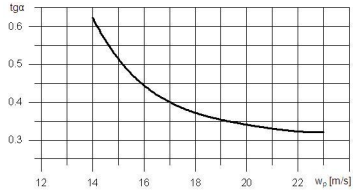
Dysze rurowe posiadają jednak spore ograniczenia: nie mogą być stosowane do materiałów drobnoziarnistych ze względu na duże ryzyko blokowania się rurociągu oraz są nieefektywne w instalacjach bezobsługowych.

2. Modele obliczeniowe oporów przepływu

Do obliczeń inżynierskich często stosuje się literaturowe modele obliczeniowe, np.: Strumińskiego [5] lub Piątkiewicza [6], które pozwalają na obliczenie oporów przepływu w przewodach transportowych (tab. 1). Modele te opierają się o równanie Darcy'ego-Weisbacha stosowane do obliczania strat ciśnienia dla przepływów jednofazowych i uwzględniają wpływ cząsteczek ciała stałego poprzez modyfikację współczynników oporów ruchu λ lub dodatkowe współczynniki doświadczalne. Stosowane są do obliczania różnicy ciśnień na początku i końcu przewodu transportowego przy transporcie pneumatycznym w fazie rzadkiej, gdzie dominującą fazą jest gaz.

Tabela 1

Modele obliczeniowe

Model Strumińskiego [5]	Nr wzoru	Model Piątkiewicza [6]	Nr wzoru
$\Delta P = (1 + \mu \text{tg}\alpha) \cdot \lambda_p \frac{w_p^2 \rho_p \cdot L}{2 \cdot d}$ <p>gdzie:</p> $\lambda_p = 0,032 + \frac{0,221}{\text{Re}_p^{0,237}}$ <p>$\text{tg}\alpha = f(w_p)$</p> 	(1)	$\frac{P_1^2 - P_2^2}{2 \cdot P_2} = \lambda \frac{w_{p2}^2 \cdot \rho_{p2} \cdot L}{2 \cdot d}$ <p>gdzie:</p> $\lambda = \lambda_p + \mu \cdot \lambda_c$ $\frac{1}{\sqrt{\lambda_p}} = 2 \lg (\text{Re} \sqrt{\lambda_p}) - 0,8$ $\lambda_c = 2,1 \mu^{-0,3} \cdot Fr_w^{-1} \cdot Fr_c^{0,25} \cdot \left(\frac{d}{d_z}\right)^{0,1}$ $Fr_w = \frac{w_{p1}^2 - w_{p2}^2}{2 \hat{g} d}$ $Fr_c = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2 \hat{g} d}$	(2)
	(1.1)		(2.1)
			(2.2)
			(2.3)
			(2.4)
			(2.5)

Oznaczenia:

ΔP – straty ciśnienia (opory przepływu) [Pa],

λ – współczynnik oporów przepływu,

L – długość przewodu transportowego [m],

d – średnica przewodu transportowego [m],

μ – koncentracja masowa [kg/kg],

$\text{tg}\alpha$ – współczynnik doświadczalny,

λ_p – współczynnik oporów przepływu wg Nikuradse,

w_p – prędkość powietrza w przewodzie [m/s],

ρ_p – gęstość powietrza [kg/m³],

P_1 – ciśnienie na początku przewodu [Pa],

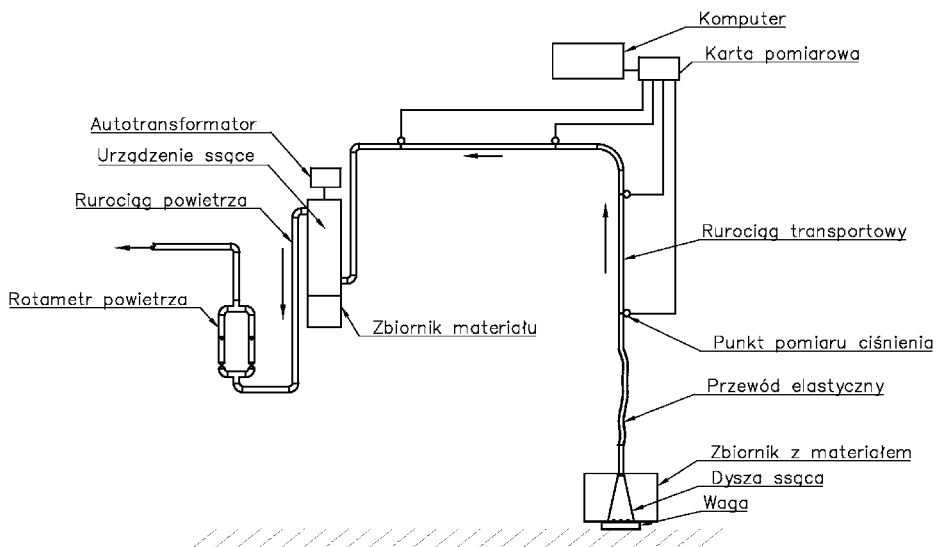
P_2 – ciśnienie na końcu przewodu [Pa],

w_{p2} – prędkość przepływu powietrza na końcu przewodu [m/s],

w_{p1} – prędkość przepływu powietrza na początku przewodu [m/s],
 ρ_{p2} – gęstość powietrza na końcu przewodu [kg/m³],
 Fr_w – liczba Frouda dla powietrza,
 Fr_c – liczba Frouda dla ciała stałego,
 d_z – średnica zastępcza cząstki ciała stałego [m],
 \hat{g} – przyspieszenie ziemskie [m²/s],
 c_1 – prędkość przepływu ciała stałego na początku przewodu,
 c_2 – prędkość przepływu ciała stałego na końcu przewodu,
 Re – liczba Reynoldsa.

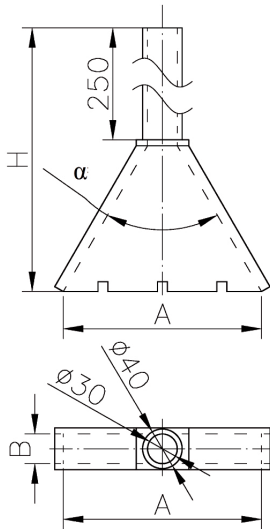
3. Stanowisko badawcze i metodyka pomiarów

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano i wykonano stanowisko pomiarowe typowej instalacji transportu pneumatycznego, gdzie elementem zasilającym rurociąg jest dysza ssąca (ryc. 4). W badaniach wykorzystano dysze stożkowe płaskie o kącie rozwarcia $\alpha = 40^\circ, 60^\circ$ oraz stosunku pola przekroju wlotowego do pola przekroju rurociągu transportowego $F_1/F_2 = 8,5$ (ryc. 5).



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Schemat stanowiska badawczego



Dysza	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 40^\circ$
A	200 mm	200 mm
B	30 mm	30 mm
H	400 mm	490 mm

Ź r ó ł o: Jak w ryc. 4.

Ryc. 5. Płaska stożkowa dysza ssąca

Materiał sypki pobierany był z dolnego zbiornika umieszczonego na wadze za pomocą dyszy ssącej i transportowany rurociągiem do górnego zbiornika materiału znajdującego się w urządzeniu ssącym. Zbiornik materiału, dysza ssąca oraz rurociągi transportowe zostały wykonane z transparentnego PMMA, dzięki czemu możliwa była obserwacja i rejestracja obrazu struktur przepływu. Strumień powietrza był regulowany przez autotransformator zmieniający napięcie na urządzeniu ssącym i kontrolowany za pomocą rotametrów umieszczonych na rurociągu wylotowym powietrza. Na długości rurociągu rozmieszczono elektroniczne czujniki do pomiaru ciśnienia, z których dane poprzez kartę pomiarową były rejestrowane na dysku komputera.

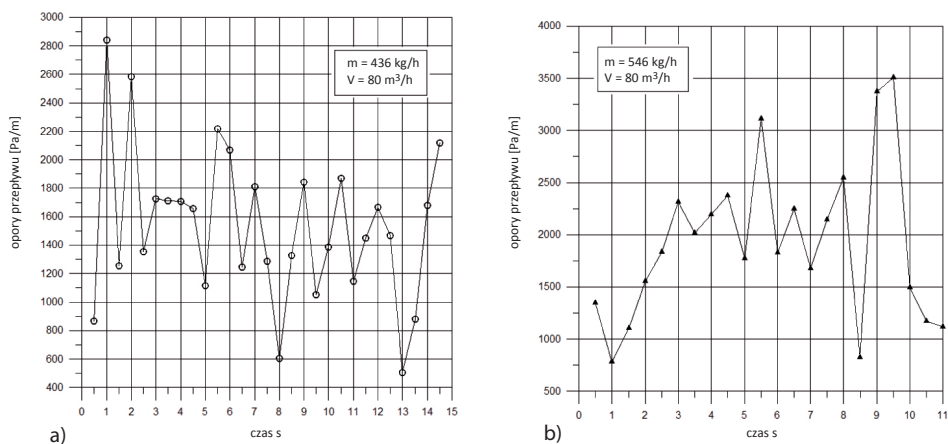
Metodyka badań polegała na pomiarze spadków ciśnienia rurociągu transportowego przy stałym strumieniu przepływającego powietrza oraz pomiarze czasu transportu znanej ilości materiału. Jako materiał modelowy do badań wykorzystano mak niebieski o średniej gęstości nasypowej 640 kg/m^3 .

4. Wyniki badań

4.1. Wydajność i opory przepływu

Dla dyszy stożkowej płaskiej o kącie rozwarcia $\alpha = 40^\circ$ oraz $\alpha = 60^\circ$ wykonano charakterystyki przebiegu spadków ciśnienia w rurociągu transportowym (ryc. 6). Pomiary przeprowadzono dla stałej wartości strumienia objętościowego powietrza $\dot{V} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$. W zależności od zastosowanej dyszy otrzymano różne wartości wydajności transportu pneumatycznego \dot{m} .

Zauważono również, że na wydajność ma wpływ tworząca się wewnątrz dyszy struktura przepływu materiału sypkiego z powietrzem. Etapy tworzenia się struktury przedstawiono na rycinach 7 i 8.

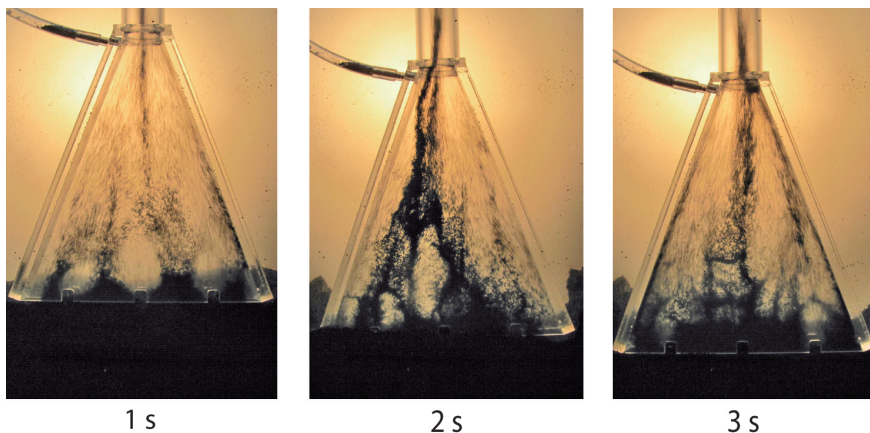


Źródło: Jak w ryc. 4.

Ryc. 6. Przebieg spadków ciśnienia w czasie dla dyszy stożkowej płaskiej:

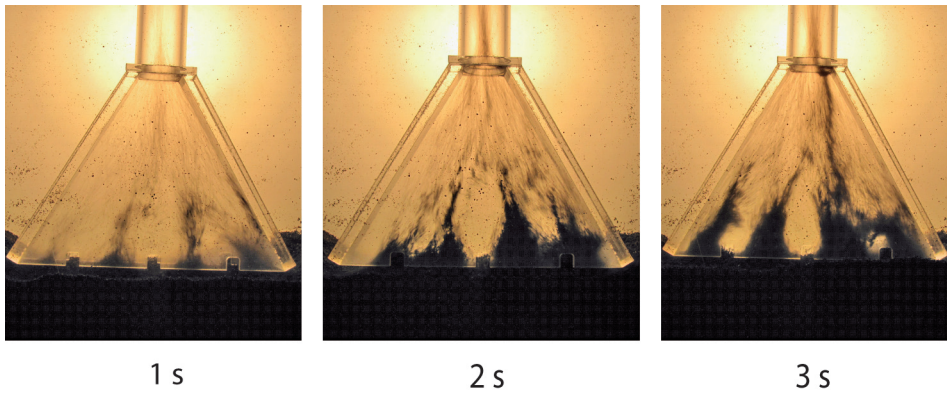
a) $\alpha = 40^\circ$, b) $\alpha = 60^\circ$

W przypadku dyszy stożkowej płaskiej o kącie rozwarcia $\alpha = 60^\circ$ uzyskano większą wydajność transportu pneumatycznego niż w przypadku dyszy o kącie $\alpha = 40^\circ$. Spowodowane jest to mniejszymi zaburzeniami strugi materiału w dyszy, w porównaniu z dyszą $\alpha = 40^\circ$, w wyniku czego wzrasta koncentracja materiału sypkiego, a tym samym wydajność. W dyszy o kącie $\alpha = 40^\circ$ część podniesionego materiału nie osiąga wysokości wlotu do rurociągu, przez co opada, tworząc cyrkulacyjne zaburzenia. Dla dyszy o kącie $\alpha = 60^\circ$ średnie opory przepływu wyniosły ok. 1800 Pa/m, natomiast dla dyszy $\alpha = 40^\circ$ kształtowały się na poziomie 1400 Pa/m. Ta różnica spowodowana jest większą wydajnością dyszy $\alpha = 60^\circ$.



Źródło: Jak w ryc. 4.

Ryc. 7. Formowanie się struktury przepływu dla dyszy stożkowej płaskiej $\alpha = 40^\circ$

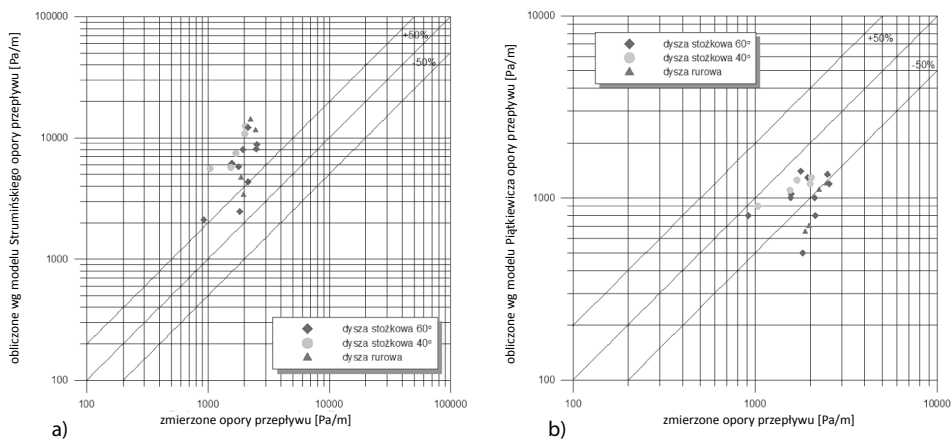


Z r ó d ł o: Jak w ryc. 4.

Ryc. 8. Formowanie się struktury przepływu dla dyszy stożkowej płaskiej $\alpha = 60^\circ$

4.2. Ocena dokładności modeli obliczania spadków ciśnienia

W trakcie badań dokonano pomiarów spadków ciśnienia w poziomym odcinku rurociągu transportowego. Uzyskane wyniki zostały porównane z wartościami obliczonymi według modeli Strumińskiego i Piątkiewicza. Dodatkowo do badań została włączona dysza ssąca rurowa, którą stanowił odcinek prostej rury o średnicy równej średnicy rurociągu transportowego. Wyniki badań zaprezentowano na rycinie 9.



Ryc. 9. Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości oporów przepływu: a) wg modelu Strumińskiego, b) wg modelu Piątkiewicza

Po analizie otrzymanych wyników stwierdzono, że w przypadku modelu Strumińskiego zmierzone wartości spadków ciśnienia różnią się od wartości obliczonych o ponad 50% błędu względnego. Tylko nieliczne punkty mieszczą się w przyjętej granicy błędów. Można również zauważyć, że wartości obliczone według tego modelu są zawyżone w porównaniu z wartościami zmierzonymi.

W przypadku modelu Piątkiewicza większość punktów mieści się w przyjętej granicy błędu. Model ten daje dokładniejsze wyniki w porównaniu z modelem Strumińskiego.

5. Wnioski

W wyniku przeprowadzonej oceny wpływu kształtu dyszy ssącej na wydajność i opory przepływu w podciśnieniowym transporcie pneumatycznym można stwierdzić, że:

1. Do obliczeń inżynierskich i projektowych strat ciśnienia w rurociągach transportu pneumatycznego korzystnie jest stosować model Piątkiewicza, ponieważ model ten opiera się na współczynnikach oporów ruchu wyznaczanych z równań empirycznych, przez co uzyskane wyniki w większości pokrywają się z rzeczywistymi wartościami.
2. Stosowanie modelu Strumińskiego do obliczeń może powodować przewymiarowanie urządzeń zasilających linię transportu pneumatycznego.
3. Kształt dyszy ssącej ma wpływ na wydajność i opory przepływu w podciśnieniowym transporcie pneumatycznym.
4. Powstające w stożkowej dyszy ssącej zaburzenia i cyrkulacje materiału sypkiego determinują wydajność transportu pneumatycznego.
5. Opory przepływu rosną wraz ze wzrostem ilości przenoszonego materiału sypkiego.

Literatura

- [1] Materiały firmy Kongsilde, Denmark, www.kongsilde.com (23.05.2011).
- [2] Materiały firmy Gericke, www.gericke.net (23.05.2011).
- [3] Materiały firmy Neuero, Germany, www.neuero.de (23.05.2011).
- [4] Mills D., *Pneumatic conveying design guide*, 2 ed., Elsevier, London 2004.
- [5] Strumiński J., *Transport pneumatyczny*, Biuro Studiów i Projektów Typowych Budownictwa Przemysłowego, Warszawa 1963.
- [6] Piątkiewicz Z., *Transport pneumatyczny*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.

EWA JÓŚKO
PAWEŁ SKOTNICKI

EVALUATION OF SUCTION NOZZLE SHAPE INFLUENCE
AT EFFICIENCY AND PRESSURE DROP IN VACUUM PNEUMATIC
CONVEYING

The aim of the research was to determine influence of the suction nozzle shape at nature of two phase gas-solid flow and pressure drop in typical vacuum pneumatic conveying systems. In the research there were used flat suction nozzles with flare angle $\alpha = 40^\circ, 60^\circ$. Flat conical nozzles, due to expanded contact surface with material level, suck more air what decreases risk of pipeline clogging. This solution enables use of the above nozzles for transport of fine-grained materials, which because of limited possibilities of pipe nozzles could not be vacuum transported.