

EWA SKOTNICKA\*

STANISŁAW WITCZAK

Politechnika Opolska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Inżynierii Procesowej

## Ocena wpływu kształtu dyszy ssącej na energochłonność podciśnieniowego transportu pneumatycznego

Przedstawiono badania wpływu kształtu dyszy ssącej na warunki transportu pneumatycznego takie jak: strumień masy materiału sypkiego, strumień masy powietrza, ciśnienie na dyszy ssącej. Podjęto również próbę oceny wpływu zaburzeń strugi materiału sypkiego wewnątrz dyszy ssącej na energochłonność podciśnieniowego transportu pneumatycznego. Opis mechaniki powstawania zaburzeń w dyszy ssącej i jej wpływu na warunki transportu pneumatycznego pozwoli na opracowanie kryteriów doboru dysz ssących w zależności od transportowanego materiału sypkiego.

### 1 Wstęp

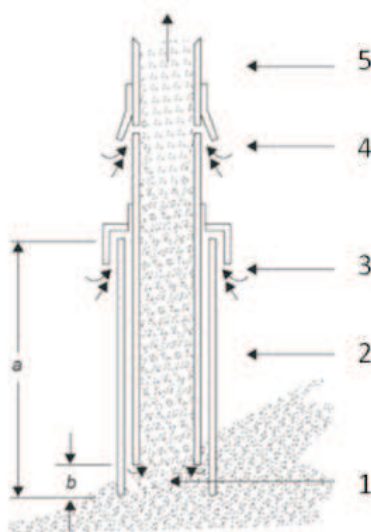
Podciśnieniowy transport pneumatyczny znajduje zastosowanie w wielu gałęziach gospodarki m.in. w przemyśle materiałów sypkich, cementowo-wapiennym oraz w energetyce. Ze względu na swoje liczne zalety takie jak: hermetyczność transportu, możliwość prowadzenia rurociągów w pionie i w poziomie oraz małe gabaryty, transport pneumatyczny wykorzystywany jest w procesach dozowania materiałów sypkich, przenoszenia surowca na krótkich odcinkach, rozładunku zbiorników i beczek oraz do pobierania materiału z otwartych pryzm. Głównym elementem decydującym o pracy układu podciśnieniowego transportu pneumatycznego jest dysza ssąca, której zadaniem jest stabilne i równomierne podawanie materiału sypkiego do rurociągu przesyłowego ze stałą wydajnością. Dzięki odpowiedniemu doborowi dyszy ssącej do przenoszonego materiału sypkiego można ten system transportu zastosować do precyzyjnego dozowania surowców, bez użycia dodatkowych mechanicznych dozowników. Dobór dyszy ssącej nie jest zadaniem prostym ze względu na stochastyczny charakter ruchu cząstek materiału sypkiego

---

\*E-mail: ewa.skotnicka@gmail.com

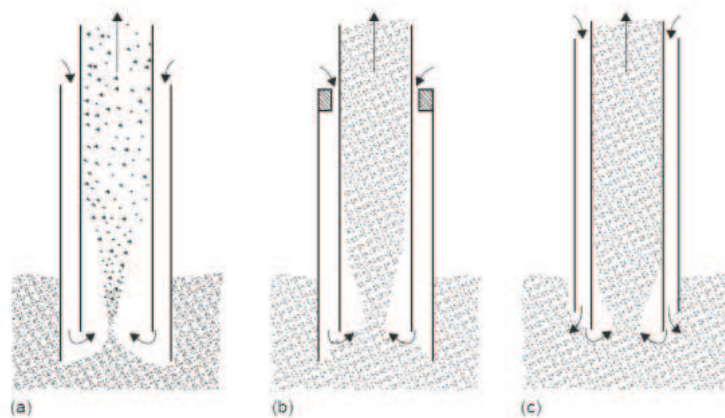
w jej wnętrzu, spowodowany lokalnymi zmianami prędkości przepływu powietrza, które z kolei wynikają ze zmiany charakteru przepływu materiału sypkiego na dalszych odcinkach rurociągu przesyłowego. Jeżeli na dalszym odcinku rurociągu dojdzie do zablokowania się transportu lub zawału spowodowanego innymi niż dysza ssące przeszkodami lokalnymi to zmiana prędkości powietrza w rurociągu będzie determinować ruch cząstek w dyszy ssącej.

Istnieje kilka konstrukcji dyszy ssących, jednak największą popularnością cieszą się dysze rurowe zbudowane z pojedynczej rury lub układu typu rura w rurze (rys. 1). Układy te mają możliwość regulacji ilości zasysanego powietrza przez dyszę, dzięki zmianie położenia rury zewnętrznej, rys. 2. W pracy rozpatrywano trzy przypadki ustawienia rur dyszy względem siebie. W pierwszym z nich, dopływ powietrza do wlotu dyszy jest największy, co powoduje obniżenie wydajności dyszy. W drugim przypadku dopływ powietrza zostaje ograniczony, dzięki czemu wydajność dyszy wzrosła. Ostatni przypadek obrazuje wpływ wysunięcia wewnętrznej rury względem zewnętrznej, uzyskuje się w ten sposób największą wydajność jednak ten typ regulacji ma ograniczone zastosowanie ze względu na możliwość zablokowania się dyszy.



Rysunek 1. Budowa rurowej dyszy ssącej [1]: 1 – wlot materiału, 2 – rura zewnętrzna, 3 – wlot powietrza, 4 – drugi wlot powietrza, 5 – rurociąg transportowy

Ze względu na znaczne ograniczenia rurowych dysz ssących spowodowane dużym ryzykiem blokowania się materiałów drobnych i pylistych podczas trans-



Rysunek 2. Sposoby regulacji wydajności rurowej dyszy ssącej [1]

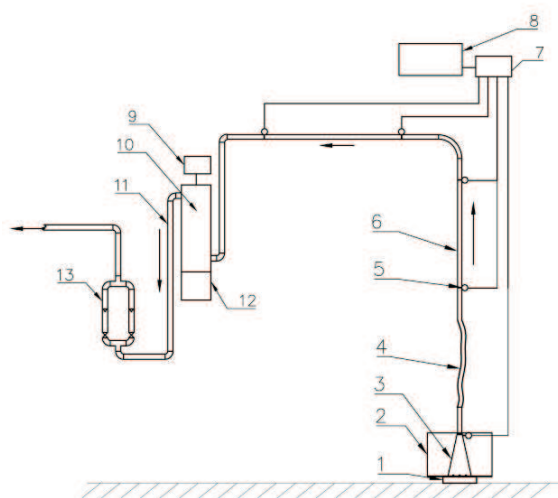
portu pneumatycznego do badań nad wpływem kształtu dyszy ssącej na energochłonność procesu transportu pneumatycznego wykorzystano dysze stożkowe, które dzięki kilkukrotnie zwiększonej powierzchni kontaktu z materiałem sypkim, w stosunku do dyszy rurowej, pozwalają na transportowanie materiałów drobnych i pylistych.

Z analizy stanu wiedzy [2–4] wynika, że do tej pory nie prowadzono badań, których wyniki pozwoliłyby na określenie, jaki kształt dyszy ssącej jest odpowiedni dla danego materiału sypkiego o znanych właściwościach. Dotyczy to zarówno dysz o kształcie rurowym jak i każdym innym. Badania tego typu nie były podejmowane ze względu na niestabilność procesu podciśnieniowego transportu pneumatycznego z wykorzystaniem dyszy ssącej.

## 2 Modelowy układ podciśnieniowego transportu pneumatycznego

Na potrzeby badań zbudowano stanowisko doświadczalne przedstawione na rys. 3, które jest układem podciśnieniowym transportu pneumatycznego wykonanym w skali 1:1, który może być zastosowany w przemyśle do dozowania niewielkich ilości materiału sypkiego. Główne elementy układu to: dysza ssąca z możliwością szybkiej wymiany, rurociągi transportowe pionowe oraz poziome oraz urządzenie odbiorczo-zasilające.

Strumień masowy transportowanego materiału obliczano, jako iloraz ubytku masy w zbiorniku z materiałem sypkim i czasu transportu mierzonego od chwili

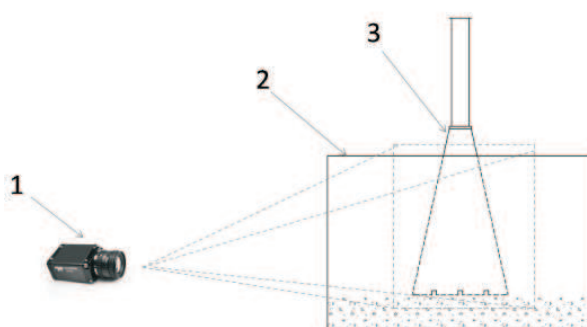


Rysunek 3. Stanowisko badawcze: 1 – waga, 2 – dysza ssąca, 3 – zbiornik z materiałem sypkim, 4 – przewód elastyczny, 5 – punkt pomiaru ciśnienia, 6 – przewód transportowy, 7 – karta pomiarowa, 8 – komputer, 9 – autotransformator, 10 – urządzenie ssące, 11 – rurociąg powietrza, 12 – zbiornik materiału, 13 – rotametry powietrza

poderwania się pojedynczych ziaren materiału do momentu opróżnienia zbiornika. Zarówno na powierzchni dyszy jak i na rurociągach pionowych i poziomych zostały umieszczone króćce do pomiaru ciśnienia statycznego. Pomiarzy wykonano z wykorzystaniem elektronicznych przetworników ciśnienia statycznego współpracujących poprzez kartę pomiarową z komputerem klasy PC. Dzięki temu możliwa była rejestracja charakteru i przebiegu zmian ciśnienia w dyszy i rurociągu. Strumień powietrza mierzony był na wylocie powietrza czystego przy pomocy dwóch rotametrów.

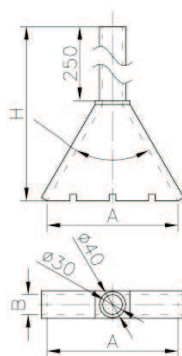
Parametry takie jak: strumień masowy materiału, spadki ciśnienia na dyszy i rurociągu, strumień powietrza oraz kształt dyszy ssącej decydują o strukturze strugi materiału sypkiego wewnątrz dyszy, co z kolei wpływa na zapotrzebowanie na energię do procesu transportu. W celu obserwacji i rejestracji zmian struktury strugi materiału sypkiego wewnątrz dyszy ssącej stanowisko badawcze wyposażono w kamerę szybkoklatkową (rys. 4). Kamera umożliwiała to obserwowanie charakterystycznego ruchu ziaren materiału sypkiego, które są niedostrzegane dla gołego oka. Do badań wykorzystano modelowy materiał sypki, którym był mak niebieski o gęstości właściwej  $960 \text{ kg/m}^3$  i wielkości ziaren  $0,8\text{--}1,1 \text{ mm}$ .

Dysze ssące użyte podczas badań charakteryzowały się kształtem ostrosłupa o podstawie prostokątnej i zostały wykonane z przezroczystego polimetakrylanu



Rysunek 4. Lokalizacja szybkoeklatkowej kamery: 1 – kamera Genie HM1024 (110 klatek/s, rozdzielczość 1024×768 pikseli), 2 – zbiornik z materiałem sypkim, 3 – dysza ssąca

metylu PMMA. Stosunek pola przekroju wlotowego dysz do pola przekroju rurociągu był stały i wynosił 8,5. Na dolnej krawędzi dysz wykonano dodatkowe otwory, przez które pobierano powietrze do transportu materiału. W każdej dyszy liczba i rozmieszczenie otworów było jednakowe. Do analizy struktury strugi materiału sypkiego wewnątrz dyszy wykorzystano 5 dysz o kącie rozwarcia  $\alpha = 25\text{--}120^\circ$ . Wymiary poszczególnych dysz przedstawiono na rys. 5.



Dysza	25°	40°	60°	90°	120°
A	200	200	200	200	200
B	30	30	30	30	30
H	640	490	400	345	310

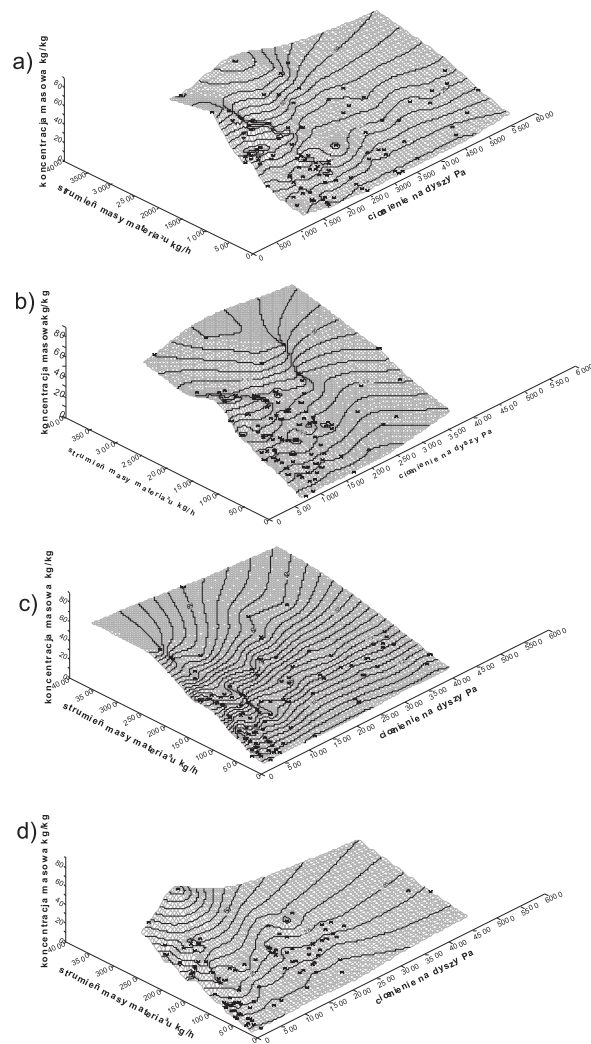
Rysunek 5. Wymiary dysz ssących

### 3 Wyniki badań i ich analiza

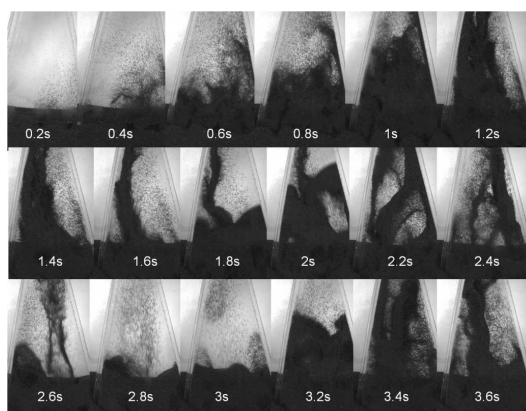
Na rys. 6 przedstawiono przykładowe wyniki badań wypływu kąta rozwarcia dyszy na warunki transportu pneumatycznego, tj. na strumień masy materiału, ciśnienie statyczne na dyszy oraz koncentrację masową. Pomiary wykonano dla czterech dysz stożkowych o kątach rozwarcia  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  oraz  $120^\circ$ . Dysze badano przy jednakowych ustawieniach stanowiska pomiarowego, a jedyną wielkością zmienną był kształt dyszy ssącej. Dla każdej dyszy wykonano serię 10 pomiarów, w celu uzyskania powtarzalnego i charakterystycznego dla niej obszaru pracy. Na przedstawionych rys. 6 widać wyraźnie, że każda z dysz ssących charakteryzuje się własnym obszarem pracy zarówno w zakresie ciśnienia na dyszy jak i koncentracji, która łączy dwa kluczowe parametry takie jak strumień masy materiału sypkiego oraz strumień masy powietrza. W celu lepszego zobrazowania charakterystycznych obszarów pracy dysz ssących, prezentowane zależności mają takie same wartości na wszystkich osiach, dzięki czemu wyraźnie widać zmiany położenia obszarów oraz ich nachylenie.

W kolejnym etapie prac wykonano, przy użyciu szybkoklatkowej kamery, serię zdjęć obrazujących charakter strugi materiału wewnątrz dyszy. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 7 dla dyszy o kącie rozwarcia  $25^\circ$ . W ciągu kilkusekundowej pracy dyszy można zauważyć kilka powtarzających się cykli zmian struktury układu gaz-ciało stałe. Przebieg cyklu jest następujący: po zetknięciu dyszy ssącej z powierzchnią materiału sypkiego w całym przekroju dyszy pojedyncze ziarna materiału zostają poderwane (0,6–0,8 s), następnie wraz z upływem czasu cząstki materiału sypkiego wypełniają całkowicie wnętrze dyszy (1–1,2 s), po czym następują zawirowania materiału spowodowane turbulencją gazu i tworzy się jedna wąska struga ciała stałego (1,4–1,6 s), która również ulega zawirowaniom aż do momentu jej całkowitego zerwania (1,8–2,6 s). W momencie zerwania strugi następuje zakończenie jednego cyklu i rozpoczęcie kolejnego od poderwania pojedynczych ziaren materiału (3 s). Taki cykl obserwowany był we wszystkich badanych dyszach, jednak stopień intensywności zmian w strukturze gaz-ciało stałe zależał od ich kształtu. Zaobserwowano, że dla dyszy o kącie  $25^\circ$  intensywność turbulencji gazu i zawirowań strugi materiału sypkiego jest dużo większa niż dla dyszy o większym kącie rozwarcia. Spowodowane jest to odległością, jaką materiał musi pokonać od wlotu dyszy do rurociągu transportowego.

Przykładowe przebiegi strat ciśnienia dla dysz stożkowych płaskich o kącie rozwarcia stożka  $\alpha = 40^\circ$  oraz  $60^\circ$  zilustrowano na rys. 8 i 9. Badania wykonano dla stałej wartości strumienia objętości powietrza równej  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ . W zależności od zastosowanej dyszy otrzymano różne wartości wydajności masowej transportu pneumatycznego. W przypadku dyszy stożkowej płaskiej o kącie rozwarcia



Rysunek 6. Zależność pomiędzy strumieniem masy materiału, ciśnieniem na dyszy oraz koncentracją masową dla różnego kąta rozwarcia dyszy: a)  $\alpha = 40^\circ$ , b)  $\alpha = 60^\circ$ , c)  $\alpha = 90^\circ$ , d)  $\alpha = 120^\circ$



Rysunek 7. Zmiany struktury układu gaz – ciało stałe w dyszy o kącie rozwarcia  $\alpha = 25^\circ$

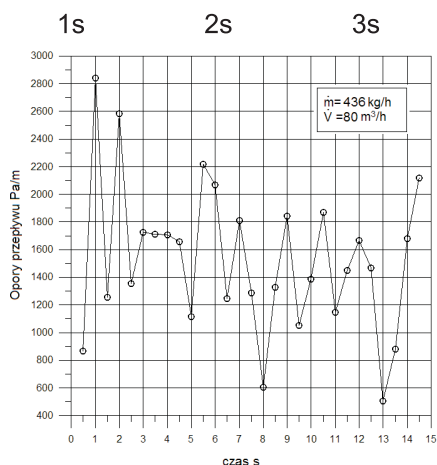
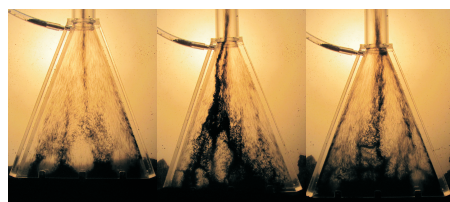
$\alpha = 60^\circ$  uzyskano większą wydajność transportu pneumatycznego niż w przypadku dyszy o mniejszym kącie rozwarcia. Spowodowane jest to mniejszymi zaburzeniami strugi materiału w dyszy w porównaniu z dyszą  $\alpha = 40^\circ$ , w wyniku czego wzrasta koncentracja materiału sypkiego, a tym samym wydajność. W dyszy o kącie  $\alpha = 40^\circ$  część podniesionego materiału nie osiąga wysokości wlotu do rurociągu, przez co opada tworząc cyrkulacyjne zaburzenia.

Na podstawie pomiarów spadku ciśnienia na dyszy ssącej oraz obserwacji zmian strugi materiału sypkiego wewnątrz dyszy można stwierdzić, że największy stopień zaburzenia strugi i największe straty ciśnienia na dyszy występują dla dysz o małych kątach rozwarcia  $25^\circ$  i  $40^\circ$ . Przekłada się to tym samym na największe zapotrzebowanie energii w porównaniu z innymi badanymi dyszami. Aspekt energetyczny jest niezwykle istotny przy doborze odpowiedniej dyszy ssącej do podciśnieniowego transportu pneumatycznego. Wynika to z faktu, że podciśnienie, jakie osiągają współczesne urządzenia zasilające wynosi maksymalnie 50 kPa. Z tego też powodu należy szukać odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych dysz ssących, aby straty energii przy transporcie były jak najmniejsze.

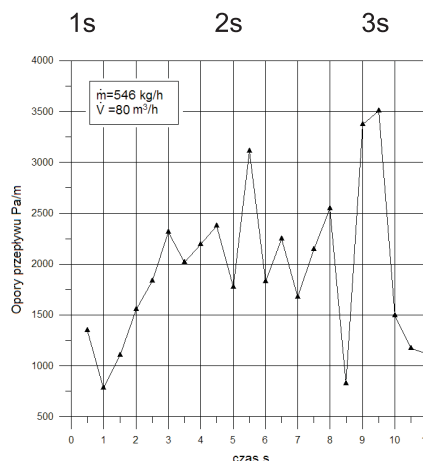
## 4 Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań nad wpływem kształtu dyszy ssącej na warunki podciśnieniowego transportu pneumatycznego. Ponieważ aspekt energetyczny jest jednym z kilku kryteriów oceny przydatności dyszy ssącej dla danego materiału sypkiego. Stąd w podsumowaniu można stwierdzić, że:





Rysunek 8. Formowanie struktury przepływu oraz przebieg spadków ciśnienia dla dyszy stożkowej płaskiej  $\alpha = 40^\circ$



Rysunek 9. Formowanie struktury przepływu oraz przebieg spadków ciśnienia dla dyszy stożkowej płaskiej  $\alpha = 60^\circ$

- Kształt dyszy ssącej istotnie wpływa na warunki transportu pneumatycznego takie jak strumień masy materiału sypkiego, ciśnienie statyczne na dyszy, oraz koncentrację masową łączącą strumień masy materiału sypkiego oraz strumień masy powietrza. Dzięki temu można wyróżnić charakterystyczne obszary pracy dla każdej z dysz.
- Intensywne zmiany charakteru strugi wewnątrz dyszy ssącej istotnie wpływają na stopień energochłonności całej linii podciśnieniowego transportu pneumatycznego. Szczególnie wyraźnie jest to obserwowane dla dysz o małym kącie rozwarcia stożka ( $25^\circ$ ,  $40^\circ$ ).
- Płaskie stożkowe dysze ssące o rozwiniętej powierzchni kontaktu z materiałem stałym charakteryzują się cyklicznymi zmianami struktury gaz-ciało stałe wewnątrz dyszy. Zjawisko to, jak do tej pory, nie było obserwowane.

ne w przypadku typowych i często wykorzystywanych w przemyśle dysz rurowych.

Ze względu na dotychczasowy brak szerszego zainteresowania badaczy płaskimi dyszami stożkowymi poznanie mechanizmów zmian struktury przepływu materiału w dyszy i jego wpływu na warunki transportu pneumatycznego wymaga prowadzenia dalszych prac eksperymentalnych z wykorzystaniem innych kształtów dysz ssących i różnych materiałów sypkich.

*Praca wpłynęła do redakcji 1 sierpnia 2012 r.*

## Literatura

- [1] Mils D.: *Pneumatic Conveying Design Guide*, 2nd edn. Elsevier, 2004.
- [2] Skotnicka E.: *Analiza wpływu kształtu dyszy ssącej na transport pneumatyczny. Młodzi naukowcy dla polskiej nauki cz. 1 — Nauki inżynierskie*. Creativetime, Kraków 2011.
- [3] Skotnicka E.: *Struktura układu gaz-ciało stałe dla różnych geometrii dysz ssących*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, ser. Mechanika **100**, 345/2012.
- [4] Jósko E., Skotnicki P.: *Ocena wpływu kształtu dyszy ssącej na wydajność i opory przepływu w podciśnieniowym transporcie pneumatycznym*. Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych **7**, Warszawa-Opole 2011.

### **Assessment of the impact of the suction nozzle shape on the energy consumption of the pneumatic vacuum conveying**

#### S u m m a r y

This article presents the study of the impact of the shape of the suction nozzle on the pneumatic transport conditions such as mass flow of bulk material, the air mass flow, pressure on the suction nozzle. Studies have been conducted as an attempt to assess the impact of disturbances the stream of bulk material on the energy consumption of the suction nozzle vacuum pneumatic conveying. Description of mechanism of the disturbances formation in the suction nozzle and its influence on transport conditions could help to develop the criteria for the selection of suction nozzles, depending on the transported bulk material.