

**Zbigniew PIĄTKIEWICZ, Eugeniusz KOWALSKI,
Henryk SZLUMCZYK**

**Politechnika Śląska
Instytut Odlewnictwa**

**WYNIKI BADAŃ TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO
WYSOKOCIŚNIENIOWEGO MATERIAŁÓW SYPKICH**

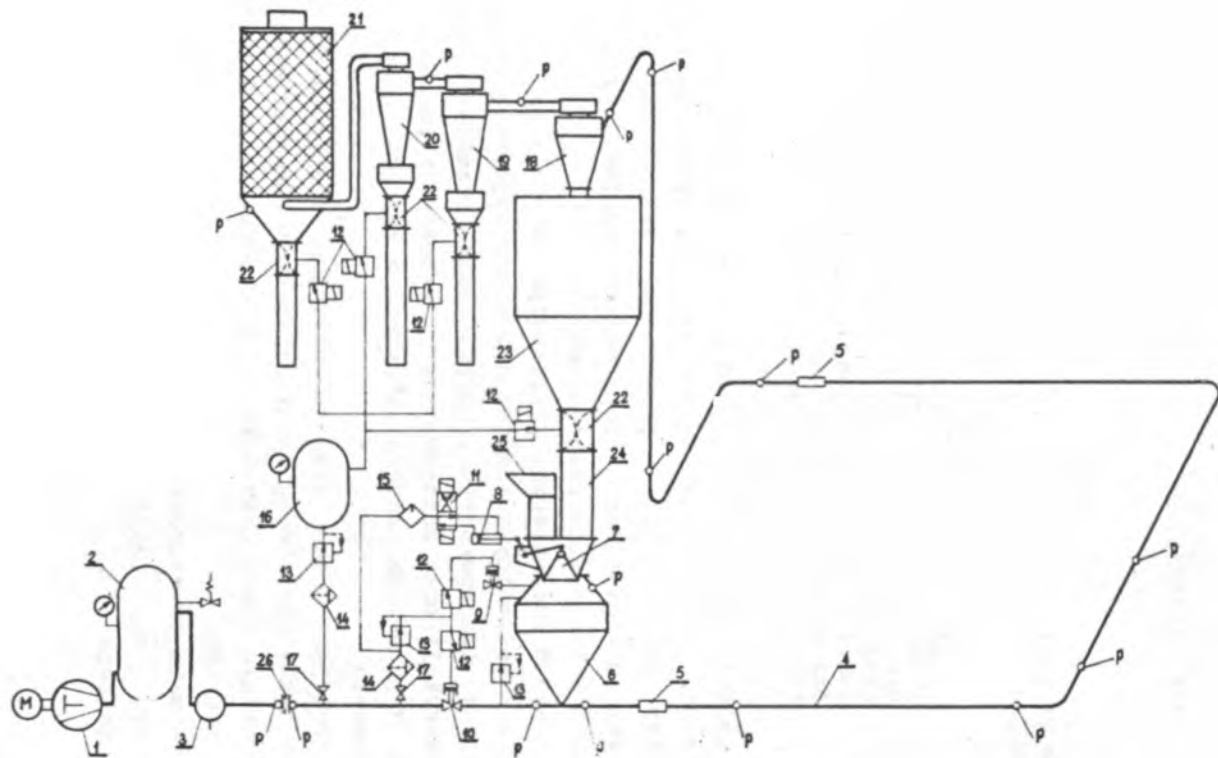
Streszczenie. W pracy przedstawiono problematykę badań transportu pneumatycznego, prowadzonych w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej. Omówiono budowę instalacji badawczo-pomiarowej i metodykę wykonywania obliczeń parametrów jej pracy. Przedstawiono wyniki badań parametrów transportu wysokociśnieniowego 52 materiałów.

Badania transportu pneumatycznego, prowadzone w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej, mają charakter teoretyczny i praktyczny. Prace teoretyczne zmierzają w kierunku rozwiązania zagadnień dotyczących obliczeń instalacji transportowych.

Prace o charakterze praktycznym polegają na opracowywaniu optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych elementów układów transportowych, atestowaniu urządzeń o nowej konstrukcji oraz zastosowaniach transportu pneumatycznego w procesach technologicznych w różnych gałęziach przemysłu.

Niniejsza praca stanowi podsumowanie wykonanych dotychczas w Instytucie badań parametrów transportu pneumatycznego wysokociśnieniowego kilkudziesięciu materiałów sypkich.

Badania prowadzone były na zbudowanej w skali technicznej instalacji doświadczalnej, której schemat przedstawia rys.1.



Rys.1. Schemat instalacji badawczo-pomiarowej transportu wysokociśnieniowego tłoczącego.

Podstawowym podzespołem tego układu jest wysokociśnieniowy podajnik komorowy z dolnym rozładunkiem materiału systemu "POLKO" oznaczony na rys.1 numerem 6, wyposażony w zamknięcie dzwonowe 7, napędzane siłownikiem pneumatycznym 8. Pracą siłownika steruje czterodrogowy zawór elektromagnetyczny 11, do którego powietrze doprowadzane jest poprzez zawór odcinający 17, filtr 14 i smarownicę mgłową 15. Główny zawór odcinający 10 i zawór odpowietrzający 9 uruchamiane są sprężonym powietrzem poprzez dwudrogowe zawory elektromagnetyczne 12. Ciśnienie powietrza sterującego regulowane jest sprężynowym zaworem redukcyjnym 13. Podobny zawór redukcyjny ustala wielkość ciśnienia panującego w komorze podajnika podczas pracy instalacji.

Podajnik komorowy wprowadza badany materiał do rurociągu transportowego 4 o długości całkowitej $L = 105$ m /w tym odcinek pionowy $L_V = 6,3$ m/ i średnicy wewnętrznej $d = 100$ mm, wyposażonego w pięć łuków o promieniu gięcia $R = 1000$ mm, zmieniających kierunek jego biegu o kąt $= 1,5708$ rad / 90^0 /. Długość zastępcza tego rurociągu wynosi 190 m. Wykonane ze szkła organicznego wzierniki 5 umożliwiają obserwację zachowania się materiału w trakcie transportu.

Materiał sypki oddzielany jest od transportującego go powietrza w urządzeniu odbiorczym 18, z którego opada grawitacyjnie do umieszczonego nad podajnikiem komorowym zasobnika 23 zamkniętego zaworem przeponowym 22. Zasobnik ten połączony jest przesypem 24 z pokrywą zamknięcia dzwonowego 7, na której znajduje się także wysp świeżego materiału 25. Taka konfiguracja podzespołów umożliwia wielokrotne wykorzystanie w badaniach jednej porcji materiału.

Zapylone powietrze transportujące oczyszczane jest w układzie odpylającym, składającym się z dwóch cyklonów 19 i 20 oraz z filtra tkaninowego 21. Urządzenia filtracyjno wyposażone są w zasobniki pyłów, opróżniane okresowo poprzez zawory przeponowe 22. Zawory te posia-

dają wspólny układ zasilania, składający się z głównego zaworu odcinającego 17, filtra 14, sprężynowego zaworu redukcyjnego 13, zbiornika wyrównawczego 16 i dwudrogowych zaworów elektromagnetycznych 12.

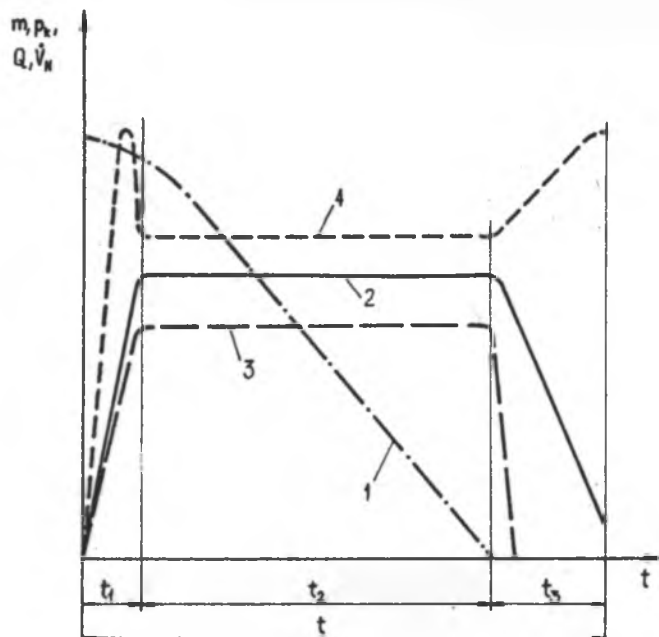
Instalacja badawcza zasilana jest sprężonym powietrzem przez zespół składający się z dwustopniowej sprężarki tłokowej 1, głównego zbiornika wyrównawczego 2 i oddzielnika wody 3.

Układ pomiarowy parametrów pracy instalacji stanowią zwięzła pomiarowa, manometry metalowe z przetwornikami potencjometrycznymi oraz centralny zespół rejestracji danych. Miejsca pomiarów ciśnień w instalacji oznaczone są na schemacie literą "p".

Wysokociśnieniowy podajnik komorowy z dolnym rozładunkiem materiału systemu "POLKO" jest urządzeniem pracującym cyklicznie. Rysunek 2 przedstawia zmiany parametrów charakteryzujących jego pracę w funkcji czasu.

Rozładunek podajnika rozpoczyna się już w momencie jego uruchomienia, a zmniejszanie się ilości materiału w komorze w okresie stabilnej ma charakter liniowy /krzywa 1/. Okres rozruchu urządzenia nie zawiera w sobie składnika czasu martwego, charakterystycznego dla cyklu pracy podajników, w których wykorzystano zjawisko aeracji /odpada konieczność zaerowania warstwy materiału przed rozpoczęciem jego transportowania/. Wzrost natężenia przepływu powietrza w fazie rozruchu wynika z konieczności napełnienia instalacji tym czynnikiem, a w fazie przedmuchiwania - ze zmniejszenia oporów przepływu w rurociągu transportowym /krzywa 4/.

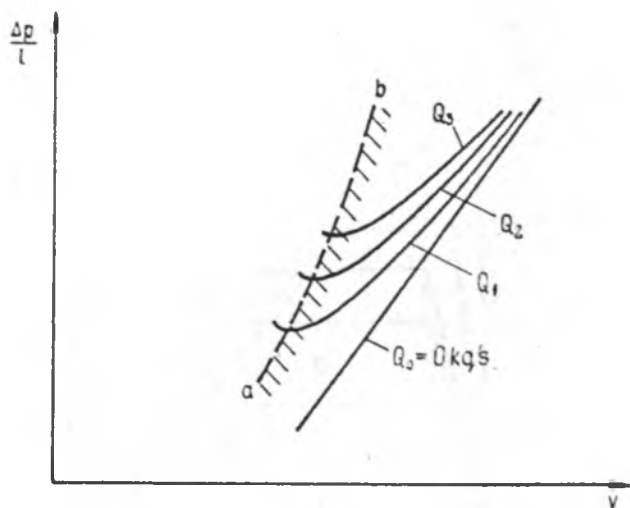
Praktyczne badania parametrów transportu pneumatycznego danego materiału sypkiego polegają na wielokrotnych pomiarach wielkości charakteryzujących pracę instalacji doświadczalnej. Każdy pomiar odbywa się przy odpowiednio zmienionych parametrach regulacyjnych podajnika komorowego. Taki tok postępowania umożliwia wyznaczenie zależności pomiędzy prędkością przepływu powietrza w rurociągu i jednostkowym spadkiem ciśnienia,



Rys.2. Charakterystyka parametrów pracy podajnika komorowego z dolnym rozładunkiem materiału systemu "POLKO"; 1 - masa materiału w podajniku; 2 - ciśnienie w komorze podajnika nad materiałem; 3 - wydajność podajnika; 4 - objętościowe natężenie przepływu powietrza; t_1 - czas rozruchu; t_2 - czas pracy stabilnej; t_3 - czas przedmuchiwania instalacji; t - czas trwania całego cyklu pracy bez uwzględnienia okresu załadunku podajnika.

dla różnych wydajności instalacji /Rys.3/.

Obszar ilustrujący pracę instalacji w zakresie transportu pneumatycznego przez unoszenie znajduje się pomiędzy krzywymi a - b oraz $Q = 0 \text{ kg/s}$. Korzystniejsze z punktu widzenia ekonomiki są takie parametry pracy układu, które dają punkty położone w pobliżu krzywej a - b na ww. wykresie.



Rys.3. Zależność jednostkowego spadku ciśnienia od prędkości przepływu gazu w rurociągu i wydajności instalacji.

Poszczególne wielkości charakteryzujące pracę instalacji transportowej obliczane są na podstawie wyników pomiarów.

Masowe natężenie przepływu powietrza wyznaczamy ze wzoru:

$$\dot{M} = 1,1107 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d_t^2 \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \varrho_1} \quad \text{kg/s,} \quad //1//$$

w którym α to liczba przepływu; ε - liczba ekspansji; d_t - wyrażona w metrach średnica otworu zwężki w temperaturze panującej w rurociągu; Δp - wyrażony w Pa spadek ciśnienia mierzony na zwężce; ϱ_1 - wyrażona w kg/m^3 gęstość powietrza przed zwężką.

Objętościowe natężenie przepływu powietrza \dot{V}_N , którego parametry sprowadzono do warunków normalnych /ciśnienie otoczenia $b_0 = 1013,25 \text{ hPa} = 760 \text{ mm Hg}$, temperatura otoczenia $T_0 = 273^\circ\text{K} = 0^\circ\text{C}$ / wyznacza się z zależności:

$$\dot{V}_N = \frac{\dot{M}}{\rho_1} \cdot \delta \quad \text{m}^3/\text{s} \quad /2/$$

gdzie δ jest współczynnikiem przeliczeniowym.

Wydajność instalacji oblicza się ze wzoru:

$$\dot{Q} = \frac{m}{t}, \quad \text{kg/s} \quad /3/$$

w którym m oznacza masę przetransportowanego materiału wyrażoną w kg; t - czas przemieszczania m kilogramów materiału w rurociągu transportowym wyrażony w sekundach.

Ilościową ocenę stopnia wykorzystania strumienia powietrza transportującego umożliwiają: masowa koncentracja mieszaniny:

$$\mu_M = \frac{\dot{Q}}{\dot{M}} \quad \text{kg/kg} \quad /4/$$

oraz objętościowa koncentracja mieszaniny:

$$\mu_V = \frac{\dot{Q}}{\dot{V}_N} \quad \text{kg/m}^3 \quad /5/$$

Wielkości te informują o masie materiału przetransportowanej przez 1 kg lub 1 m³ powietrza.

Objętość powietrza zużytego na przemieszczenie jednostki masy materiału /sprowadzoną do warunków normalnych/ wyznacza się ze wzoru:

$$V_n = \frac{V_N}{\dot{Q}} \cdot 10^3 \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad /6/$$

Współczynnik sprawności energetycznej instalacji transportowej wg [1] wyraża się stosunkiem:

$$n = \frac{P_u}{P_G} = \frac{g \cdot \dot{Q} \cdot L_z}{\dot{V}_N \cdot \Delta p} \quad /7/$$

Licznik tego ułamka nosi nazwę mocy użytecznej powietrza transportującego P_u . Moc ta wykorzystywana jest na przemieszczenie materiału z wydajnością \dot{Q} kg/s na odległość równą długości zastępczej rurociągu L_z , wyrażoną w metrach. Ponadto literą "g" oznaczono wartość przyspieszenia ziemskiego. Mianownikiem jest wielkość P_G nazywana mocą dostarczoną nośnikowi. Moc tę posiada strumień powietrza o objętościowym natężeniu przepływu \dot{V}_N m³/s /wartość sprowadzono do warunków normalnych/ i ciśnieniu wyższym od normalnego o Δp Pa.

O ekonomiczności pracy instalacji decyduje wielkość wskaźnika poboru energii obliczanego na podstawie wzoru

$$N = \frac{P_G}{\dot{Q}} = \frac{b \cdot \dot{V}_N}{\dot{Q}} \ln\left(\frac{p_1}{b}\right) \cdot 10^{-3}, \quad \text{MJ/Mg} \quad /8/$$

w którym b jest ciśnieniem barometrycznym w czasie pomiaru, a p_1 - bezwzględnym ciśnieniem nośnika na początku instalacji.

Wartości te wyrażone są w Pa. Powyższa zależność jest aktualna przy założeniu izotermicznego przebiegu sprężania powietrza.

Wartości prędkości niezbędne do sporządzenia wykresu przedstawionego na rys. 3 wyznaczane są z zależności:

$$w = \frac{\dot{M}}{A \cdot \rho}, \quad \text{m/s} \quad /9/$$

w której A jest polem poprzecznego przekroju rurociągu transportowego, wyrażonym w m², a ρ - gęstością powietrza w kg/m³.

Parametrem charakteryzującym ruch powietrza w instalacji jest liczba Forudá:

$$Fr = \frac{w}{\sqrt{g \cdot d}}, \quad /10/$$

w której d jest średnicą rurociągu, wyrażoną w m.

Wyniki pomiarów i obliczeń optymalnych parametrów techniczno-ekonomicznych, charakteryzujących pracę instalacji badawczej w przypadkach transportu różnorod-

nych materiałów, przedstawiono w tabeli 1. Przyjęto w niej następujące oznaczenia:

p_1 - nadciśnienie powietrza zasilającego, mierzone na początku instalacji transportowej; \dot{Q} - wydajność instalacji; \dot{M} - masowe natężenie przepływu powietrza; \dot{V}_N - objętościowe natężenie przepływu powietrza sprowadzone do warunków normalnych; μ_M - masowa koncentracja mieszaniny; μ_V - objętościowa koncentracja mieszaniny; V_n - zużycie powietrza na przetransportowanie jednostki masy materiału; w_{gr} - średnia prędkość przepływu powietrza w rurociągu; Fr - liczba Frouda odniesiona do w_{gr} ; n - współczynnik sprawności energetycznej instalacji; N - wskaźnik poboru energii.

Wyniki badań przeprowadzonych w Instytucie upoważniają do wytypowania transportu pneumatycznego wysokociśnieniowego jako podstawowej metody przemieszczania różnorodnych materiałów sypkich. Przedstawione w powyższej tabeli wyniki badań stały się podstawą do projektowania przemysłowych przenośników pneumatycznych. Praktyczna eksploatacja tych układów w pełni potwierdziła słuszność założeń projektowych, przyjętych na podstawie badań przeprowadzonych na instalacji doświadczalnej Instytutu Odlewnictwa.

Tabela 1

Wyniki pomiarów i obliczeń optymalnych
parametrów transportu pneumatycznego wysokociśnieniowego

Lp	Nazwa materiału	P_1	\dot{Q}	\dot{M}	\dot{V}_N	μ_M	μ_V	V_n	w_{sr}	Fr	n	N
		kPa	kg/s	kg/s	m ³ /s	kg/kg	kg/m ³	m ³ /Mg	m/s	-	-	MJ/Mg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Żywica Epicote	490,3	6,39	0,42	0,32	15,4	19,6	50,9	25,1	25,3	0,20	9,78
2	Kreda	480,5	5,10	0,41	0,32	12,5	16,0	62,2	23,7	23,9	0,17	11,43
3	Pentaerythritol	480,5	4,80	0,42	0,33	11,3	14,4	69,2	24,7	24,9	0,15	12,63
4	Trójmetylopropan	490,3	5,22	0,41	0,32	12,7	16,2	61,5	24,7	24,9	0,17	11,72
5	Glinka kaolinowa	539,4	15,56	0,51	0,48	25,5	32,5	30,7	36,7	37,0	0,34	6,04
6	Minia ołowiana	514,8	6,25	0,55	0,43	11,3	14,4	69,3	30,4	30,6	0,15	12,55
7	Pył magnezytowy	451,1	14,49	0,54	0,42	27,0	34,5	28,9	31,5	31,8	0,41	5,04
8	Łaz węglowy	505,0	6,86	0,39	0,30	17,7	22,7	44,1	21,7	21,9	0,24	8,02
9	Koks gazowy/0+0,3mm/	404,0	14,19	0,53	0,42	26,6	34,0	29,4	31,1	31,4	0,39	4,85
10	Antracyt /0-15 mm/	472,7	6,88	0,38	0,30	17,9	22,8	43,7	21,6	21,8	0,24	7,73
11	Siarczan amonu	397,2	7,43	0,46	0,36	16,1	20,6	48,5	27,7	27,9	0,23	8,14
12	Zestaw szklarski	500,1	6,09	0,44	0,34	13,8	17,7	56,4	24,9	25,1	0,18	10,39
13	Pyły lotne	535,4	11,76	0,48	0,37	24,7	31,5	31,7	26,0	26,2	0,31	5,93
14	Wapno hydratyzowane	509,9	11,59	0,47	0,37	24,5	31,3	31,9	25,3	25,5	0,31	5,79
15	Biel tytanowa	392,2	5,98	0,45	0,35	13,1	16,8	59,4	27,9	28,1	0,21	10,37

Tabela 1 - cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16	Czerni żelazowa	170,7	4,91	0,43	0,34	11,3	14,5	68,9	26,6	26,8	0,18	12,58
17	Czerwień żelazowa	485,4	4,29	0,45	0,35	9,6	12,2	81,6	27,7	27,9	0,15	15,08
18	Żółcień żelazowa	485,4	3,69	0,46	0,36	7,9	10,1	98,6	29,2	29,5	0,12	18,73
19	Mikrotalk	544,3	8,24	0,36	0,28	23,2	29,6	33,8	19,3	19,4	0,28	6,36
20	Biel cynkowa	463,9	3,79	0,45	0,35	8,5	10,8	92,4	25,3	25,5	0,11	16,34
21	Siarczan barowy	462,9	8,69	0,48	0,38	18,1	23,1	43,3	27,2	27,4	0,23	7,66
22	Bezwodnik kwasu flalowego	439,3	7,59	0,55	0,43	13,7	17,5	57,0	31,1	31,4	0,18	9,71
23	Żółcień pigmentowa	495,2	4,21	0,46	0,36	9,2	11,7	85,1	24,8	25,0	0,12	15,17
24	Tlenek miedziawy	392,2	9,92	0,52	0,40	19,2	24,5	40,7	28,3	28,6	0,26	6,85
25	Kwas adypinowy	392,2	8,24	0,52	0,41	15,7	20,1	49,7	28,7	28,9	0,21	8,36
26	Glikol neopenty- lowy	490,3	7,29	0,47	0,37	15,3	19,6	50,9	25,4	25,6	0,20	8,97
27	Melamina	559,0	9,60	0,29	0,23	32,5	41,6	24,0	15,6	15,7	0,39	4,55
28	Mocznik technicz- ny krystaliczny	480,5	10,95	0,51	0,40	21,5	27,5	36,3	26,3	26,5	0,29	6,42
29	Piasek kwarcowy frakcja gł. 0,32/ 0,20/0,16	336,4	9,58	0,47	0,56	20,4	26,6	38,8	26,4	26,6	0,25	6,98
30	Bentonit juno- słowiański	331,5	16,94	0,51	0,38	32,8	44,5	23,5	28,8	29,1	0,41	4,07
31	Mączka dolomitowa	245,1	13,97	0,53	0,40	26,4	34,9	43,6	31,6	31,9	0,42	4,32
32	Mączka wapienna	255,0	11,16	0,54	0,41	20,7	27,2	40,8	31,9	32,3	0,32	5,69
33	Wapno hydrauliczne	353,0	18,19	0,61	0,47	29,6	38,7	31,6	34,1	34,4	0,35	4,93

Tabela 1 -cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
34	Wapno hydratyzowane	451,1	11,58	0,47	0,37	24,3	31,3	36,8	25,2	25,5	0,24	7,20
35	Mąka kartoflana	255,0	9,19	0,55	0,42	16,7	21,8	51,5	32,5	32,9	0,26	7,06
36	Soda techn.ciężka	284,4	13,11	0,55	0,42	23,6	31,2	38,1	31,9	32,2	0,33	5,33
37	Pył z elektro- filtrów o temp. 373 ^o K	353,0	9,78	0,42	0,35	21,1	27,6	43,1	23,5	23,7	0,27	6,84
38	Pył z elektrofiltrów	255,0	16,00	0,51	0,51	24,0	31,1	39,8	30,1	30,4	0,48	4,93
39	Pył wielkopieczowy	353,0	8,86	0,38	0,38	19,7	25,6	46,6	21,2	21,4	0,30	7,38
40	Pył magnezytowy	313,8	14,64	0,41	0,44	27,2	33,0	33,0	23,3	23,6	0,46	5,33
41	Klinkieryt magnezytowy frakcja 1-3 mm	336,4	12,91	0,60	0,55	21,5	23,4	50,6	33,8	34,1	0,26	7,92
42	Ruda chromitowa frakcja 0- 0,5 mm	353,0	9,16	0,60	0,41	15,3	22,3	49,5	34,0	30,39	0,19	8,17
43	Walcowina	264,8	6,89	0,65	0,50	10,6	13,7	85,0	38,2	38,6	0,16	11,52
44	Wióry żeliwne	362,8	7,83	0,47	0,38	16,5	20,6	39,4	26,1	26,4	0,19	9,47
45	Suchy zestaw szklarski	264,8	11,30	0,54	0,41	20,8	27,3	45,7	31,7	32,0	0,31	5,76
46	Zestaw szklarski o wilgotn. 9,4 %	333,4	10,22	0,54	0,41	18,9	24,5	43,5	30,4	30,7	0,23	7,38
47	Muł z odstojuka aglomerowni - wilg. 8 %	264,8	4,40	0,41	0,32	10,6	13,8	77,3	24,1	24,4	0,16	11,52

Tabela 1 - cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
48	Masa formierska kwarcowo-łłowa- wilg. 5 %	333,4	9,16	0,45	0,25	20,0	37,0	41,0	25,0	20,3	0,25	5,04
49	Masa rdzeniowa olejowa Mrc - 1	460,9	7,47	0,45	0,35	16,4	21,3	52,7	24,0	24,3	0,16	10,62
50	Masa rdzeniowa olejowa Mrc - 4	402,1	9,05	0,56	0,43	16,0	20,7	54,2	30,6	30,9	0,17	10,51
51	Masa rdzeniowa żywiczna Mrg -3	480,5	11,41	0,41	0,31	27,7	35,9	31,3	21,8	22,0	0,25	6,26
52	Masa rdzeniowa do proc.Hot-box- Mrr - 5	411,9	10,77	0,64	0,50	16,8	21,5	52,8	34,8	35,2	0,17	9,76

LITERATURA

- [1] Dziadzia A.M.: Pneumaticzeskij transport na zier-noplererabatywajuszczich przedprijatach, Moskwa 1961.
- [2] Kuratow T.: Pomiarzy przepływów cieczy, par i gazów, Śląsk, Katowice 1977.
- [3] Gorbis Z.R.: Tiepłooobmien i gidromiechanika disple-rsnych skwoznych potokow, Energia, Moskwa 1970.
- [4] Welschof G.: VDI - Forschungsheft nr 492, 1962.
- [5] Dunajew N.E., Kudriawcewa Z.M., Kuzniecowa J. M.: Wduwanije pyliwidnych materialow w domiennyje pie-czi. Metalurgija, Moskwa 1977.
- [6] Piątkiewicz Z.: Wyniki badań i analiza pracy trans-portu pneumatycznego piasku i bentonitu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika z.54, Gli-wice 1975.
- [7] Sakwa W., Jura S., Piątkiewicz Z.: Analiza pracy i wyników badań transportu pneumatycznego wysoko-ciśnieniowego. Materiały Międzynarodowej Konferen-cji nt. Transportu Pneumatycznego, Sofia 1977.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Р е з ю м е

В работе представлено проблематику исследования пневматического транспорта, проведённых в Литейном Институте Шлёнского Политехнического Института. Оговорено конструкцию испытательно-измерительной установки и методику ведения расчётов параметров её работы. Представлено результаты испытаний параметров транспорта 52 материалов при высоком давлении.

RESULTS OF INVESTIGATIONS OF THE HIGH PRESSURE
PNEUMATIC TRANSPORT OF LOOSE MATERIALS

S u m m a r y

The paper presents the problems connected with the investigations of the pneumatic transport being carried out in Research Institute for Founding in Technical University - Gliwice.

The paper describes the construction of the testing and measuring installation and the methods for calculation of the parameters relating to its operation.

The results of examination of high pressure pneumatic transport covering 52 types of various materials have been also discussed.