

Zbigniew PIĄTKIEWICZ

Instytut Odlewnictwa
Politechniki Śląskiej

FUNKCJONALNE I KONSTRUKCYJNE CECHY
WYSOKOCIŚNIENIOWEGO TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO

Streszczenie. W pracy podano zasady wyboru rodzaju wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego, w zależności od charakterystycznych własności nosiwa, kosztów użytkowania oraz zakresu ich zastosowań. Przedstawiono rozwiązania i układy sterowania zasadniczych zespołów urządzeń decydujących o formie i stabilności przepływu mieszaniny dwufazowej ciała stałego i gazu. Wartości podstawowych wskaźników charakteryzujących pracę wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego przez unoszenie, fluidyzacyjny i pulsacyjny badanych materiałów, podano w formie tablic zestawieniowych.

Coraz szersze zastosowanie wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego w procesach masowego przemieszczania różnorodnych materiałów sypkich stosowanych w odlewniach wiąże się z rozwojem nowych opracowań konstrukcyjnych zespołów urządzeń funkcjonalnie dostosowanych do własności transportowanego nosiwa.

Wybór rodzaju transportu pneumatycznego dla badanego materiału przeprowadzono na instalacji badawczo-pomiarowej wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego przez unoszenie, fluidyzacyjny i pulsacyjny. Zakres przeprowadzonych badań i pomiarów w ogólnym zarysie obejmował: ocenę jakości pracy instalacji zbudowanej z odpowiednio dobranych zespołów urządzeń, a w szczególności trwałości i niezawodności działania oraz określenia optymalnych wskaźników techniczno-ekonomicznych charakteryzujących proces przemieszczania badanego materiału, jak również ocenę jakości materiału po pneumatycznym przetransportowaniu, tj. badanie właściwości materiału i dokonanie oceny jego przydatności do procesu technologicznego.

Urząd badawczy wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego wyposażono w następujące zespoły urządzeń: zasilające - podejniki komorowe (rys. 1, 2, 3) o pojemności użytecznej $1,0 \text{ m}^3$, rurociąg transportujący o średnicy wewn. 100 mm i długości prostych odcinków 110 m z wbudowanymi 5 łukami, z których każdy zmienia kierunek transportowanego materiału o $\pi/2$ rad., przy promieniu gięcia 1,0 m oraz odbiorcze (rys. 4) składające się z cyklonu rozładowczego 2 i wysokosprawnego 3 oraz filtra tkaninowego 4, zamkniętych gumowymi zaworami zaciskowymi 5 (szczegół A).

Urządzenia zasilające (podajniki komorowe) decydują o sposobie wprowadzenia materiału i gazu do rurociągu transportowego oraz zapoczątkowują przebieg określonej formy przemieszczania mieszaniny dwufazowej ciała stałego i gazu.

Poprawność konstrukcyjnego rozwiązania tych urządzeń w zasadniczy sposób decyduje o stabilności procesów pneumatycznego przemieszczania i niezawodności działania całej instalacji.

W układzie badawczym wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego przez unoszenie funkcję zasilacza spełniał podajnik komorowy systemu POLKO, o pracy cyklicznej, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Podajniki tego typu stosowana są przede wszystkim w instalacjach przeznaczonych do przemieszczania materiałów wilgotnych, wykazujących skłonność do zbrylania się i przyklejania do ścian. W odlewnictwie do tej grupy materiałów należą: świeże i przerobione masy formierskie, masy rdzeniowe, masy wybite z procesu wykonywania form piaskowych na wilgotno oraz wilgotne piaski odlewnicze. Przemieszczanie tych materiałów wymaga stosowania wysokich ciśnień 0,3 - 0,6 MPa, ze względu na duże opory przepływu oraz unoszenie materiału w strumieniu gazu na całej długości rurociągu transportowego, dla zachowania stabilności pracy przenośnika.

Podajnik komorowy (rys. 1) stanowi połączenie trzech równocześnie współpracujących ze sobą elementów: komory mieszania 1, dyszy 2 oraz zbiornika ciśnieniowego 3, wyposażonego w swej dolnej części w elastyczny stożkowy pierścień 4. Wewnętrzne powierzchnie podajnika mogą być pokryte emalią lub żywicą epoksydową dla zmniejszenia przyczepności transportowanego materiału. Zasada działania podajnika komorowego polega na równoczesnym wprowadzaniu sprężonego gazu do górnej i bocznej (stożkowej) części zbiornika ciśnieniowego 3 oraz do komory mieszania 1, który przekazuje swą energię bezpośrednio materiałowi, powodując jego wypływ do rurociągu transportowego 5 w postaci ciągłej strugi mieszaniny dwufazowej materiału i gazu. Stałą wartość ciśnienia gazu, w górnej części zbiornika 3, a tym samym zachowanie stałego nacisku wynikającego z naporu sprężonego gazu na górną powierzchnię materiału, utrzymuje zawór redukcyjny 6. Doprowadzenie sprężonego gazu do bocznej stożkowej części zbiornika 3 i wywołana tym wibracja elastycznego pierścienia 4 spulchniają materiał, co umożliwia jego swobodny przepływ w komorze mieszania 1. Wskutek doprowadzenia sprężonego gazu do dyszy 2, o stałym ciśnieniu ustalonym zaworem redukcyjnym 7, materiał z komory mieszania unoszony jest w strumieniu gazu i wprowadzony do rurociągu transportowego 5. Zastosowany układ sterujący umożliwia pracę podajnika komorowego w cyklu zautomatyzowanym, z możliwością ręcznego sterowania poszczególnymi operacjami. Maksymalny stopień napełniania materiałem podajnika komorowego określony jest izotopowym wskaźnikiem poziomu 8. W końcowej fazie cyklu pracy podajnika komorowego, podczas przedmuchiwania instalacji, następuje gwałtowny spadek ciśnienia w zbiorniku 3, co powoduje zwarcie styków manometru kontaktowego 9 oraz w

kolejności: włączenie elektrozaworu 10 i odcięcie głównego dopływu sprężonego gazu, zaworem 11.

Zasadnicze parametry wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego przez unoszenie mas formierskich i rdzeniowych oraz wilgotnego piasku kwarcowego podano w formie zestawieniowej w tabelicy 1.

W układzie badawczym wysokociśnieniowego transportu fluidyzacyjnego funkcję zasilacza spełniał podajnik komorowy systemu POLKO, o pracy cyklicznej, którego schemat przedstawiono na rys. 2. Zasada działania podajnika komorowego polega na upłynnieniu (sfluidyzowaniu) porcji materiału w zamkniętym zbiorniku ciśnieniowym 1, wskutek doprowadzenia sprężonego gazu przez elastyczny stożek pierścieniowy 2, zabudowany w części dolnej podajnika komorowego. W procesie upłynniania materiału gazem wzrasta ciśnienie w całej objętości zbiornika 1, co jest połączone z przepływem gazu do przestrzeni nad materiałem, w ilości odpowiadającej iloczynowi objętości tej przestrzeni i ciśnienia wprowadzanego gazu. Wprowadzenie upłynnionego materiału do rurociągu transportowego następuje przez równoczesne otwarcie zaworu obrotowego 3 komory mieszania 4 oraz zaworów 5 i 6 doprowadzających sprężony gaz do części górnej zbiornika 1 i do komory mieszania. Odpowiednio dobrane przekroje dysz 7 kierują główny strumień sprężonego gazu nad górną powierzchnię materiału w zbiorniku 1, stwarzając napór potrzebny do wprowadzania upłynnionego materiału do rurociągu transportowego 8. Stałe wartości ciśnień gazu w zbiorniku oraz u wlotu do dyszy komory mieszania 4 utrzymywane są zaworami redukcyjnymi 9, 10. Podajniki tego typu stosowane są w instalacjach przeznaczonych do przemieszczania materiałów suchych o frakcji bardzo drobnej, na ogół poniżej $20 \mu\text{m}$. W odlewnictwie do tej grupy materiałów należą: bentonit, glina kaolinowa i pył węglowy. Zastosowany układ sterujący umożliwia pracę podajnika komorowego w cyklu zautomatyzowanym, z możliwością ręcznego sterowania poszczególnymi operacjami. Maksymalny stopień napełnienia materiałem podajnika komorowego określony jest izotopowym wskaźnikiem poziomu 11. W układzie sterowania manometr kontaktowy 12 spełnia następujące funkcje: w fazie napowietrzania materiału po osiągnięciu żądanego ciśnienia w zbiorniku 1 przekazuje impuls wywołujący zadziałanie elektrozaworu 13 i otwarcie dopływu sprężonego gazu zaworami 5 i 6 oraz w fazie przedmuchu instalacji - wskutek gwałtownego spadku ciśnienia w zbiorniku 1 - powoduje zadziałanie elektrozaworu 14 i odcięcie głównego dopływu sprężonego gazu zaworem 15.

Zasadnicze parametry fluidyzacyjnego transportu pneumatycznego w warunkach przemieszczania bentonitu jugosłowiańskiego, gliny kaolinowej i pyłu węglowego podano w formie zestawieniowej w tabelicy 2.

W układzie badawczym wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego pulsacyjnego funkcję zasilacza spełniał podajnik komorowy systemu POLKO, o pracy cyklicznej, którego schemat przedstawiono na rys. 3. Zasada działania podajnika komorowego polega na równoczesnym wprowadzeniu sprężonego

Tablice 1

Zestawienie parametrów charakteryzujących transport pneumatyczny przez unieszenie, w warunkach przemieszczenia wilgotnych materiałów sypkich

rodzaj transportowanego materiału	ciężnienie powietrza wciągającego, MPa	masowe natężenie materiału, $\frac{m}{kg \cdot s^{-1}}$	masowe natężenie powietrza, $\frac{m}{kg \cdot s^{-1}}$	wzrostowe natężenie powietrza, $\frac{V_0}{m^3 \cdot s^{-1}}$	masowe przesłanie mieszanki, $\frac{M}{m^3}$	wzrostowy pobór powietrza, $\frac{V_0}{m^3 \cdot Mg^{-1}}$	prędkość powietrza, $\frac{w}{m \cdot s^{-1}}$	liczba Froude'a	wskaznik sprężalności, $\frac{1}{n}$	wydatkowy pobór energii, $\frac{E}{MJ \cdot Mg^{-1}}$
smieśa masa formierska, kwarcono-ilona, o wilgotności do 5%	3,4	9,16	0,45	0,35	20,3	42	25,0	25,2	0,32	5,4
masa kwarcono-ilona wybita z form, o wilgotności 3% i maksymalnej wielkości brył 20 mm	3,3	8,61	0,43	0,33	20,0	41	24,2	24,4	0,33	5,58
masa rdzenia Mir-1 o składzie: piasek kwarcowy 22%, piasek tusty 15,3%, spoiwo S13 9%, surony olej liniany 3,0%, ropa naftowa 0,5%, woda 4-5%	0,48	7,48	0,45	0,35	16,4	50	23,7	23,9	0,25	7,20
masa rdzenia Mir-5 o składzie: piasek kwarcowy 100 kg, spoiwo S13 3 kg, wleba wodne sodowe 5 kg, 30% rozżarzonej NaOH 0,6 kg, ropa naftowa 0,5 kg, woda 1 kg	0,49	10,4	0,41	0,32	25,3	34	21,5	21,7	0,38	4,82
masa rdzenia Mir-3 do procesu gorącej rdzenia (Mir-3) o składzie: piasek kwarcowy 100 kg, surony 2,5 kg, ropa naftowa 0,4 kg	0,43	9,6	0,64	0,50	15,0	57	34,3	34,6	0,24	7,63
masa rdzenia Mir-4 o składzie: piasek kwarcowy 40 kg, spoiwo S13 7 kg, surony olej liniany 2,5 kg, ropa naftowa 0,4 kg, woda do wilgotności 4,5%	0,42	9,05	0,56	0,44	16,0	53	30,1	30,4	0,25	7,02
piasek kwarcowy 2 K5-0,20 (0,32), 0,40- M70-1350, o wilgotności: 2%	0,34	8,7	0,44	0,35	19,4	44	24,6	24,8	0,36	5,15

Tablica 2

Zestawienie parametrów charakteryzujących fluidyzacyjny transport pneumatyczny przelatającego, składników wiążących i dodatków specjalnych

rodzaj transportowanego materiału	ciężnienie powietrza wciągającego P MPa	masowe natężenie materiału m_c kg s ⁻¹	masowe natężenie powietrza m kg s ⁻¹	objętościowe natężenie powietrza V_k m ³ s ⁻¹	masowe stężenie mieszaniny z	jednostkowy pobór powietrza V_k m ³ s ⁻¹	prędkość powietrza w m s ⁻¹	liczba Foude'a Fr	wskaznik sprężalności energetycznej n	jednostkowy pobór energii E MJ kg ⁻¹
bentonit jugosłowiański	0,39	17,3	0,46	0,36	37,2	24,5	25,0	25,3	0,64	2,88
glinka kaolinowa	0,55	16,2	0,49	0,38	33,1	27,3	25,3	25,5	0,48	3,88
pył węglowy	0,42	14,2	0,48	0,37	29,3	29,6	25,8	26,0	0,49	3,74

gazu do zbiornika ciśnieniowego 1 i komory mieszania 2, który przekazując swą energię bezpośrednio materiałowi, powoduje jego przetłaczanie do rurociągu transportowego 3, w postaci ciągłej jednolitej strugi wypełniającej cały przekrój transportowy. Podany przebieg wypływu materiału z podajnika komorowego wywołany jest: stałym naciskiem na górną powierzchnię materiału, wynikającym z naporu sprężonego gazu o stałym ciśnieniu utrzymanym zaworem redukcyjnym 4, napowietrzeniem materiału w strefie wibracyjnego elastycznego pierścienia 5 oraz przetłaczaniem materiału z komory mieszania 2 do rurociągu transportowego 3 pod naporem sprężonego gazu wprowadzanego dyszą 6.

Zapoczątkowanie podziału ciągłej strugi, wypływającego materiału z podajnika komorowego, na porcje rozdzielone pęcherzami gazowymi następuje przez impulsowe wprowadzanie sprężonego gazu bezpośrednio do rurociągu transportowego. Funkcję samoczynnego wprowadzania gazu do rurociągu transportowego spełnia zawór impulsowy 7 współpracujący z zasilaczem rurowym gazu 8.

Zabudowanie samoczynnie działających zasilaczy sprężonego gazu wzdłuż całej linii transportowej w odstępach od 3 do 30 m, w zależności od rodzaju transportowanego materiału i konfiguracji trasy, zapewnia stabilne przemieszczenie materiału porcjami, a w przypadku zatrzymania transportu, bez koniecznego przedmuchiwania instalacji, na ponowne jej uruchomienie. W odlewnictwie podajniki tego typu stosowane są do przemieszczania suchonych piasków odlewniczych. Zastosowany układ sterujący umożliwia pracę podajnika komorowego w cyklu automatycznym, z możliwością ręcznego sterowania poszczególnymi operacjami. Maksymalny stopień napełnienia materiałem podajnika komorowego określony jest górnym izotopowym wskaźnikiem poziomu 12. Zakończenie cyklu pracy podajnika komorowego następuje po jego opróżnieniu do dolnego izotopowego wskaźnika poziomu 13 bez końcowego przedmuchiwania rurociągów transportowych. W układzie sterowania manometr kontaktowy 14 spełnia funkcję włączenia zaworu dekompresyjnego 15, z równoczesnym włączeniem przełącznika czasowego określającego czas trwania dekompresji podajnika.

Zasadnicze parametry wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego pulsacyjnego suchonego piasku kwarcowego podano w formie zestawieniowej w tablicy 3.

Poszczególne wielkości charakteryzujące pracę badanych układów transportu pneumatycznego (tabl. 1-3) wyznaczono na podstawie wyników pomiarów i obliczeń.

- Masowe natężenie przepływu materiału transportowanego:

$$\dot{m}_c = m_c \cdot t^{-1} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

w którym m_c [kg] określa masę transportowanego materiału, t [s] czas przemieszczania tej masy rurociągiem transportowym.

Tablica 3
Zestawienie parametrów charakteryzujących transport pneumatyczny pulsacyjny

rodzaj transportowanego materiału	ciśnienie powietrza pomiarowe p MPa	masowe natężenie materiału m_k kg s ⁻¹	masowe natężenie powietrza \dot{m} kg s ⁻¹	masowe natężenie powietrza V_w m ³ s ⁻¹	masowe natężenie powietrza V_v m ³ Mg ⁻¹	ochłodzony pobór energii V_w m ³ Mg ⁻¹	predkosc powietrza w m s ⁻¹	liczba Prandla Pr	wielkość sprężenia n	ochłodzony pobór energii E MJ Mg ⁻¹
suszony piasek kwarcowy 2Kb-020/032/040 - M70 - 1350	0,56	7,9	0,29	0,22	27,3	30,1	46,7	46,9	0,98	4,86

- Masowe natężenie przepływu powietrza:

$$\dot{m} = 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d_f^2 \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

w którym α oznacza liczbę przepływu, ε liczbę ekspansji, d_f [m] średnicę otworu zwężki w temperaturze panującej w rurociągu, Δp [Pa] mierniczy spadek ciśnienia w zwężce, ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] gęstość powietrza przed zwężką.

- Objętościowe natężenie przepływu powietrza eprowadzone do warunków normalnych:

$$\dot{V}_N = \dot{m} \cdot \rho_N^{-1} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

- Masowe stężenie mieszaniny w rurociągu transportującym:

$$\mu = \dot{m}_c \cdot \dot{m}^{-1};$$

- Pobór powietrza (sprowadzonego do warunków normalnych) na przetransportowanie jednostki masy materiału:

$$V_N = \dot{V}_N \cdot m_c^{-1} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{Mg}^{-1}]$$

- Średnia prędkość powietrza w rurociągu transportującym:

$$w = \frac{L \cdot \dot{V}_N}{A \cdot \Delta p_R} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

w której L [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$] określa pracę sprężania odniesioną do 1 m^3 zassanego powietrza, wyrażona wzorem:

$$L = \frac{k}{k-1} \cdot p_N \cdot \left[\left(\frac{p_R}{p_N} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$$

p_R [MPa] ciśnienie powietrza niezbędne dla pokonania oporów przepływu mieszaniny ciała stałego i powietrza w rurociągu transportującym, A [m^2] przekrój rurociągu transportującego, Δp_R [MPa] spadek ciśnienia w rurociągu transportującym, $k = 1,4$ wykładnik adiabaty dla powietrza, p_N - ciśnienie bezwzględne [MPa].

- Liczba Froude'a, odniesiona do średniej prędkości powietrza w rurociągu transportującym:

$$F_r = w/\sqrt{g \cdot d};$$

w której d [m] średnica rurociągu transportującego.

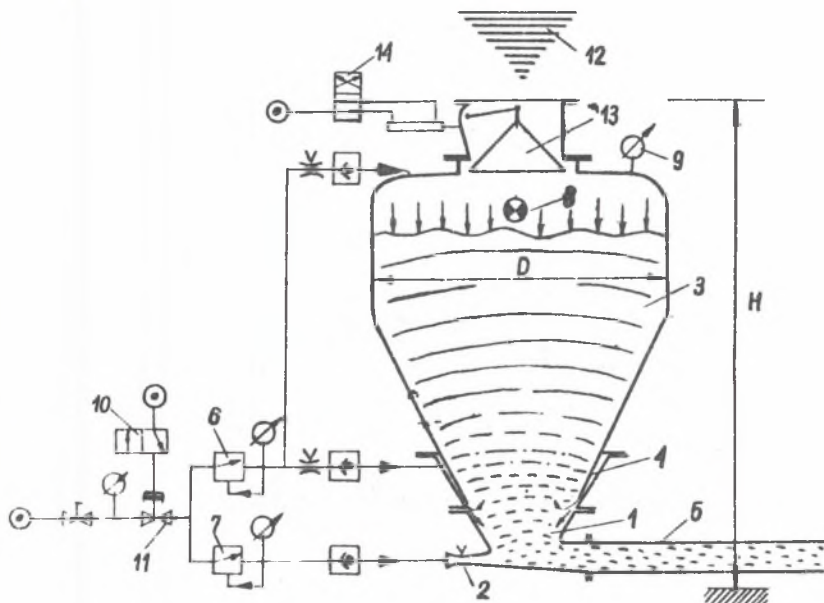
- Współczynnik sprawności energetycznej instalacji transportującej, wyrażony stosunkiem mocy użytecznej powietrza do całkowitej mocy dostarczonej nośnikowi:

$$n = \frac{g \cdot \dot{m}_c \cdot l}{L \cdot \dot{V}_N};$$

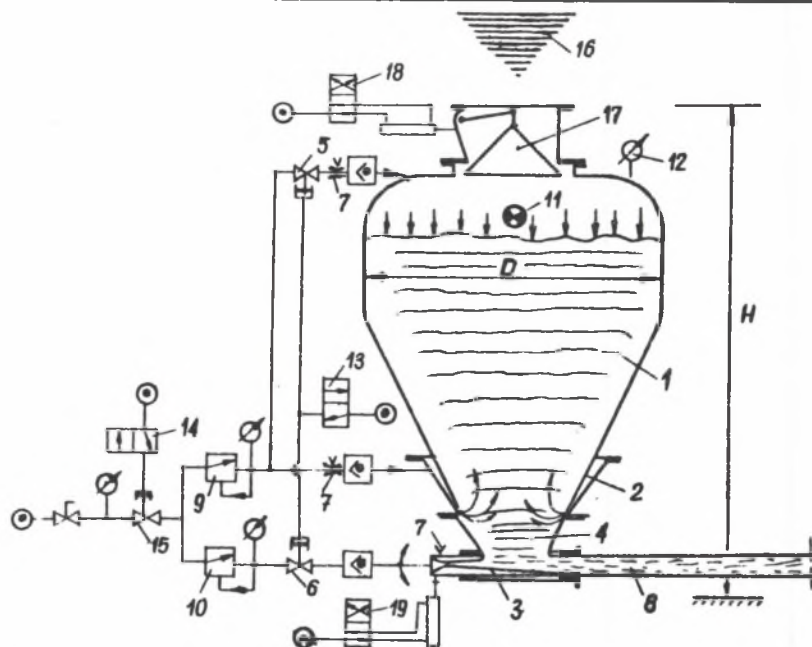
w której l [m] oznacza długość zastępczą rurociągu transportującego, g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] przyśpieszenie grawitacyjne, L [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$] pracę sprężania 1 m^3 powietrza, przy zmianie ciśnienia z p_N do p , tj. do ciśnienia zasilania układu transportu pneumatycznego.

- Wskaźnik poboru energii wyrażony ilorazem całkowitej mocy dostarczonej nośnikowi do masowego natężenia przepływu materiału:

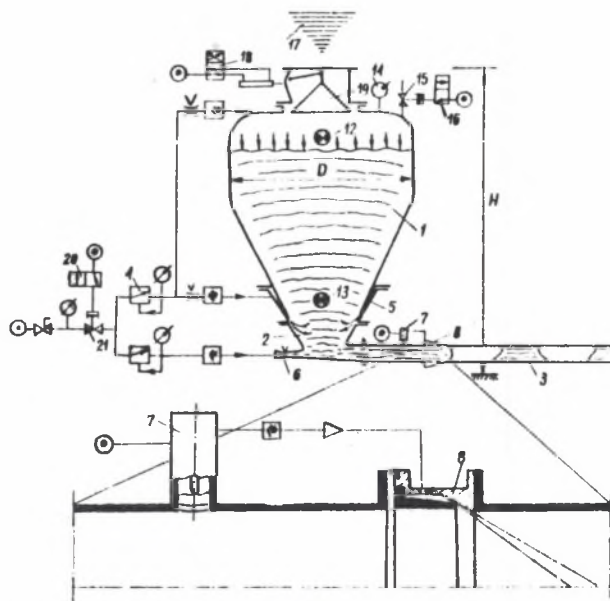
$$N = L \cdot \dot{V}_N / \dot{m}_c \quad [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}].$$



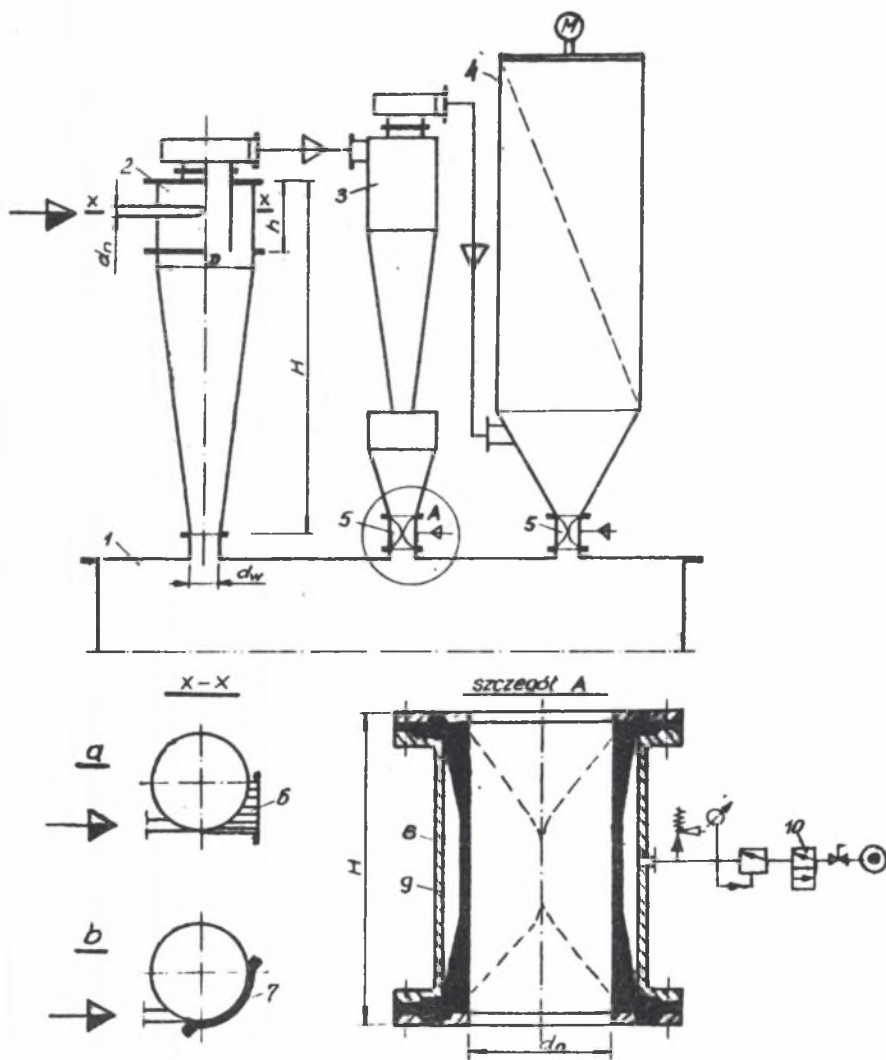
Rys. 1. Podajnik komorowy systemu POLKO, wysokociśnieniowego transportu pneumatycznego przez uniesienie



Rys. 2. Podajnik komorowy systemu POLKO fluidyzacyjnego wysokociężniowego transportu pneumatycznego przelazającego



Rys. 3. Podajnik komorowy systemu POLKO wysokociężniowego transportu pneumatycznego pulsacyjnego



Rys. 4. Urządzenia odbierze wysięknieńowego transportu pneumatycznego

LITERATURA

- [1] Kunił D., Lewenzpil O.: Promyślennoje psewdoozizenije. Chimija, Moskwa 1976.
- [2] Sakwa W., Jura S., Piątkiewicz Z.: Analiza pracy i wyników badań transportu pneumatycznego wysokociśnieniowego. Materiały Międzynarodowej Konferencji Transportu Pneumatycznego, Sofia 1977.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО
ТРАНСПОРТА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Р е з ю м е

В работе даны основы выбора типа пневматического транспорта высокого давления, в зависимости от характеристических особенностей носителя, стоимости употребления а также размера его применения. Представлены решения и системы управления основных групп устройств, имеющих решающее значение для формы и стабильности потока двухфазной смеси твёрдого тела с газом. Значения основных показателей, характеризующих работу пневматического транспорта высокого давления путём вознесения флуидизационного и пульсационного исследованных материалов, даны в форме сборных таблиц.

FUNCTIONAL AND CONSTRUCTIONAL PROPERTIES OF HIGH
PRESSURE PNEUMATIC CONVEYING

S u m m a r y

Principles of choice of high pressure pneumatic type are given, depending on properties of material handled, exploitation costs and area of possible applications. Solutions and control systems of main equipment complexes determining a form and stability of flow solid - gas are presented. Values of basic indices describing the high pressure pneumatic conveying using convection, fluidization and pulsation of tested materials are given in the form of statement tables.