

SYSTEMY SSĄCE TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO

H. SZLUMCZYK¹

Zakład Odlewnictwa, Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice POLAND

STRESZCZENIE

Wykorzystanie ssącego działania strumienia w układach transportu pneumatycznego materiałów sypkich stwarza możliwości zastosowania prostych rozwiązań urządzeń oraz realizacji procesu w warunkach otwartych zbiorników. Analiza zjawisk decydujących o skuteczności przemieszczania prowadzona jest w oparciu o ruch fazy stałej w przewodzie transportowym. Jednakże bardzo istotnym problemem pozostaje sposób wprowadzenia materiału sypkiego do rurociągu transportowego. Wykorzystując ssące działanie strumienia (strumienicą lub ssawą) można wprowadzić materiał sypki do rurociągu bez potrzeby stosowania skomplikowanych urządzeń ładowniczych. Sposób taki jest efektywny w warunkach przemieszczania materiału na niewielkie odległości (rzędu kilkudziesięciu metrów). Rozwiązuje on częściowo problem załadunku materiału sypkiego z otwartych zbiorników do układów wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego. W tym celu stosowane są eżekcyjne rozwiązania strumienic lub ssawy, w których wykorzystywane jest podciśnienie wytwarzane pompą bądź wentylatorem.

1. WPROWADZENIE

Przyjęcie koncepcji wykorzystania ssącego działania strumienia do wprowadzenia materiału sypkiego z zbiorników otwartych do urządzeń wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego uwzględnia możliwość zastosowania strumienicy bądź ssawy wentylatorowej. Wybór uzależniony jest od dysponowanego źródła energii (sprężone powietrze, energia elektryczna do zasilania wentylatora). W układach pneumatycznych o możliwości przemieszczania cząstek materiałów sypkich

¹ dr inż. sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl

decyduje wielkość różnicy ciśnień powietrza między początkiem i końcem rurociągu transportowego, niezależnie od sposobu jej uzyskania (układy ssące bądź tłoczące).

Wykorzystanie energii przepływającego płynu (powietrza) jako czynnika unoszącego materiał sypki w transporcie pneumatycznym ma miejsce również w strumienicach, gdzie w wyniku występowania zjawiska Venturiego następuje mieszanie dwu strumieni.

Analizując przepływ płynu (powietrza) przez zwężkę Venturiego w miejscu zwężania się przekroju można stwierdzić, iż występuje obniżenie ciśnienia statycznego, którego wartość minimalna osiągnięta jest w najwęższym przekroju (gardzieli). Dobierając odpowiednie wartości prędkości przepływu powietrza przy założonym przewężeniu (stosunek przekrojów $F_0/F=m$) można wytworzyć w gardzieli ciśnienie niższe od atmosferycznego. Jednakże istnieje ograniczona możliwość uzyskiwania dowolnie niskich ciśnień w obszarze zwężki, wynikająca z parametrów fizyko-chemicznych płynu.

Ssące działanie strugi znalazło szerokie zastosowanie w urządzeniach zwanych strumienicami, w których czynnik zasysany wpływa do komory mieszania pierścieniowym strumieniem poprzez komorę zasysania. W komorze mieszania następuje dokładne wymieszanie strumieni czynników (zasilającego i zasysanego). Do dyfuzora wprowadzona jest jednorodna mieszanina. Przemiana energii kinetycznej strugi zasysającej w energię ciśnienia zachodzi w dyfuzorze o konstrukcji gwarantującej prawidłowy przepływ strumienia dwufazowego. Gwarancją prawidłowego przepływu jest konstrukcja dyfuzora, która uwzględnia odpowiedni kąt rozwarcia zapewniający przyleganie strugi do ścian dyfuzora w zakresie roboczych natężeń przepływu.

2. DOBÓR PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH STRUMIENICY

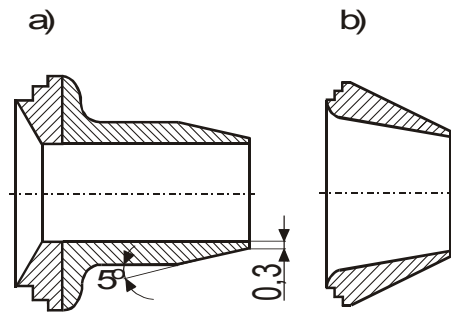
Praca urządzenia ssącego (strumienicy) zależy głównie od prawidłowych parametrów konstrukcyjnych jego podstawowych elementów (dyszy zasilającej, dyszy chwytającej, komory mieszania i dyfuzora).

Dysza zasilająca – ma za zadanie wprowadzenie czynnika zasilającego (powietrza) w obszar komory mieszania. Kształt dyszy zasilającej i jej umiejscowienie w dyszy chwytającej powinny zapewnić wymieszanie składników w taki sposób, aby w przekroju wylotowym komory mieszania – mieszanina dwufazowa posiadała charakter jednorodny. Strumień zasilający może być doprowadzony dyszą środkową lub obwodową. Dysze zasilające środkowe mogą być pojedyncze i wielokrotne, o kształcie cylindrycznym i stożkowym.

Dysze zasilające cylindryczne (rys.1-a) charakteryzują się dużą wartością stosunku długości do średnicy. Dzięki głębokiemu zanurzeniu wylotu dyszy w komorze mieszania uzyskuje się równoległe prowadzenie strumienia zasilającego i zasysanego. Wylot dyszy jest zbieżny na zewnątrz pod kątem 5° , przy szerokości obrzeża wylotowego ok. 0,5 mm. Zapewnia to współosiowe doprowadzenie obu strumieni.

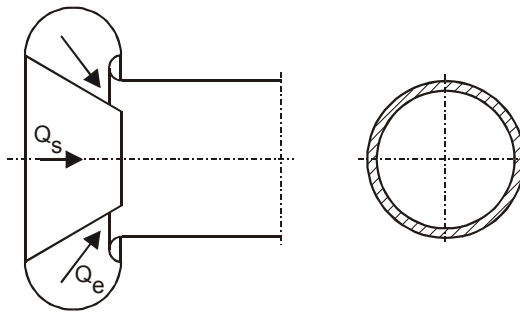
Dysze zasilające stożkowe (rys.1-b) posiadają wewnętrzną część zbieżną. Wartość kąta zbieżności zawiera się w granicach 2 do 40° . Powierzchnia stożkowa u wylotu dyszy

przechodzi łagodnie w obrzeże cylindryczne, zapewniając wpływ strumienia bez zwężenia.



Rys. 1. Dysze zasilające środkowe – cylindryczna i stożkowa
Fig. 1. Central supplying nozzles – cylindrical and conical

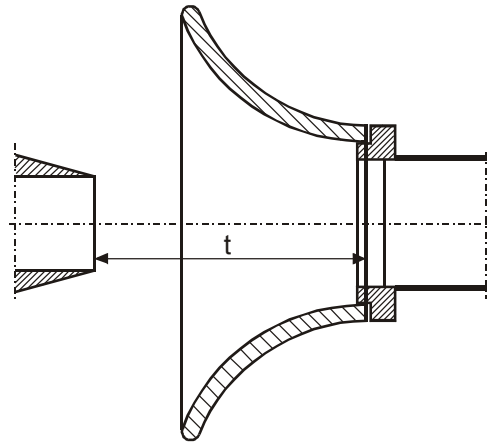
Dyszę zasilającą obwodową przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Obwodowa dysza zasilająca – jednostronna.
Fig. 2. Circumferential supplying nozzle – one-sided

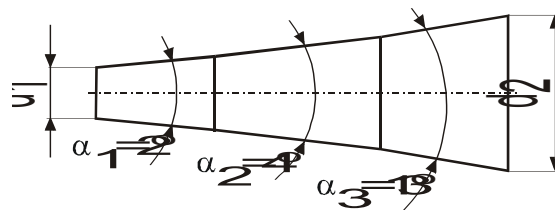
Obwodowe dysze zasilające mogą być jedno- lub dwustronne. Przy dyszach jednostronnych mieszanie strumieni zachodzi tylko na wewnętrznej powierzchni strumienia zasilającego. O skuteczności zasysania w znacznej mierze decyduje głębokość wprowadzenia dyszy zasilającej do dyszy chwytającej (lub do komory mieszania). Przykład rozwiązania **dyszy chwytającej** przedstawiono na rys.3.

Przedstawiona na rys.3 dysza chwytająca o łagodnym wejściu strumienia do komory mieszania jest stosowana przy pojedynczych dyszach zasilających środkowych oraz dyszach obwodowych.



Rys. 3. Dysza chwytająca strumienicy.
Fig. 3. Intake nozzle of the jet pump

Dyfuzor stanowi element strumienicy, w którym następuje przemiana energii. Stosowane są dyfuzory stożkowe, dyfuzory o tworzących krzywoliniowych, których krzywizna jest określona zależnościami $dp/dl = \text{const}$ i $dw/dl = \text{const}$ oraz dyfuzory segmentowe. Najczęściej stosowanymi są dyfuzory stożkowe, przy czym kąt rozwarcia zawiera się w granicach 6 do 10^0 . Przy większych kątach rozwarcia istnieje niebezpieczeństwo oderwania się strumienia od ścianki, co zwiększa straty hydrauliczne i zmniejsza sprawność strumienicy. Niebezpieczeństwo oderwania się strumienia jest tym mniejsze im mniejszy jest spadek prędkości i wzrost ciśnienia w komorze dyfuzora. W przypadku, gdy występują spadki gradientu prędkości i duży wzrost gradientu ciśnienia na całej długości części rozbieżnej korzystniejszy okazał się taki dobór kształtu dyfuzora, aby warunki przylegania strumienia do ścianek ($dp/dl = \text{const}$ oraz $dw/dl = \text{const}$) spełnione zostały na całej jego długości. W tym celu stosuje się dyfuzory segmentowe.



Rys. 4. Dyfuzor segmentowy.
Fig. 4. Segment diffuser

Dyfuzory takie zestawia się z trzech części. Kąt rozwarcia pierwszej części wynosi $\alpha_1=2^\circ$, której długość powinna być tak dobrana, aby spadek prędkości wynosił 1/3 spadku prędkości w całym dyfuzorze. W części środkowej o kącie rozwarcia $\alpha_2=4^\circ$ zakłada się również spadek prędkości o 1/3 spadku całkowitego. Część wylotowa dyfuzora segmentowego o kącie rozwarcia $\alpha_3=13^\circ$, jak i pozostałe elementy powinny być wykonane dokładnie o dobrej jakości powierzchni wewnętrznej.

Zgodnie z przedstawionymi rozważaniami sposób wykorzystania ssącego układu transportowego dla potrzeb pneumatycznego przemieszczania materiałów sypkich na krótkie odległości stanowi jedno z korzystniejszych technicznie rozwiązań tego problemu.

3. OPRACOWANIE KONSTRUKCJI STRUMIENICY I SSAWY WENTYLATOROWEJ

Na podstawie analiz literaturowych i badań rozpoznawczych opracowano algorytm doboru cech geometrycznych elementów urządzeń oraz opracowano konstrukcyjnie i wykonano strumienicę i ssawę wentylatorową.

Opracowany algorytm obliczeń podstawowych cech geometrycznych strumienicy wymaga podania następujących danych:

- średnica wewnętrzna rurociągu transportowego, zgodna z średnicą wylotu dyfuzora D_r ,
- objętościowe natężenie przepływu czynnika transportującego (powietrza) zasilającego strumienicę V_N ,
- nadciśnienie czynnika zasilającego strumienicę (ciśnienie robocze) p_r ,
- nadciśnienie w zasypie materiału zasysanego p_z ,
- wydajność założona instalacji (masowe natężenie przepływu strumienia materiału transportowanego) Q ,
- wymagane nadciśnienie w wylocie z ejektora p_s ,

oraz założenia następujących parametrów:

- stosunek eżekcji gazu,
- stosunek prędkości w dyszy roboczej,
- stosunek prędkości w komorze mieszania,
- stosunek prędkości w dyfuzorze,
- stosunek prędkości w części wlotowej komory mieszania,

przy znanych warunkach stanu fizycznego otoczenia:

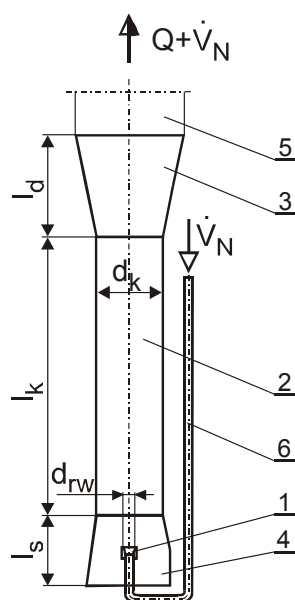
- ciśnienie otoczenia b_0 ,
- temperatura otoczenia T_0 ,
- wykładnik politropy gazu zasilającego strumienicę n

Parametrami elementów konstrukcyjnych decydującymi o skuteczności działania strumienicy są:

- dobór optymalnej dla danego rodzaju materiału sypkiego średnicy i kształtu dyszy zasilającej (roboczej),
- kształt dyszy chwytającej (wlotowej),

- długość i średnica komory mieszania,
- parametry geometryczne dyfuzora,
- głębokość wprowadzenia dyszy zasilającej (roboczej) do dyszy chwytającej.

Przeprowadzona analiza zalecanych kształtów dysz zasilających i chwytających umożliwia określenie najkorzystniejszych pod względem przepływów profili, którymi są profile Witoszyńskiego. Jednakże zaburzenia wywołane wprowadzoną fazą stałą (transportowane materiały sypkie) niwelują przewagę profilu Witoszyńskiego nad kształtem stożkowym. Ze względu na uproszczenia wykonawcze zdecydowano przyjąć stożkowy kształt dyszy chwytającej oraz cylindryczny kształt dyszy zasilającej. Schemat strumienicy ręcznej zamieszczono na rys.5.



Rys. 5. Schemat strumienicy ręcznej.
Fig. 5. Scheme of a manual jet pump

Zgodnie z opracowanym algorytmem doboru cech geometrycznych określone zostały one dla założonych warunków:

- czynnikiem transportującym jest powietrze sprężone o nadciśnieniu $p_r = 0,4$ MPa przy temperaturze otoczenia $T_o = 293$ K i ciśnieniu barometrycznym $b_0 = 1013$ hPa,
- wydajność układu $Q = 0,22$ kg/s pyłu dymnicowego,
- wymagane nadciśnienie w króćcu wylotowym ejektora $p_s = 17,5$ kPa,
- dysponowane natężenie przepływu powietrza $V_N = 0,06$ m³/s,

- średnica wewnętrzna rurociągu transportowego (średnica wylotu dyfuzora) $D_f = 50$ mm.

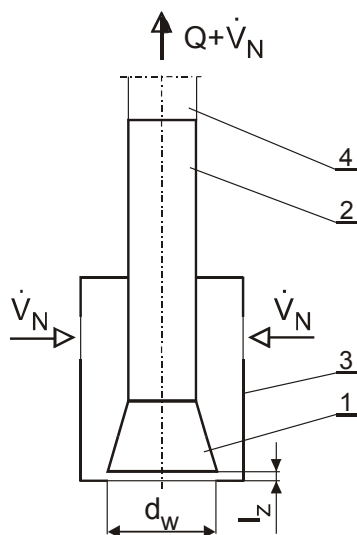
Wynikiem wykonanych obliczeń są następujące parametry strumienicy:

- minimalna średnica dyszy roboczej $d_{rm} = 8,85$ mm,
- średnica wylotowa dyszy roboczej $d_{rw} = 10,2$ mm,
- średnica komory mieszania $d_k = 31,6$ mm,
- długość komory mieszania $l_k = 221,2$ mm,
- odległość wylotu dyszy roboczej od wlotu do komory mieszania $l_s = 77,5$ mm,
- długość dyfuzora wylotowego $l_d = 128,8$ mm.

Celem prawidłowej eksploatacji strumienicy w założonych warunkach badań wykonano wymienne dysze robocze oraz przygotowano rozwiązanie konstrukcyjne umożliwiające prowadzenie prób przy zmianie odległości wylotu dyszy roboczej od wlotu do komory mieszania w zakresie $l_s = 0 - 80$ mm. Parametry komory mieszania i stożkowego dyfuzora dostosowano do wymogów strumienicy współpracującej z rurociągiem transportowym o średnicy wewnętrznej $D_f = 50$ mm.

Konstrukcję ssawy wentylatorowej analizowano ze względu na jej możliwości regulacyjne dla potrzeb przemieszczania materiałów sypkich o zróżnicowanych własnościach.

O skuteczności działania ssawy decyduje uzyskiwana prędkość przepływu powietrza zasysającego materiał sypki do dyszy (stożka) chwytającej. Wartość prędkości strumienia zasysającego wynika z możliwości uzyskiwanej wartości podciśnienia, co jest związane z parametrami pracy wentylatora lub pompy.

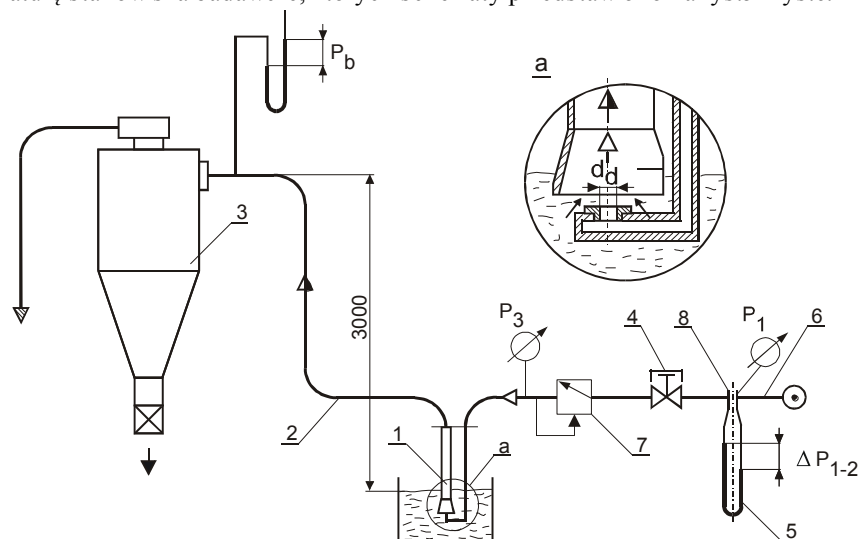


Rys. 6. Schemat ssawy wentylatorowej
Fig. 6. Scheme of an exhaust fan

Przepływ powietrza zasysającego realizowany jest przez otwory wykonane w przesuwnej tulei oraz przez szczelinę o regulowanej szerokości L_z wykonaną w dyszy chwytającej. Schemat ssawy wentylatorowej przedstawiono na rys.6.

4. OCENA PRZYDATNOŚCI WYKONANYCH URZĄDZEŃ W WARUNKACH BADAWCZYCH PNEUMATYCZNEGO PRZEMIESZCZANIA MATERIAŁÓW SYPKICH

Proces pneumatycznego przemieszczania materiałów sypkich z zastosowaniem strumienicy i ssawy wentylatorowej sprawdzono w warunkach badawczych dla piasku kwarcowego i pyłu dymnicowego. W tym celu wykonano i wyposażono w niezbędną aparaturę stanowiska badawcze, których schematy przedstawiono na rys.5 i rys.6.



Rys. 7. Układ badawczy ssącego transportu z zastosowaniem strumienicy.

Fig. 7. Test bed of suction transport with application of a jet pump

Celem prowadzonych prób było określenie wskaźników eksploatacyjnych pneumatycznego przemieszczania materiałów sypkich w ssącym układzie urządzeń.

Materiał sypki (piasek kwarcowy i pył dymnicowy) przemieszczano z otwartego zbiornika elastycznym przewodem transportowym 2 do cyklonu rozładowego 3 z wykorzystaniem strumienicy ręcznej 1. Strumienicę 1 przystosowano do zasilania materiałem sypkim przewodu 2 o średnicy wewnętrznej $D_r = 50$ mm i długości $L = 6$ m. Strumienicę zasilano sprężonym powietrzem doprowadzanym przewodem 6. Dla realizacji założonego celu układ badawczy wyposażono w aparaturę pomiarową umożliwiającą określenie natężenia przepływu powietrza (strumienia) zasilającego strumienicę, której podstawowym elementem jest zwężka pomiarowa (kryza ISA z

pomiarem przytarczowym 8) połączona z miernikiem przepływu PSW-4 rejestrującym mierniczy spadek ciśnienia Δp_{1-2} .

Uruchamianie układu dokonywano otwarciem zaworu sterowanego pneumatycznie 4 . Wartość ciśnienia powietrza sprężonego p_3 zasilającego strumienicę ustalano nastawą reduktora 7. Podczas prób określano masę przetransportowanego materiału sypkiego m_c oraz czas transportu tej ilości t_t . Obliczone parametry techniczno – eksploatacyjne zamieszczono w tab.1.

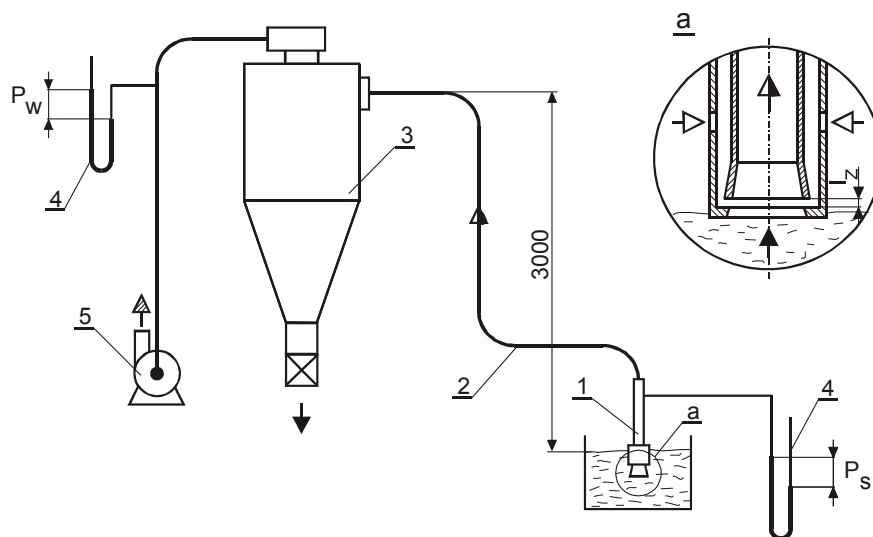
Tabela 1. Wyniki obliczeń wskaźników techniczno – eksploatacyjnych procesu przemieszczania badanych materiałów z zastosowaniem strumienicy ręcznej (S-50)

Table 1. The results of calculations of technical and operating indicators of the transportation process for tested materials with application of the manual jet pump (S-50)

Piasek kwarcowy							
L.p.	\dot{m}_g	\dot{V}_N	Q		μ	d_{rw}	Uwagi
-	kg/s	m ³ /s	kg/s	Mg/h	kg/kg	mm	-
1.	0,0841	0,0658	0,2566	0,9240	3,051	8	$\rho_n=1492 \text{ kg/m}^3$ $l_s=25 \text{ mm}$
2.	0,0884	0,0692	0,3300	1,1880	3,733	10	
3.	0,0935	0,0732	0,4466	1,6080	4,776	12	
Pył dymnicowy							
L.p.	\dot{m}_g	\dot{V}_N	Q		μ	d_{rw}	Uwagi
-	kg/s	m ³ /s	kg/s	Mg/h	kg/kg	mm	-
1.	0,0826	0,0646	0,2700	0,9720	3,269	8	$\rho_n=704 \text{ kg/m}^3$ $l_s=25 \text{ mm}$
2.	0,0910	0,0712	0,3066	1,1040	3,369	10	
3.	0,0967	0,0787	0,3600	1,3960	3,723	12	

W podobny sposób prowadzono próby procesu przemieszczania pneumatycznego tych materiałów w układzie ssącym z zastosowaniem ssawy wentylatorowej. Układ badawczy wykorzystywany do prób schematycznie przedstawiono na rys.8.

Źródłem podciśnienia powietrza zasilającego układ wyposażony w ssawę wentylatorową jest wentylator 5. Pomiaru natężenia przepływu powietrza (strumienia) dokonywano wykorzystując klasyczną zwężkę Venturiego, zabudowaną między cyklonem rozładowniczym 3 i wentylatorem 5. Podczas prób materiał sypki zasysany był ssawą 1 i przewodem transportowym 2 przemieszczany do cyklonu rozładowniczego 3. Wyniki obliczeń wskaźników charakteryzujących proces przemieszczania badanych materiałów zamieszczono w tab.2..



Rys.8. Układ badawczy ssącego transportu z zastosowaniem ssawy wentylatorowej
 Fig. 8. Test bed of suction transport with application of an exhaust fan

Tabela 2. Wyniki obliczeń wskaźników techniczno eksploatacyjnych procesu przemieszczania piasku kwarcowego i pyłu dymnicowego z zastosowaniem ssawy wentylatorowej.
 Table 2. The results of calculations of technical and operating indicators for the silica sand and smoke-box dusts transportation process with application of the exhaust fan

Piasek kwarcowy							
L.p.	\dot{m}_g	\dot{V}_N	Q		μ	l_z	Uwagi
-	kg/s	m ³ /s	kg/s	Mg/h	kg/kg	mm	-
1.	0,0729	0,0571	0,1367	0,4921	1,875	0	$\rho_n=1,492 \text{ kg/m}^3$
2.	0,1632	0,1279	0,4583	1,6499	2,808	5	
3.	0,0936	0,0734	0,1888	0,6767	2,017	10	
Pył dymnicowy							
L.p.	\dot{m}_g	\dot{V}_N	Q		μ	l_z	Uwagi
-	kg/s	m ³ /s	kg/s	Mg/h	kg/kg	mm	-
1.	0,1423	0,1115	0,2733	0,9839	1,921	0	$\rho_n=704 \text{ kg/m}^3$
2.	0,2088	0,1637	0,4467	1,6081	2,139	5	
3.	0,2811	0,2203	0,6800	2,4480	2,419	10	

Zamieszczone w tab.1 i tab.2 parametry posiadają następujące znaczenie:

- m_g - masowe natężenie przepływu gazu (powietrza),
- V_N - objętościowe natężenie przepływu gazu w warunkach normalnych,
- Q - masowe natężenie przepływu materiału (wydajność),
- μ - masowe stężenie mieszaniny materiału i gazu (koncentracja mieszaniny).

5. PODSUMOWANIE

Zakres publikacji obejmuje analizę układów ssących stosowanych do pneumatycznego przemieszczania materiałów sypkich. Doboru cech konstrukcyjnych podzespołów układu transportowego dokonać można wykorzystując podstawowe zależności charakteryzujące proces eżekcyjnego zasysania materiałów sypkich w warunkach przepływu strumienia powietrza.

W zależności od dysponowanego źródła wymuszającego ruch strumienia powietrza transportującego (sprężarka, pompa, wentylator), zastosować można odpowiednie rozwiązanie podzespołów układu.

Ssący system rozładunku materiałów sypkich z otwartych pojemników (np. big-bagi) cechuje się eliminacją pylenia oraz z uwagi na hermetyczność układu nie powoduje strat tych materiałów. Znalazł on zastosowanie w branży spożywczej i farmaceutycznej w zakresie małych wydajności (do 3 Mg/h) oraz przy rozładunku i załadunku materiałów sypkich (pyły, zboże, piasek i tp.) np. do ładowni statków, gdzie osiągnęte są wydajności dochodzące do 600 Mg/h. Sposób ten umożliwia realizację procesu przemieszczania materiałów sypkich na odległości nawet do 2000 m, przy zastosowaniu urządzeń wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego po stronie nadawczej.

LITERATURA

- [1] Goliński J.A., Troskoleński A.T.: Strumienice, WNT Warszawa, 1979.
- [2] Koch R., Noworyta A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT Warszawa, 1992.
- [3] Korzeń Z., Zajac P.: Problemy badań procesowych w rozwoju nowych technologii pneumatycznego transportu i przeładunku materiałów ziarnistych, Transport Przemysłowy, Nr 3/2001.
- [4] Piątkiewicz Z.: Transport pneumatyczny, Monografia nr 13, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice, 1999.
- [5] Szluczyk H., Homa D.: Analiza transportu pneumatycznego w aspekcie zastosowań technologicznych, Transport Przemysłowy, Nr 1/2000.
- [6] Szluczyk H., Homa D., Niedźwiedz M., Kudliński J.: Transport pneumatyczny systemu POLKO eksploatowany w warunkach ZPW TRZUSKAWICA S.A., Transport Przemysłowy, Nr 3/2001.
- [7] Piątkiewicz Z., Szluczyk H., Kowalski E.: Doświadczalny dobór cech konstrukcyjnych pneumatycznego układu załadowczo-nadawczego, Praca nie publikowana, Instytut Odlewnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice.

SUCTION SYSTEMS OF PNEUMATIC CONVEYING**SUMMARY**

Utilization of suction action of stream in pneumatic conveying of loose materials makes it possible to apply simple appliances as well as realize the process on open tanks. Analysis of phenomena decisive for efficiency of transportation is made based on a solid phase movement in transportation ducts. However, the method of loose material introduction into the transportation pipeline still remains the very important issue. Utilizing the suction action of stream (jet pump or exhaust fan) one can introduce loose material into the pipeline without necessity of applying complex loading equipment. Such a method is effective when materials are conveyed to a short distances (approximately several tents of meters).

It partially solves the problem of loading loose material from open tanks to the high-pressure pneumatic conveying system. To this end one can apply ejector-based solutions of jet pumps or exhaust fans, in which negative pressure produced by a pump or a fan is employed.

Recenzował Prof. Józef Gawroński