

Damian HOMA

Zbigniew PIĄTKIEWICZ

Eugeniusz KOWALSKI

Instytut Odlewnictwa  
Politechniki Śląskiej

#### BADANIA URZĄDZEŃ TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO W ASPEKTCIE POTRZEB PROCESU TORKRETOWANIA

Streszczenie. W pracy przedstawiono zależności parametrów transportu pneumatycznego występujące podczas wykonywania procesu torkretowania. Na podstawie przeprowadzonych badań stanowiskowych i eksploatacyjnych wyznaczono funkcje regresji dla masowego natężenia przepływu materiału  $\dot{m}_c$ , prędkości wylotowej  $w_6$  oraz współczynnika oporu instalacji  $\lambda_{CR}$ . Dla powyższych zależności opracowano nomogramy w funkcji czterech zmiennych ( $P_2$ ,  $P_D$ ,  $D_R$ ,  $D_p$ ) przebadanych na trzech poziomach, zgodnie z wymogami planu eksperymentu.

Współczesne rozwiązania transportu pneumatycznego materiałów sypkich mają szerokie zastosowanie w realizacji bezpośrednich procesów technologicznych. Zastosowanie transportu pneumatycznego do procesu torkretowania pozwoliło na opracowanie nowoczesnej i efektywnej metody nanoszenia powłok z materiałów ziarnistych, realizowanych dla potrzeb hutnictwa [5], budownictwa, energetyki oraz przemysłu wydobywczego [6].

Szerokie zastosowanie procesu torkretowania do remontu wykładzin ogniotrwałych w urządzeniach hutniczych, piecach cementowych i komorach koksoowniczych oraz realizacji specjalnych warstw dla potrzeb energetyki czy też górnictwa wymaga prowadzenia kompleksowych badań procesu.

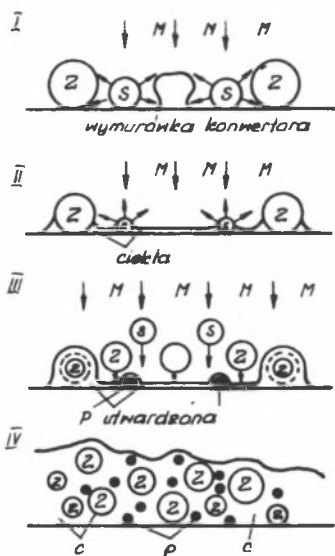
Dla zapewnienia wymaganych własności warstwy torkretu należy właściwie dobrać materiały sypkie, komponenty ciekłe oraz zapewnić parametry transportu pneumatycznego warunkujące prawidłowe powstawanie warstwy [1].

Parametry transportu pneumatycznego uzależnione są od zastosowanych urządzeń, adekwatnych do przyjętej technologii torkretowania, przy czym należy uwzględnić występujące czynniki eksploatacyjne, możliwości techniczne urządzeń oraz aspekt ekonomiczny ich stosowania [3]. Badania urządzeń transportu pneumatycznego dla potrzeb torkretowania realizowane są od szeregu lat w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Na bazie posiadanego stanowiska badawczo-pomiarowego prowadzone są badania zależności konstrukcyjnych występujących w elementach torkretownic, jak

również dobór i optymalizacja parametrów torkretowania dla różnych wariantów zastosowań.

## 2. Analiza potrzeb procesu torkretowania

Rozwój stalownictwa konwertorowego i elektrycznego w Polsce wymaga opracowania i wdrożenia technologii torkretowania w oparciu o krajowe maszyny i urządzenia. Zaspokajanie krajowych potrzeb w zakresie torkretowania przez wyspecjalizowane firmy zagraniczne związane jest ze znacznymi wydatkami dewizowymi, których można uniknąć, stosując krajowe rozwiązania zarówno mas, jak i urządzeń. Analizując proces powstawania warstwy na ogniotrwałym obmurzu można wyodrębnić wg [1] następujące etapy:



Rys. 1. Cykle formowania torkretu pokrycia z dodatkami spiekającymi (I-III)  
Uformowana warstwa torkretu masy (IV)

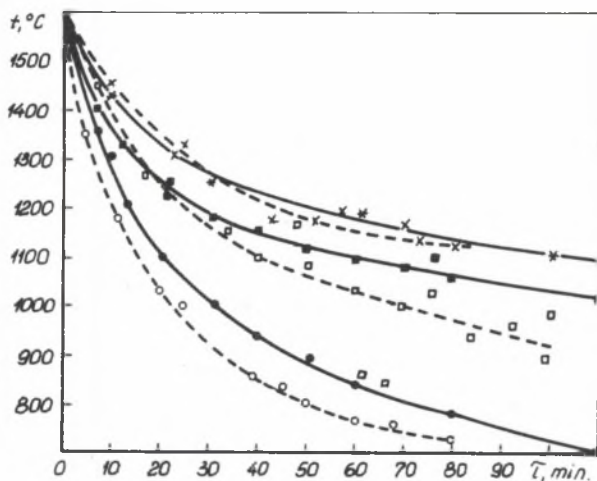
- transport cząstek masy z urządzenia podającego do torkretowanej powierzchni (przelot cząstek w przestrzeni pieca),
- osiadanie cząstek na torkretowanej powierzchni i przyleganie (przyczepianie do niej),
- tworzenie wiązań ceramicznych pomiędzy powierzchnią a naniesioną warstwą masy,
- spiekanie naniesionej warstwy masy.

Dwa ostatnie etapy tworzenia warstwy zależą w głównej mierze od fizykochemicznych własności masy, jak również termofizycznego stanu torkretowanej powierzchni. Zasadniczy wpływ na tworzenie się warstwy wywiera przyczepność cząstek, będąca funkcją odpowiednich parametrów transportu pneumatycznego cząstek.

Przedstawione na rys. 1 cykle formowania torkretu pokrycia obrazują proces powstawania warstwy torkretu ze zdyspergowanego układu trójfazowego masa -

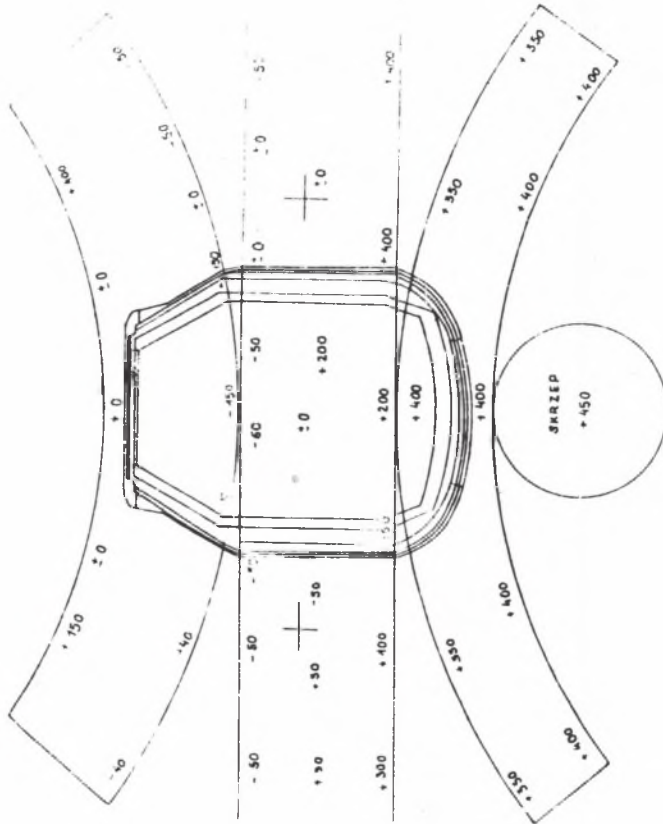
ciecz - powietrze. Można stwierdzić, że funkcja przyczepności cząstek uzależniona będzie w głównej mierze od ich prędkości w momencie zetknięcia z torkretowaną powierzchnią oraz ilości cieczy tworzącej lepki film. Zatem decydujące znaczenie z punktu prowadzenia badań transportu pneumatycznego ma nadanie cząstkom masy odpowiedniej prędkości oraz dozowanie odpowiedniej ilości cieczy z zapewnieniem warunku rozpylania jej w całej objętości strugi. Następnym parametrem, który musi być zachowany w niewielkim

przedziale tolerancji, jest masowe natężenie przepływu masy. Wynika to z konieczności prowadzenia procesu w przedziale temperatur 1200-1300°C, gdzie następuje optymalne [1] spiekanie i tworzenie wiązań ceramicznych. Zbyt mała wydajność powoduje zachłodzenie wymurówki i obniżenie efektów torcretowania, natomiast zbyt duża zwiększa "odpad" ziarn od torcretowanej powierzchni.



Rys. 2. Zmiany temperatury wewnętrznej powierzchni wyłożenia konwertora w zależności od czasu postoju, po spuście metalu

Przedstawione na rys. 2 zmiany temperatury powierzchni roboczej konwertora narzucają ograniczenie czasowe prowadzenia procesu, zwłaszcza pod koniec kampanii, gdy wymurówka chłodzi się znacznie silniej. Na podstawie badań eksploatacyjnych prowadzonych podczas torcretowania konwertorów stalowni Huty "Katowice" ustalono, że czas torcretowania nie powinien przekraczać 15 minut. Zakładając, że należy w tym czasie nanieść na powierzchnię wymurówki ok.  $1 \text{ m}^3$  masy (ok. 2.6/Mg), obliczono wyjściową wydajność procesu. Duże wymiary gabarytowe konwertorów tlenowych implikują konieczność stosowania odpowiedniej długości lanc do torcretowania. Podyktowane jest względami dobrego wymieszania komponentów sypkich i cieczy, jak również względami BHP (wysoka temperatura w przekroju gardzieli konwertora). Długość lany stwarza określone opory instalacji transportu pneumatycznego, będące podstawą do zaprojektowania całego układu. Równocześnie długość lany limituje możliwość prowadzenia procesu w najbardziej narażonych miejscach wymurówki. Analiza tych miejsc prowadzona na podstawie badań topografii wymurówki, przedstawionej przykładowo na rys. 3, pozwala na optymalne wyznaczenie długości lany oraz kształtu końcówki rozpylającej.



Rys. 3. Topografia zużycia wymurówki konwertora

Reasumując, można stwierdzić, że zasadniczymi parametrami procesu torkretowania decydującymi o prawidłowym i efektywnym nanoszeniu warstwy są:

- prędkość cząstek w momencie zetknięcia z torkretowaną powierzchnią,
- masowe natężenie przepływu cząstek,
- stopień zwilżenia cząstek (stosunek komponentów ciekłych do sypkich),
- długość lancy,
- kąt rozwarcia końcówki rozpylającej.

Celem ustalenia zależności pomiędzy wymienionymi parametrami a parametrami transportu pneumatycznego systemu "POLKO" przeprowadzono w Instytucie Odlewnictwa Pol. Śl. cykl badań w skali technicznej. Na specjalnie wybudowanym "modelu" wykładziny konwertora prowadzono badania procesu torkretowania wg założeń eksploatacyjnych torkretowania konwertorów.

### 3. Badania procesu torkretowania

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczo-pomiarowym przedstawionym schematycznie na rys. 4.

W skład stanowiska wchodzi następujące elementy:

- podajnik transportu pneumatycznego systemu "POLKO",
- mierniki spadku ciśnień i ciśnień w zaznaczonych punktach,
- rejestratory o ciągłym zapisie,
- model wykładziny konwertora wykonany w skali 1:1.

Wyniki badań zostały przetworzone przy użyciu EMC WANG-2200 wg oprogramowania przeznaczonego do obliczeń transportu pneumatycznego.

Program badań przyjęto dla czterech parametrów:

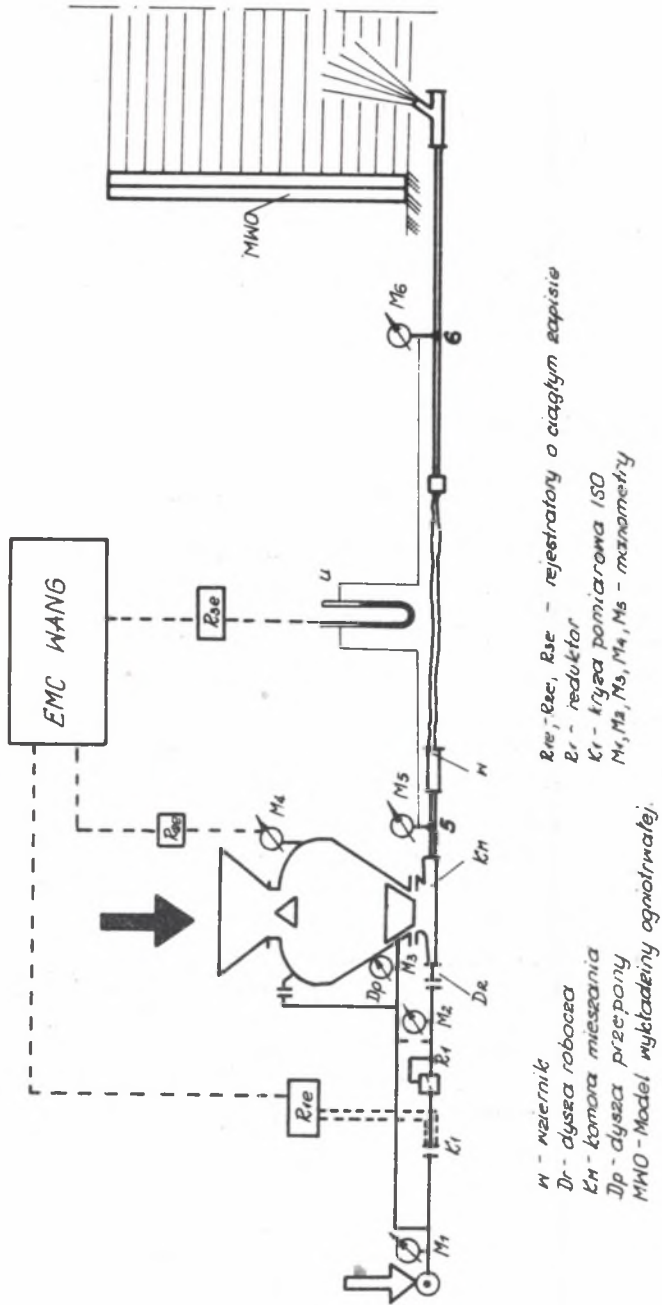
- ciśnienia zasilania  $P_z$ ,
- ciśnienia w podajniku komorowym  $P_k$ ,
- dyszy roboczej  $D_r$ ,
- dyszy przepony elastycznej  $D_p$ .

Każdy z parametrów określony był wstępnie na podstawie badań eksploatacyjnych, skąd określono dla planu eksperymentu zakres zmienności oraz poziomy badań.

Plan eksperymentu przeprowadzono dla czterech zmiennych na trzech poziomach (Plan Kono - typu D4). Wymaga to przeprowadzenia 48 pomiarów.

Zakres zmienności poszczególnych parametrów przedstawiał się następująco:

parametr	-1	0	+1
$P_z$	4	5	6
$P_k$	2	3	4
$D_r$	6	10	16
$D_p$	2	6	10



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczo-pomiarowego

$\dot{L}p.$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1
5	+1	+1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1
8	-1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1
10	-1	+1	+1	-1
11	+1	-1	+1	-1
12	-1	-1	+1	-1
13	+1	+1	-1	-1
14	-1	+1	+1	+1
15	+1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1
17	0	+1	+1	+1
18	0	+1	+1	-1
19	0	+1	-1	+1
20	0	+1	-1	-1
21	0	-1	+1	+1
22	0	-1	+1	-1
23	0	-1	-1	+1
24	0	-1	-1	-1
25	+1	0	+1	+1
26	+1	0	+1	-1
27	+1	0	-1	+1
28	+1	0	-1	-1
29	-1	0	+1	+1
30	-1	0	+1	-1
31	-1	0	-1	+1
32	-1	0	-1	-1
33	+1	+1	0	+1
34	+1	+1	0	-1
35	+1	-1	0	+1
36	+1	-1	0	-1
37	-1	+1	0	+1
38	-1	+1	0	-1
39	-1	-1	0	+1
40	-1	-1	0	-1
41	+1	+1	+1	0
42	+1	-1	+1	0
43	+1	+1	-1	0
44	+1	-1	-1	0
45	-1	+1	+1	0
46	-1	-1	+1	0
47	-1	+1	-1	0
48	-1	-1	-1	0
49	0	0	0	0

Rys. 5. Plan Kono  $X = 4$ ,  $N = 49$

Jako materiał do badań wytypowano masę ogniotrwałą MK produkcji Dolnośląskich Zakładów Magnezytowych w Świdnicy. Gęstość właściwa masy wynosiła  $2,80 \text{ Mg/m}^3$ , gęstość usypowa  $1,83 \text{ Mg/m}^3$ , kąt naturalnego usypu  $36^\circ$ .

Ogniotrwałe własności dorównują produkowanym aktualnie zagranicznym masom ogniotrwałym produkowanym przez wyspecjalizowane koncerny (Quigley, Weitscher i inne).

Jako wynikowe parametry eksperymentów przyjęto:

- prędkość wylotową fazy gazowej  $w_6$ ,
- wydajność instalacji  $\dot{m}_c$ ,
- współczynnik oporu instalacji  $\lambda_{CR}$ .

Przyjęcie prędkości wylotowej fazy gazowej zamiast prędkości cząstek masy wiąże się ze znajomością zależności prędkości fazy stałej i gazowej [2].

Jednak oddziaływanie końcówki rozpylającej w znacznej mierze zaburza wpływ obu faz i określenie w punkcie wypływu prędkości fazy stałej jest znacznie utrudnione.

Badania przeprowadzono przy użyciu przewodów transportowych elastycznych o średnicy wewnętrznej  $\varnothing 0,04 \text{ m}$  i długości  $25 \text{ m}$ . Długość lancy wynosiła  $8 \text{ m}$ .

Zależności konstrukcyjne są adekwatne do stosowanych aktualnie urządzeń do torkretowania, eksploatowanych w warunkach Stalowni Konwertorowej Huty "Katowice".

#### 4. Analiza wyników badań

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów uzyskano wyniki pozwalające na określenie parametrów pracy torkretalcy oraz zakresów regulacji parametrów transportu pneumatycznego.

Wynikowe parametry określono następująco:

1. Prędkość wylotowa fazy gazowej  $w_6$

$$w_6 = w_{5-6} \cdot \rho_{5-6} \cdot \rho_6^{-1} \quad [\text{m/s}]$$

gdzie:

- $\rho_{5-6}$  - średnia gęstość fazy gazowej na odcinku 5-6,
- $\rho_6$  - gęstość fazy gazowej w pkt. 6.

Średnia prędkość  $w_{5-6}$  określona jest ze wzoru:

$$w_{5-6} = \frac{P_{5-6}}{A \cdot \Delta p} \quad [\text{m/s}]$$



przy czym:

- $P_{5-6}$  - pobór mocy gazu przy założeniu adiabatycznego sprężania,  
 $A$  - przekrój przewodu transportującego,  
 $\Delta p$  - spadek ciśnienia w rurociągu na odcinku 5-6.

2. Wydajność instalacji  $\dot{m}_c$

$$\dot{m}_c = \frac{m}{t} \quad [\text{kg/s}]$$

przy czym:

- $m$  - masa transportowanego materiału sypkiego,  
 $t$  - czas transportu.

3. Współczynnik oporu  $\lambda_{GR}$

$$\lambda_{GR} = \frac{2}{Fr^2} \cdot \frac{P_{5-6}}{P_u} - \frac{\lambda_{GR}}{u}$$

gdzie:

$$Fr - \text{liczba Froude'a} = \frac{W}{\sqrt{g \cdot d}},$$

$$P_u - \text{moc użyteczna gazu} = \dot{m}_c \cdot g \cdot l \quad [W],$$

$$u - \text{masowa koncentracja mieszaniny} = \frac{\dot{m}_c}{m_G} \quad [\text{kg/kg}],$$

$\lambda_{GR}$  - liczba tarcia gazu o wewnętrzną powierzchnię rurociągu wyznaczona z zależności Prandtla,

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{GR}}} = 2 \ln (Re \cdot \sqrt{\lambda_{GR}}) - 0,8.$$

Stąd dla wyliczonej liczby Reynoldsa i dynamicznego współczynnika lepkości fazy gazowej w temperaturze pomiaru otrzymujemy:

$$\sqrt{\lambda_{GR}} = 0,015$$

Wyliczone w powyższy sposób parametry poddano obróbce statystycznej celem ustalenia zależności z parametrami wejściowymi ( $P_z$ ,  $P_p$ ,  $D_R$ ,  $D_G$ ).

Stosując metodę regresji krokowej ustalono następujące zależności:

1. Prędkość wylotowa fazy gazowej

$$W_G = 7.2954 + 2.5671 \cdot D_R + 2.2093 D_G + 2.2562 P_z - 4.3202 P_p$$

przy statystyce:

$$\text{test Fischera} \quad F = 37,83,$$

$$\text{współczynnik korelacji} \quad R = 0,879,$$

$$\text{odchylenie standardowe} \quad D = 18.76.$$

Przyjęcie modelu liniowego podyktowane było koniecznością maksymalnego uproszczenia wykresów oraz ułatwienia korzystania z nich. Funkcyjna zależność  $w_6 = (P_z, P_p, D_R, D_G)$  przedstawiona jest na rys. 6. Przyjmując wartości poszczególnych parametrów otrzymujemy wynikową wartość prędkości  $w_6$ .

2. Wydajność instalacji określona została następująco:

$$\dot{m}_c = 4,7717 + 0,0535 D_R + 0,1494 D_G - 0,2951 P_z - 0,0034 P_p$$

przy statystyce:

$$F = 45,97,$$

$$R = 0,898,$$

$$D = 14,94.$$

Funkcja ta przedstawiona została na rys. 7.

Dla praktycznego ułatwienia korzystania z wykresu na prostych oznaczających parametr  $P_p$  naniesiono czas transportu porcji masy  $m = 300$  kg.

3. Współczynnik oporu instalacji  $\lambda_{CR}$  przedstawiony został na rys. 8 jako syntetyczny wskaźnik wiążący prędkość fazy gazowej  $w_6$  oraz koncentracji mieszaniny  $u$ . Pozwala to przy znajomości wartości ( $w_6, u$ ) określić  $\lambda_{CR}$ , a tym samym umożliwia dobranie parametrów pracy instalacji zbliżonych do warunków optymalnych.

$\lambda_{CR}$  opisana jest następującym równaniem regresji wiążącym  $w_6$  oraz  $u$

$$\lambda_{CR} = 143,1012 - 0,2518 \cdot w_6 + 0,1174 \cdot w_6^2 - 0,0024 \cdot u^3$$

przy czym:

$$F = 37,26$$

$$R = 0,913$$

$$D = 10,32$$

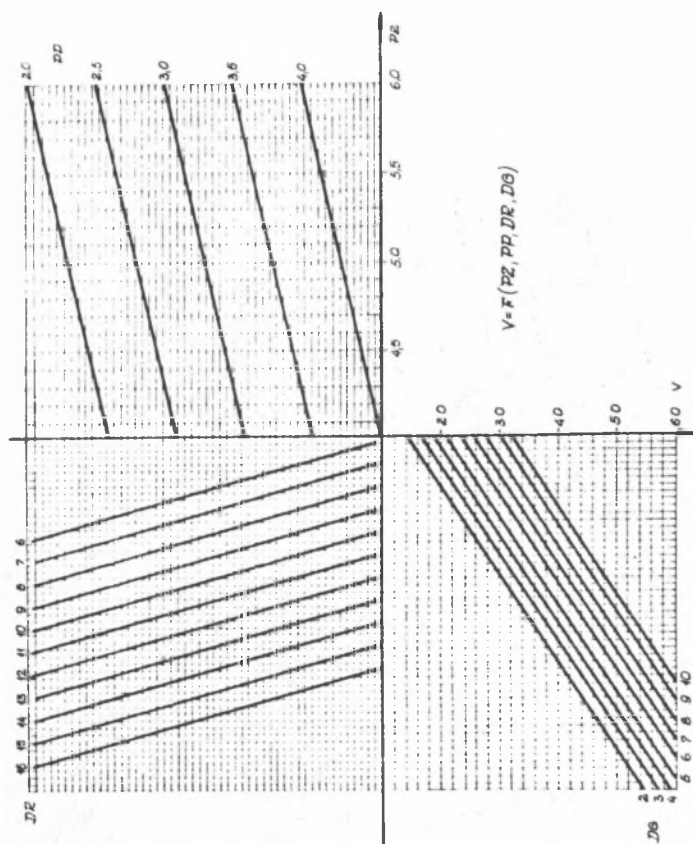
Na rys. 8 zamieszczono zależność przedstawiającą powyższe równanie.

Jak wynika z wykresu, decydujący wpływ na współczynnik oporu ma prędkość wypływu fazy gazowej  $w_6$ .

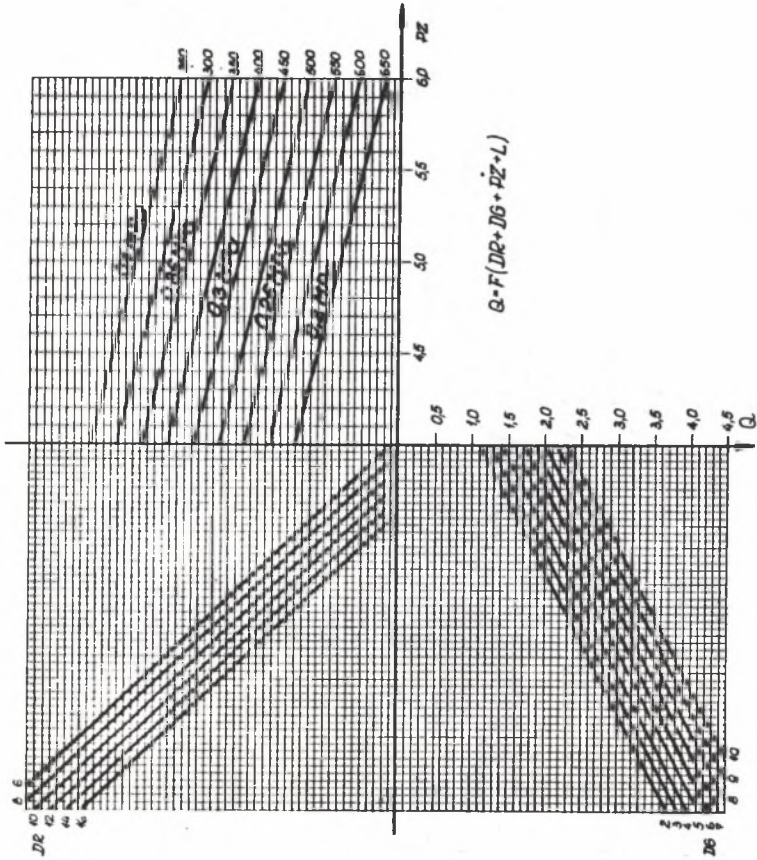
### Wnioski

1. Na podstawie przeprowadzonych badań w skali technicznej oraz badań eksploatacyjnych można stwierdzić, że parametry techniczne urządzeń transportu pneumatycznego systemu "POLKO" zapewniają w pełni potrzeby torkretowania:

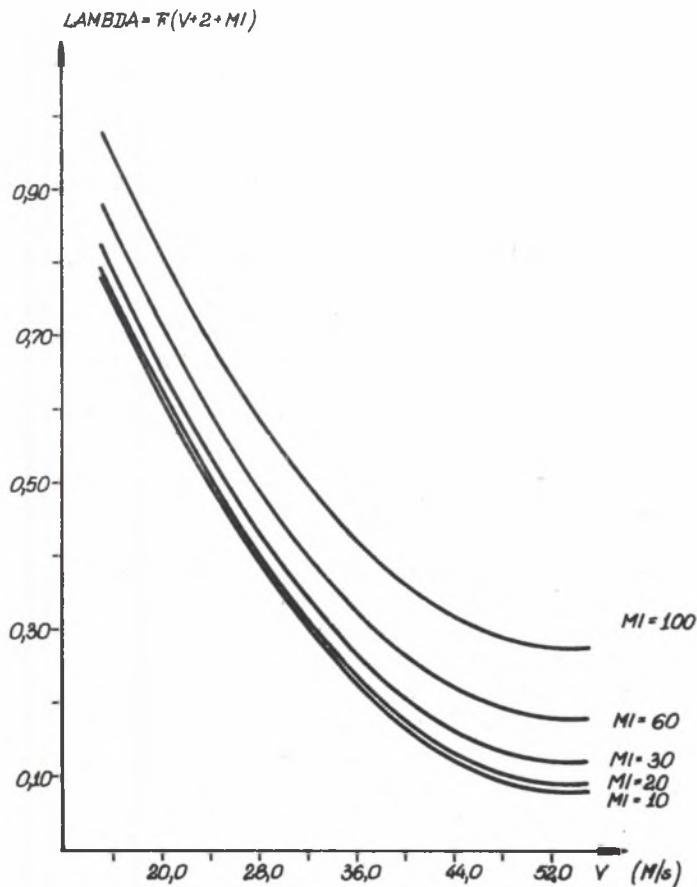
- a) dla zakresu wydajności 1-2,5 kg/s stosowanego przy torkretowaniu metalurgicznych urządzeń cieplnych urządzenia transportu pneumatycznego wykazują stabilny wpływ mieszaniny fazy stałej i gazowej;



Rys. 6. Prędkość wylotowa masy w<sub>6</sub>



Rys. 7. Wydajność instalacji  $m^3$



Rys. 8. Współczynnik oporu instalacji  $\lambda_{CR}$

- b) dla wymienionego zakresu przebadane eksploatacyjnie wartości stosunku komponentów ciekłych do sypkich zapewniają wg [4] odpowiednią zwilżalność osztek masy.
2. Zakres uzyskanych parametrów ( $w_G, m_G$ ) pozwala na prowadzenie procesu torcretowania w warunkach napraw ogniotrwałego wyłożenia pieców, jak również torcretowania kopalnianych wyrobisk i ich opylanie.
  3. Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono poprawność przyjęcia niezależnych danych wejściowych ( $P_x, P_p, D_R, D_G$ ) w aspekcie wartości wynikowych.

## LITERATURA

- [ 1 ] Marakulin J., Rybałkow Ł.: O temperaturie futerowki konwertora pri torkretirowaniju. Ognieupory 3/1982.
- [ 2 ] Piątkiewicz Z.: Teoretyczne podstawy obliczeń transportu pneumatycznego. WZO. Zeszyt 29. 1980.
- [ 3 ] Homa D.: Mechanizacja wykonywania warstw ogniotrwałych w metalurgicznych urządzeniach cieplnych. WZO. Zeszyt 24, 1978.
- [ 4 ] Orzechowski Z.: Rozpylanie cieczy. WNT, Warszawa 1976.
- [ 5 ] Wielikin A.: Torkretirowanije metakłurgiczeskich pieczej. Mietałłurgia 1972.
- [ 6 ] Piątkiewicz Z., Homa D.: Zastosowanie urządzeń transportu pneumatycznego w procesie torkretowania. Mechanika 66/1978.
- [ 7 ] Fuchs W.: Erfahrungen mit feuerfesten Massen für Schmelzfeuerungen. Energie und Technik 8/1967.
- [ 8 ] Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa 1976.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- A - pole przekroju poprzecznego przewodu transportowego
- D - odchylenie standardowe
- F - test Fischera
- m - masa transportowanego materiału
- $\dot{m}_c$  - masowa wydajność instalacji
- $\rho_G$  - masowe natężenie przepływu gazu
- $\lambda_{GR}$  - liczba tarcia gazu o wewnętrzną powierzchnię rurociągu
- $\lambda_{CR}$  - współczynnik oporu instalacji
- Fr - liczba Froude'a

ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ПНЕВМОТРАНСПОРТА  
ДЛЯ НУЖД ПРОЦЕССА ТОРКРЕТИРОВКИ

## Резюме

В работе представлены зависимости параметров пневмотранспорта имеющие место во время выполнения процесса тorkретировки. На основе проведённых опытных и эксплуатационных исследований определена функция регрессии для весового расхода потока материала скорости на выходе а также коэффициента сопротивления оборудования  $\lambda_{CR}$ . Для выше указанных зависимостей разработаны номограммы, являющиеся функциями от четырёх переменных ( $P_z$ ,  $P_p$ ,  $D_R$ ,  $D_p$ ) исследованных на трёх уровнях, согласно требованиям планированного эксперимента.

EXPERIMENTS WITH PNEUMATING CONVEYING EQUIPMENT  
FROM THE GUNITE NEEDS POINT OF VIEW

S u m m a r y

The paper presents relations between parameters of pneumatic conveying during gunite process. Regression functions for mass rate of flow  $\dot{m}_c$  outlet velocity  $w_6$  and instalation resistance coefficient  $\lambda_{CR}$  are found on the base of exploitation and laboratory experiments. Nomograms in the function of four variables ( $P_z$ ,  $P_p$ ,  $D_R$ ,  $D_p$ ) examined at the three levels are then elaborated.