

Jan PALARSKI

TEORETYCZNA ANALIZA TECHNOLOGII PODSADZANIA PNEUMATYCZNEGO W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO

Streszczenie. W pracy podano teoretyczną analizę pneumatycznego transportu materiałów podsadzkowych w rurociągach. Omówiono rodzaje przepływów występujących w pneumotransporcie i scharakteryzowano instalacje.

Podano wzory obliczeniowe sieci sprężonego powietrza i zależności matematyczne pozwalające projektować instalacje podsadzkowe z przepływami unoszonym i zagęszczonym.

W konkluzji podano uzasadnienie stosowania pneumotransportu zagęszczonego.

Obecnie stosowane w praktyce górniczej instalacje pneumatycznego transportu materiałów podsadzkowych charakteryzują się długością większą od 200 m i wydajnością ponad 150 m³/h, co wymaga uwzględnienia w obliczeniach ściśliwości powietrza i strat energii z tytułu jego rozprężenia.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że w szczególnych przypadkach dwukrotne zwiększenie zagęszczenia cząstek stałych w strumieniu powietrza powoduje 2,5-krotny spadek zużycia energii. Wyprowadzone równania mogą stanowić podstawę do projektowania pneumatycznego transportu skruszonych skał płonnych, pyłów dymnicowych i mas betonowych.

1. WSTĘP

Uwarunkowania geologiczno-górnice i względy ochrony powierzchni oraz naturalnego środowiska narzucają konieczność zmiany sposobów likwidacji zrobów w kopalniach węgla kamiennego. W ostatnich pięciu latach udział wydobywania ze ścian z podsadzką pneumatyczną w ogólnym wydobywaniu węgla wahał się w przedziale od 1 do 1,2%, a ze ścian z podsadzką hydrauliczną od 14 do 17%. Do roku 1990 przewiduje się zwiększenie wydobywania ze ścian z podsadzką pneumatyczną do około 3-5%, a ze ścian z podsadzką hydrauliczną do około 20%.

Dotychczas do podsadzki hydraulicznej w przeważającej większości stosuje się jako materiał podsadzkowy piasek, natomiast w podsadzce pneumatycznej materiałem podsadzkowym są skruszone skały ponne względnie materiały odpadowe pochodzące z zakładów przerobczych.

W najbliższej przyszłości przewiduje się zwiększyć udział skruszonych skał płonnych pochodzących z hałd, robót przygotowawczych i udostępniających, jak i odpadów z zakładów przerobczych i odpadów z Haldexu w materiale stosowanym do podsadzki hydraulicznej. Nie bez znaczenia jest także konieczność zagospodarowywania w podziemiach kopalń jak największej ilości odpa-

ów drobnoziarnistych, tzn. szlamów z osadników i odpadów pochodzących z zakładów energetycznych w postaci popiołów lotnych. Ta zmiana ilościowa udziału wydobycia, jak i zmiana rodzaju stosowanego materiału, wymaga także wprowadzenia pewnych modyfikacji w samej technologii podsadzania, zarówno hydraulicznego jak i pneumatycznego.

W referacie tym zostaną podane zależności pozwalające projektować optymalne parametry podsadzania pneumatycznego, natomiast zagadnienia dotyczące generalnej zmiany technologii podsadzki hydraulicznej i jej projektowania przedstawione zostaną w referacie na konferencji "Hydromechanizacja V" w październiku 1987 r.

2. TRANSPORT PNEMATYCZNY MATERIAŁÓW PODSADZKOWYCH DO WYROBISK POEKSPLOATACYJNYCH

Aktualnie znane są trzy metody pneumatycznego transportu materiału podsadzowego do wyrobisk poeksploatacyjnych, rys. 1.

1. Tradycyjna technika transportu materiału podsadzowego od podsadzarki do czynnej ściany.

2. Transport pneumatyczny bezpośrednio z powierzchni popiołów lotnych do czynnych ścian wydobywczych.

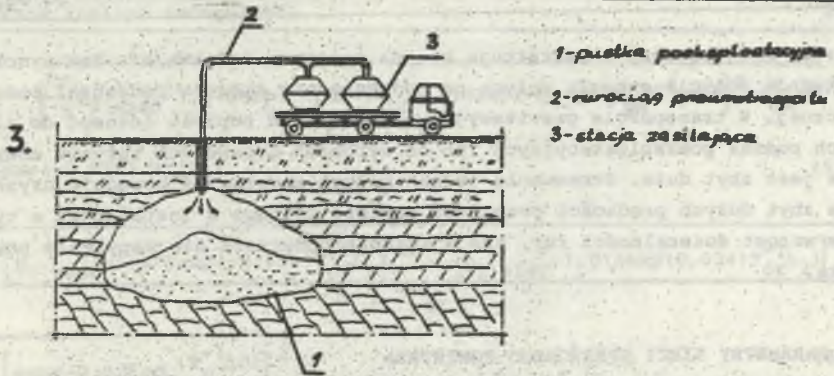
3. Transport pneumatyczny materiałów podsadzowych do starych pustek poeksploatacyjnych zazwyczaj niedostępnych z czynnych wyrobisk. W związku z czym materiał transportowany jest od dozownika do wyrobiska rurociągami powierzchniowymi i instalowanymi w odwiertach.

Poza tymi trzema metodami istnieje także możliwość stosowania transportu pneumatycznego do przenoszenia mas betonowych dla celów budownictwa podziemnego.

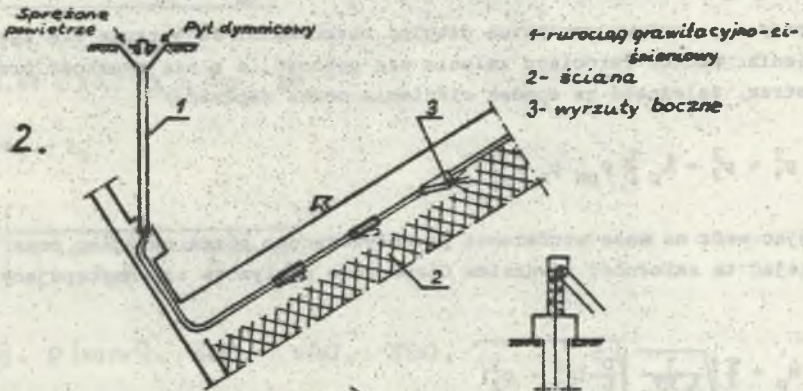
Wymienione metody transportu obejmują właściwie dwa różne rodzaje materiałów podsadzowych.

W związku z tym, układy pneumotransportu różnią się w zasadniczy sposób pomiędzy sobą. Można mówić o transporcie pneumatycznym gruboziarnistych materiałów ($d < 100$ mm) i o transporcie pneumatycznym materiałów drobnoziarnistych ($d < 1$ mm).

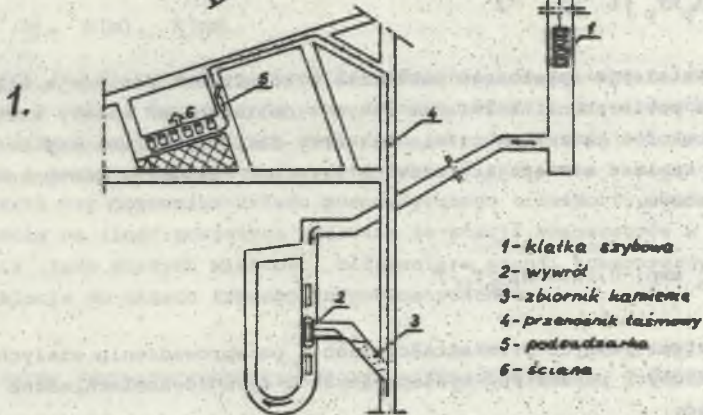
Układ tradycyjnej podsadzki pneumatycznej obejmuje cały zestaw maszyn i urządzeń służących do przygotowania i przenoszenia materiału do podsadzarki oraz instalacje transportu pneumatycznego łącznie z siecią sprężonego powietrza. Natomiast układ transportu pneumatycznego materiału drobnoziarnistego typu: pyły lotne, cement, piasek itd. jest to układ, który składa się w zasadzie z zespołu maszyn i urządzeń służących do przesiewania i dozowania materiału oraz z sieci rurociągów transportu pneumatycznego wraz z siecią sprężonego powietrza. Dotychczasowe instalacje transportu pneumatycznego pracują często na parametrach daleko odbiegających od optymalnych. Stąd też analizując zużycie energii w podsadzce pneumatycznej wskaźnik ten jest



- 1-pusłka poeksploatacyjna
- 2-rurociąg pneumatyczny
- 3-stacja załadunku



- 1-rurociąg grawitacyjno-ciśnieniowy
- 2-ściana
- 3-wyrzutny boczny



- 1-klatka sztywna
- 2-wywrót
- 3-zbiornik karmienie
- 4-przenośnik taśmowy
- 5-podsadzarka
- 6-ściana

Rys. 1. Warianty pneumatycznego transportu materiałów podsadzkowych

1) układ tradycyjnej podsadzki pneumatycznej, 2) instalacja pneumopodsadzania popiołem lotnym, 3) instalacja pneumopodsadzania niedostępnych pustek poeksploatacyjnych

Fig. 1. Alternatives of pneumatic transport of stowing materials

1) traditional arrangement of pneumatic stowing, 2) installation for pneumatic stowing with volatile ashes, 3) installation for pneumatic stowing of inaccessible old workings

bardzo niekorzystny i kształtuje się na poziomie 4-8 kWh/m³. Tak wysoki wskaźnik zużycia energii wpływa na podwyższenie kosztów podszadzki pneumatycznej. W transporcie grawitacyjno-ciśnieniowym popiołu lotnego do nieczynnych pustek poeksploatacyjnych lub do wyrobisk ścianowych zużycie energii nie jest zbyt duże. Stosowanie jednak małych zagęszczeń powoduje uzyskiwanie zbyt dużych prędkości przepływu popiołu lotnego w instalacji, a tym samym wzrost ścieralności rur, zaś w ścianie podwyższa się zapylenie powietrza.

3. PARAMETRY SIECI SPRĘŻONEGO POWIETRZA

Podczas przepływu powietrza długimi rurociągami rejestruje się spadki ciśnienia. Wzdłuż rurociągu zmienia się gęstość, a z nią prędkość przepływu powietrza. Zależność na spadek ciśnienia można zapisać:

$$P_1^2 - P_2^2 = \lambda_p \frac{L}{D} \rho_{pn} P_n v_p^2 \quad (1)$$

Stosując wzór na masę strumienia przepływającego przez rurociąg oraz uzupełniając tę zależność równaniem Clapeyrona otrzymuje się następujący związek:

$$\dot{M}_p = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{1}{\lambda_p} \frac{D^5}{RT_p} (P_1^2 - P_2^2)} \quad (2)$$

Wiadomo, że instalacje sprężonego powietrza w kopalniach posiadają stacje kompresorów na powierzchni. W związku z tym w obliczeniach należy uwzględnić wpływ głębokości na zmianę ciśnienia. Przy założeniu przemiany izotermicznej można napisać następujący wzór na przyrost ciśnienia statycznego w rurociągu pionowym:

$$P_{kop} = p_n \exp(-0,0264 h \rho_{pn} T_p^{-1}) \quad (3)$$

Po prostych matematycznych przekształceniach i po wprowadzeniu stałych wartości dla niektórych parametrów występujących w tych równaniach, można ostatecznie uzyskać:

$$P_2 \text{ sieć} = \frac{1}{\exp(-0,0264 \rho_{pn} T_p^{-1} \Delta h)} \left[P_1 \text{ sieć} + 1,013 \exp(-0,0341 T_{ot}^{-1} h_1) \right]^2 - \frac{Q_p^2 \phi}{\rho_{pn}} - 1,013 \exp(-0,0341 T_{ot}^{-1} h_2) \quad (4)$$

$$p_1 \text{ siec} = \sqrt{\left[(p_2 \text{ siec}^{+1,013} \exp(-0,0341 T_{ot}^{-1} h_2)) (\exp(-0,0264 \rho_{pn} T^{-1} \Delta h)) \right]^2 + Q_{pn}^2 \phi} - 1,013 \exp(-0,0341 T_{ot}^{-1} h_1) \quad (5)$$

$$Q_{pn} = \sqrt{\frac{\left[p_1 \text{ siec}^{+1,013} \exp(-0,0341 T_{ot}^{-1} h_1) \right]^2 - \left[p_2 \text{ siec}^{+1,013} \exp(0,0341 T_{ot}^{-1} h_2) \right]^2}{\phi}} \cdot \left[\exp(-0,0264 \rho_{pn} T_p^{-1} \Delta h) \right]^2 \quad (6)$$

gdzie:

$$\phi = 4,64 \cdot 10^{-15} \lambda_p D^{-5} \rho_{pn} L T_p$$

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

$$\lambda_p = \left[\frac{1}{-2 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda_p}} + \frac{k}{3,71 D} \right)} \right]^2$$

$$p [\text{bar}], \quad \rho [\text{kg/m}^3], \quad L [\text{m}], \quad D [\text{m}], \quad T [\text{K}],$$

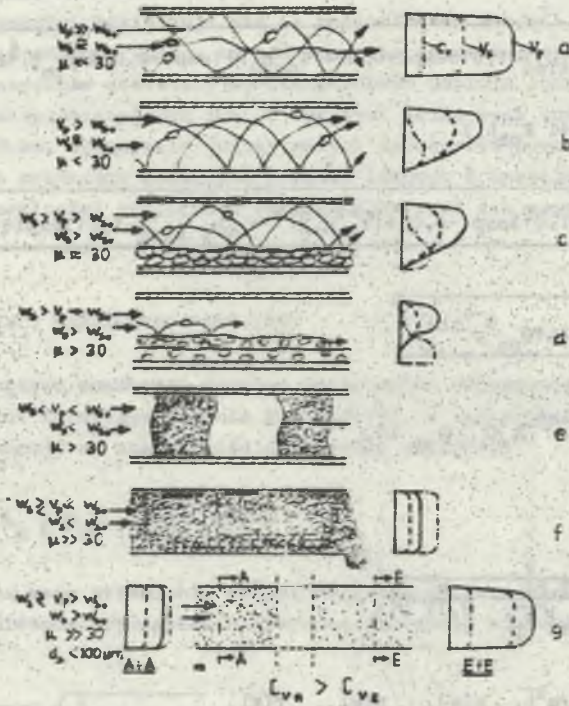
$$Q [\text{m}^3/\text{h}], \quad h [\text{m}], \quad k [\text{mm}].$$

Zależności (4, 5) pozwalają określić ciśnienie, do jakiego należy sprężyć powietrze w stacji kompresorów przy zadanym układzie przestrzennym instalacji i podanych jej parametrach względnie przy danym ciśnieniu w stacji kompresorów i parametrach sieci określić wartość ciśnienia w miejscu zabudowy podsadzarki czy dozownika układu pneumatycznego transportu. Wzór (6) jest zależnością na ilość powietrza podawaną ze stacji kompresorów w przypadku przyjęcia jako stałych wielkości ciśnienia w stacji kompresorów i ciśnienia na wlocie do układu transportu pneumatycznego.

4. PARAMETRY PNEUMATYCZNEGO TRANSPORTU MATERIAŁÓW GRUBO- I DROBNOZIARNISTYCH

4.1. Charakterystyka transportu pneumatycznego w rurociągu

Podobnie jak w hydrotransportie, można w transporcie pneumatycznym wyróżnić kilka rodzajów przepływu strugi materiału w rurociągu, rys. 2. Najczęściej znajduje w praktyce zastosowanie transport z unoszeniem cząstek stałych, które mogą się przemieszczać po względnie prostych torach lub ruchem saltacyjnym.

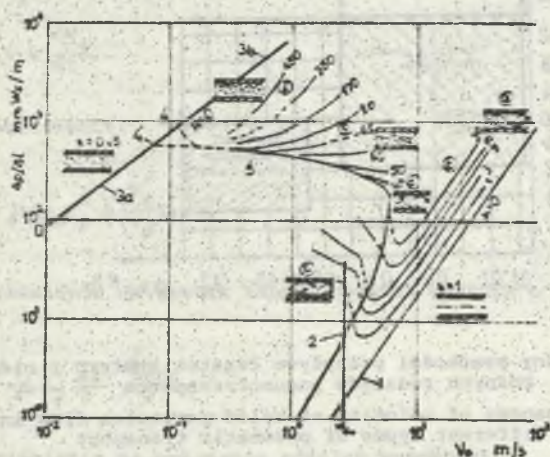


Rys. 2. Rodzaje przepływów w poziomym rurociągu pneumatycznego transportu
 a) przepływ z unoszeniem cząstek stałych po torach prostych i zakrzywionych, b) przepływ saltacyjny, skokowy cząstek stałych, c) przepływ pasmowo-saltacyjny, d) przepływ z wleczeniem ziaren po dnie rurociągu, e) przepływ z ruchomymi korkami, f) przepływ z całkowitym zapełnieniem rurociągu, g) przepływ z wypełnionym rurociągiem o zmiennej koncentracji wzdłuż drogi transportu

Fig. 2. Types of flow in a horizontal pipeline for pneumatic transport
 a) flow with convection of solid particles along straight and curved path, b) saltation, c) stratified flow, d) ware flow, e) plug flow, f) flow with complete filling of the pipeline, g) flow with filling of the pipeline of variable concentration along the road of transport

Istnieje także możliwość przemieszczania się materiału po dnie rurociągu, czyli następuje jego wleczenie. Te trzy rodzaje ruchu cząstek stałych w transporcie unoszonym występują przy transporcie materiałów gruboziarnistych.

Pneumatyczny transport o zagęszczonym strumieniu może odbywać się w różnej formie, rys. 2, a rodzaj przepływu zależy od zagęszczenia, uziarnienia i ciśnienia dyspozycyjnego. Przy koncentracji cząstek stałych w strumieniu około 20% rozpoczyna się przepływ z wleczeniem pasm materiału po dnie z odbiciami od ścianek. Powyżej tej koncentracji występuje transport z przesu-



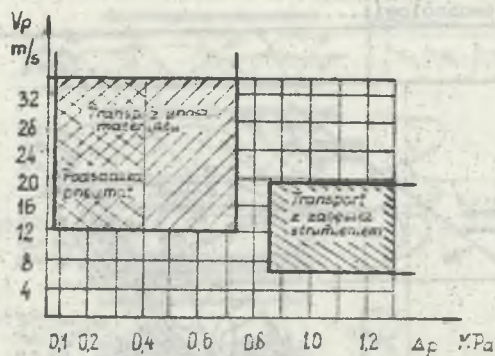
Rys. 3. Straty ciśnienia w zależności od prędkości przepływu dla różnych rodzajów przepływu

1 - krzywa przepływu powietrza, 2 - prędkość spadania pojedynczego ziarna $d_s = 350 \mu\text{m}$, 3a - krzywa przepływu powietrza przez luźny materiał, 3b - krzywa przepływu powietrza przez zwarty zbiór ziarn, 4 - punkt powstawania wirów, 5 - krzywa powstawania warstwy wirującej a-g jak na rys. 2

Fig. 3. Pressure curve depending on the velocity of flow for different kinds of flows

1 - curve of the air flow, 2 - velocity of the fall of an individual grain $d_m = 350 \mu\text{m}$, 3a - curve of the air flow through loose material, 3b - curve of the air flow through compact set of grains, 4 - point of vortices formation, 5 - curve of the formation of whirling layer a-g as in fig. 2

waniem cząstek całym przekrojem lub w postaci korków, względnie przepływ o zmiennym zagęszczeniu. Do chwili obecnej transport o silnie zagęszczonym strumieniu $\mu = 100-500$ nie znajdował zastosowania w praktyce, gdyż projektowane instalacje wyposażano w kompresory o dużych wydajnościach i małych ciśnieniach dyspozycyjnych. W takich instalacjach wzrost zagęszczenia doprowadza od razu do zatkania rurociągu. Dopiero od kilku lat rozpoczęły prace instalacje, w których możliwy jest transport zagęszczony, gdyż uruchomiono produkcję urządzeń gwarantujących wysokie ciśnienia i możliwość ciągłego dozowania materiału do rurociągu. Zużycie energii w takich instalacjach kształtuje się na poziomie 1/3-1/7 zużycia energii w tradycyjnych instalacjach. W praktyce istotna jest znajomość strat ciśnienia w pneumatycznym transporcie w zależności od ilości czy prędkości powietrza i wydajności transportu. Na rys. 3 przedstawiono wykres strat ciśnienia dla różnych rodzajów pneumatycznego transportu. Wykres ten ograniczają dwie krzywe. Krzywa (1) to krzywa charakteryzująca przepływ powietrza w rurociągu i krzywa (3) to krzywa oznaczająca przepływ powietrza pomiędzy cząstkami nie poruszającego się materiału, czyli jest to filtracyjny przepływ powie-



Rys. 4. Zakres zmiany prędkości przepływu cząstek stałych i ciśnienia dla różnych rodzajów pneumatycznego transportu

Fig. 4. Range of changes of velocity of solid particles flow and pressures for different types of pneumatic transport

trza przez cząstki stałe. Z wykresu tego wynika wniosek, że transport pneumatyczny z unoszeniem cząstek stałych odbywa się w przedziale wyższych prędkości i stosunkowo niedużych ciśnień. Natomiast transport ze szczelnie wypełnionym rurociągiem, czyli o dużych koncentracjach przepływu, odbywa się przy małych prędkościach i dużych ciśnieniach, rys. 4.

4.2. Pneumatyczny transport materiału podsadzkowego z unoszeniem cząstek

Spadek ciśnienia w rurociągu podczas pneumatycznego transportu cząstek stałych z unoszeniem w strumieniu powietrza jest między innymi sumą spadków ciśnienia wywołaną następującymi zjawiskami:

- tarcie powietrza o ścianki rurociągu,
- tarcie cząstek stałych o ścianki rurociągu,
- przyspieszeniem cząstek stałych,
- zmianą wysokości położenia,
- występowaniem oporów lokalnych, np. kolana, zwojki.

Barth [1] podał zależności pozwalające opisać parametry takiego transportu. Podstawą obliczeń było założenie, że gęstość powietrza jest stała w rurociągu.

Poszczególne składniki sumarycznego spadku ciśnienia wyrażają następujące zależności:

- straty ciśnienia na skutek tarcia powietrza o ścianki rurociągu:

$$\Delta p_{pr} = \lambda_p \frac{\Delta l}{D} \frac{v_p^2 \rho_{pn}}{2} \quad (7)$$

- straty ciśnienia na przyspieszanie cząstek stałych

$$dp_{sA} = m \frac{dv_s}{dt} \quad (8)$$

czyli po obliczeniu:

$$\Delta p_s = \mu \rho_{pn} v_p^2 \Delta \left(\frac{v_s}{v_p} \right) \quad (8a)$$

- straty ciśnienia na skutek tarcia cząstek stałych o ścianki rurociągu:

$$\Delta p_{sR} = \mu \lambda_2 \frac{\Delta L}{D} \frac{v_p^2 \rho_{pn}}{2} \quad (9)$$

- straty ciśnienia na pokonanie różnicy wysokości

$$\Delta p_h = \mu \frac{v_p}{v_s} \rho_{pn} g \Delta h \quad (10)$$

- strata ciśnienia na pokonanie miejscowych oporów przepływu:

$$\Delta p_m = \xi \frac{v_p^2}{2} \rho_{pn} \quad (11)$$

Podczas przepływu materiału podsadzkowego przez kolano cząstka poruszająca się po torze prostym uderza o zakrzywienie rurociągu, wytraca swoją prędkość, a następnie zostaje ponownie przyspieszona do prędkości proporcjonalnej do prędkości przepływu powietrza. Na to przyspieszenie traci się określoną porcję energii, stratę ciśnienia z tego tytułu można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$\Delta p_k = k \mu \rho_{pn} v_p^2 \Delta \left(\frac{v_s}{v_p} \right) \quad (12)$$

Dla materiałów takich jak w podsadzce pneumatycznej wartość współczynnika k można przyjąć równą 0,3-0,4.

Strata ciśnienia w rurociągu podsadzki pneumatycznej podczas transportu materiału podsadzkowego jest sumą wyżej wymienionych cząstkowych strat.

$$\Delta p = \Delta p_{pr} + \Delta p_s + \Delta p_{sR} + \Delta p_{sh} + \Delta p_k + \Delta p_m \quad (13)$$

Jak z cytowanych zależności wynika, do określenia sumarycznych strat niezbędna jest znajomość ekwiwalentnego współczynnika oporu przepływu cząstek stałych λ_z i znajomość stosunku prędkości kamienia i powietrza. Wielkości te wyznacza się z warunku równowagi sił działających na cząstki stałe i zasady zachowania energii i pracy [4]:

$$\lambda_z = \lambda_z^* \frac{v_s}{v_p} - \frac{2 \frac{w_s}{v_p}}{F_r^2 \frac{v_s}{v_p}} = \lambda_z^* \frac{v_s}{v_p} - \frac{2 w_s}{F_r^2 v_s} \quad (14)$$

$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{1}{1 + w_s \sqrt{\frac{\lambda_z^*}{2gD}}} \quad (15)$$

Przedstawione równanie (13) oraz wzory (14) i (15) pozwalają wyznaczyć sumaryczną wartość strat ciśnienia i były używane do określania strat przepływu materiału podsadzkowego w przypadku stosowania podsadzarek o małych wydajnościach i rurociągu o nieznaczącej długości i małej średnicy ($D = 120, 150$ mm). Najczęściej wzory te po pewnych przekształceniach sprowadzono do prostej postaci:

$$\Delta p = \Delta p_{pr} (1 + \lambda_{z\mu}) + \Delta p_{sh} \quad (16)$$

Równanie to wyprowadzono w bardzo prosty sposób pomijając zależność (8a) na przyspieszenie materiału podsadzkowego i wzory na opory lokalne przepływu. Opory te uwzględniono wprowadzając długość ekwiwalentną rurociągu. Współczynnik λ_z był zazwyczaj przyjmowany dla materiałów podsadzkowych jako równy $\lambda_z = 0,02 \div 0,3$.

Wprowadzenie jednak instalacji o znacznie większych długościach i innych średnic rurociągu i stosowanie większych wydajności wymagało uwzględnienia w obliczeniach ściśliwości powietrza. Ściśliwość ta ma wpływ na wartość strat ciśnienia przepływu samego powietrza, jak i zmianę prędkości cząstek stałych wzdłuż rurociągu.

Wstawiając do wzoru (16) zależność (1) uwzględniającą wpływ ściśliwości powietrza na straty oraz dokonując szeregu przekształceń matematycznych można ostatecznie otrzymać następujący związek [2]:

$$p_1 = 33,3 \frac{\dot{M}_s}{\mu} \sqrt{\frac{L_z}{D^5}} + \frac{24200 \mu^2 \sqrt{D^5 L_z}}{\dot{M}_s - 0,84 v_u D^2 \mu} \quad (16a)$$

$$v_u = 15 \div 23 \text{ [m/s]}; \quad \dot{M}_s \text{ [kg/s]}; \quad L_z \text{ [m]}; \quad D \text{ [m]}.$$

Współczynniki występujące w tym równaniu zostały wyznaczone doświadczalnie na podstawie pomiarów na instalacjach przemysłowych. Wzór (16a) opisuje z zadowalającą dla praktyki dokładnością zależność pomiędzy ciśnieniem na wlocie do rurociągu podsadzkowego, a wydajnością podsadzania, ilością powietrza, długością, średnicą rurociągu i rodzajem stosowanego materiału.

4.3. Straty ciśnienia dla przepływu zagęszczonego

Projektowanie instalacji o takim przepływie wymaga uwzględnienia w obliczeniach ściśliwości powietrza, tarcia materiału na skutek uderzeń przy mniejszych zagęszczeniach $\mu = 20-80$ lub tarcia posuwistego i zjawiska rozpierania przy większych zagęszczeniach $\mu > 80$. Równania wyjściowe opisujące przepływ zagęszczonego strumienia uzyskuje się z warunku równowagi sił działających na materiał i powietrze:

$$AC_V dp + W = G_S \sin \alpha + M_S \frac{dv_S}{dt} + F_{sr} + F_{ps} \quad (17)$$

$$A(1 - C_V) dp - W = G_P \sin \alpha + M_P \frac{dv_P}{dt} + F_{pr}$$

gdzie:

$$W = (1 - C_V) Adp_{ps} \approx Adp$$

$$F_{sr} = \mu_R (G_S \cos \alpha + p_{ws} A_{sc}) + Adp_{sr}$$

$$F_{pr} = M_P \lambda_P \frac{v_P^2}{2D} = A_P dp_{rp}$$

$$F_{ps} = - Adp_s$$

$$p_{ws} = \frac{p_s}{\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \varphi \right)}$$

Ruch strumienia powietrza z dużą ilością cząstek stałych wymaga uwzględnienia w obliczeniach ściśliwości powietrza. W tym celu przyjmijmy, że mamy do czynienia w rurociągu z przemianą politropową, którą opisuje równanie:

$$\frac{p_p}{p_{p2}} = \left(\frac{p}{p_2} \right)^{1/n} \quad \text{lub} \quad \frac{v_{p2}}{v_p} = \left(\frac{p}{p_2} \right)^{1/n}, \quad (18)$$

gdzie indeks 2 oznacza stan na końcu rurociągu przy ciśnieniu $p_2 \approx p_{ot}$.

Stosując wcześniejszą zależność na straty ciśnienia przy przepływie powietrza w rurociągu:

$$\frac{dp_{pr}}{dl} = \lambda_p \frac{1}{D} \frac{v^2 \rho_p}{2}$$

i wykorzystując związki (18) oraz warunek zachowania ciągłości masy strugi można napisać:

$$\int_{p_2}^{p_1} F_{pr}^{1/n} dp_{pr} = \frac{\lambda_p}{2D} \frac{\dot{M}_p^2}{A^2 \rho_p} p_2^{1/n} \int_{l_2}^{l_1} dl$$

po całkowaniu i przekształceniach otrzymuje się następujący wzór:

$$\Delta p_{pr} = p_2 \left\{ \left[1 + \frac{n+1}{n} \cdot \lambda_p \frac{\dot{M}_s^2 \Delta l}{2\mu^2 A^2 \rho_{p2} D p_2} \right]^{\frac{n}{n+1}} - 1 \right\} \quad (19)$$

Dla $n = 1$, czyli przemiany izotermicznej, wzór ten sprowadza się do postaci (1).

Podczas pneumatycznego transportu o wielkości strat ciśnienia decydują także straty na przyspieszenie transportowanego materiału. Straty te można wyznaczyć korzystając z wcześniejszych równań (8a) i (18):

$$\Delta p_s = p_2 \left\{ \left[1 + \frac{n+1}{n} \frac{\dot{M}_s^2 \Delta \left(\frac{v_s}{v_p} \right)}{\mu A^2 \rho_{p2} p_2} \right]^{\frac{n}{n+1}} - 1 \right\} \quad (20)$$

Straty ciśnienia na pokonanie oporu tarcia cząstek o ścianki, przy założeniu, że mamy do czynienia nadal z rozproszonym ruchem pojedynczych ziaren, można określić ze wzoru:

$$\Delta p_{sr} = p_2 \left\{ \left[1 + \frac{n+1}{n} \lambda_z \frac{\dot{M}_s^2 \Delta L}{2\mu A^2 p_2 D p_2} \right]^{\frac{n}{n+1}} - 1 \right\} \quad (21)$$

Straty ciśnienia związane ze zmianą wysokości położenia można opisać podobną zależnością jak wzór (10), przy czym wzór należy zapisać w postaci różniczkowej:

$$\Delta p_h = \mu \frac{v_p}{v_s} A \rho_{p_2} g d h \quad (22)$$

We wzorze (22) wielkości takie jak prędkość cząstek stałych i powietrza nie są stałe, a zmieniają się wzdłuż rurociągu. W celu wykonania obliczeń musimy przyjąć następujące założenie:

$$\frac{v_p}{v_s} = \frac{v_{p2}}{v_{s2}} = \dots = \text{const}$$

Wtedy korzystając z warunku (18) i po scałkowaniu równania (22) otrzymujemy dla $n > 1,0$

$$\Delta p_h = p_{1h} - p_2 = p_2 \left\{ \left[1 + \frac{n-1}{n} \mu \frac{v_{p2}}{v_{s2}} \frac{\rho_{p2} g}{p_2} \Delta h - 1 \right] \right\} \quad (23)$$

i dla $n = 1$

$$\Delta p_h = p_{1h} - p_2 = p_2 \left[\exp \left(\mu \frac{v_{p2}}{v_{s2}} \frac{\rho_{p2} g}{p_2} \Delta h \right) - 1 \right] \quad (23a)$$

Straty ciśnienia przy przepływie przez zakrzywienia można określić korzystając ze wzoru (12) w postaci różniczkowej i warunków (18). Po scałkowaniu otrzymuje się:

$$\Delta p_k = k \Delta p_s \quad (24)$$

Straty miejscowe wyrażają się wzorem:

$$\Delta p_m = \xi \frac{\dot{M}_s^2}{2 \mu^2 A^2 \rho_{pm}} \quad (25)$$

Korzystając z wyżej podanych zależności (19-21, 23-25) można wyznaczyć wielkość sumarycznych strat ciśnienia przy przepływie zagęszczonym. Do określenia strat niezbędna jest znajomość stosunku prędkości cząstek stałych do prędkości powietrza $\frac{v_s}{v_p}$ oraz współczynnika oporu λ_z .

Pisząc podobnie jak poprzednio równanie równowagi sił, można po matematycznych przekształceniach i korzystając z wyników doświadczeń [3] napisać następującą zależność na określenie współczynnika oporu cząstek stałych λ_z :

$$\lambda_z \frac{P_2}{\mu \rho_{p2} \Delta L g} = 2 \frac{n}{n+1} \left(\frac{P_2}{\mu \rho_{p2} \Delta L g} \right)^2 \frac{1}{Fr^2} \left\{ \left[\frac{Fr}{P_2} \mu \rho_{p2} \Delta L g \frac{\epsilon^{4,65} \left(\frac{v_p}{v_s} - 1 \right)}{Fr} + 1 \right]^{\frac{n+1}{n}} - 1 \right\} \quad (26)$$

oraz zależność różniczkową na stosunek prędkości cząstek stałych do prędkości powietrza:

$$4,65 \left(\frac{v_p}{v_s} - v_s \right) - \frac{v_s^2}{2Dg} \cdot \lambda_z^* - \frac{w_s}{v_p} \frac{1}{\epsilon^{2,32}} = \frac{v_s}{g} \frac{dv_s}{dl} \quad (27)$$

Do rozwiązania równania (27) trzeba stosować metody iteracyjne. Obliczenia komplikują się jeszcze bardziej, jeżeli ma się do czynienia z przepływem w postaci korków lub z przepływem ze szczelnie wypełnionym przekrojem. Wtedy, jak już podano w równaniu (17), siłę oporu wyraża zależność uwzględniająca tarcie posuwiste, uderzeniowe i efekt bocznego parcia materiału. W uproszczonych obliczeniach, zwłaszcza przepływu w postaci korków, równanie (17) sprowadza się do postaci:

$$Adp = G_s (\sin \alpha + \mu_R \cos \alpha) \quad (28)$$

Korzystając z warunków ciągłości faz i zakładając przemianę izotermiczną otrzymuje się dla rurociągu poziomego:

$$\frac{dp}{p} = \frac{\mu_R g \mu dl}{RT_p \frac{v_s}{\epsilon v_p}} \quad (29)$$

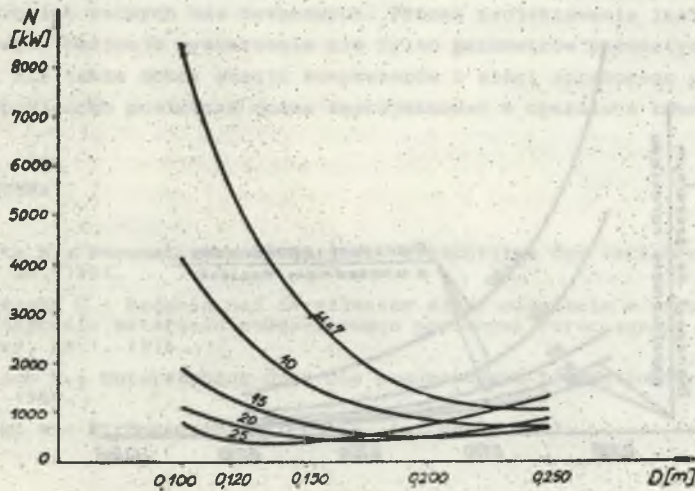
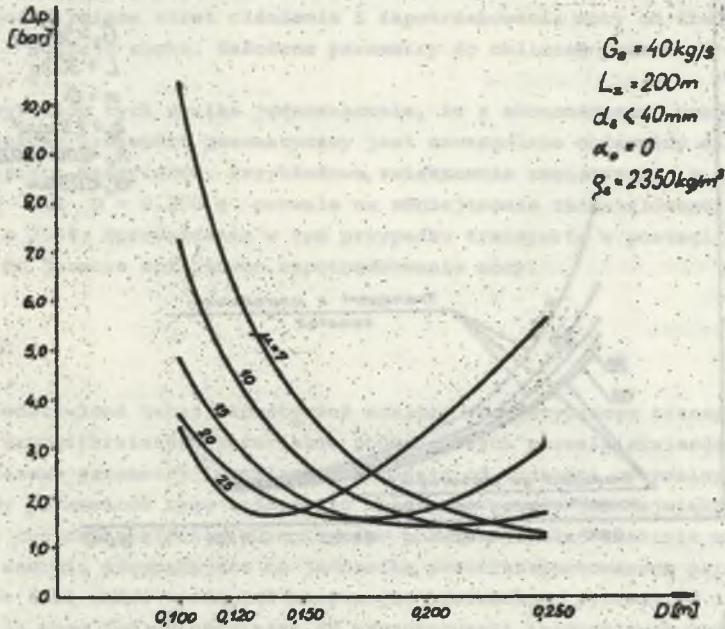
Doświadczenia wykazują, że w uproszczonych obliczeniach można przyjąć $\frac{v_s}{\epsilon v_p} \approx \text{const}$ i $\mu_R \approx \text{const}$, a wtedy po całkowaniu równania (29) uzyskuje się:

$$\Delta p_{sr} = P_2 \left\{ \exp \left(\mu_R g \mu L \frac{(1 - C_v) v_p}{RT_p v_s} \right) - 1 \right\} \quad (30)$$

gdzie:

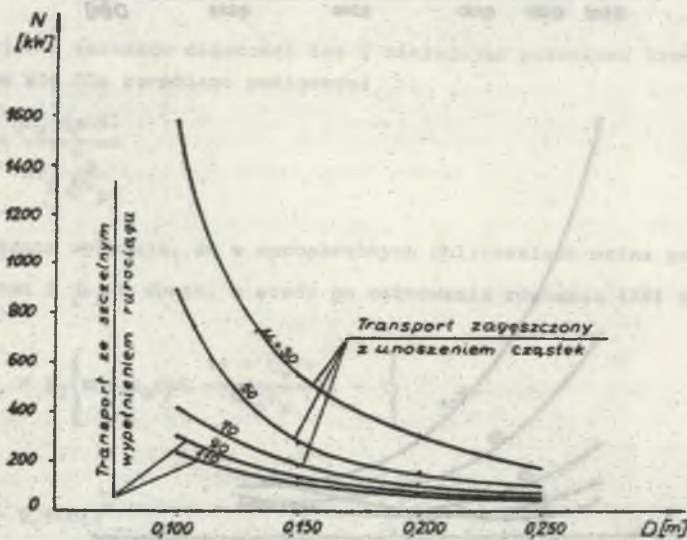
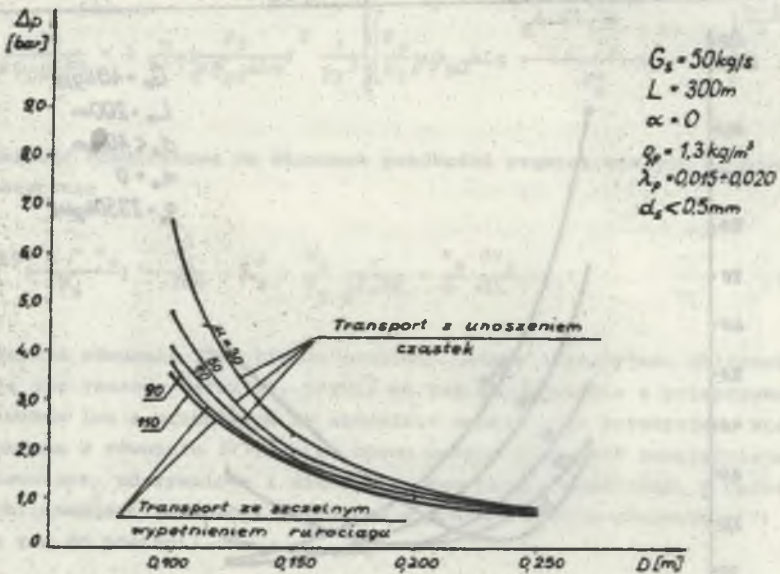
$$\mu_R = 0,5 \pm 0,7$$

$$\frac{v_s}{\epsilon v_p} = f \left(\frac{\rho_D}{\rho_s} \right) \quad \mu_R = f(\epsilon, v_s)$$



Rys. 5. Straty ciśnienia i pobór mocy w zależności od średnicy rurociągu przy transporcie materiałów gruboziarnistych (podsadzka pneumatyczna).

Fig. 5. Pressure losses and power consumption depending on the diameter of a pipeline while transporting coarse grain (pneumatic stowing)



Rys. 6. Straty ciśnienia i pobór mocy w zależności od średnicy rurociągu przy zagęszczonym transporcie popiołów lotnych

Fig. 6. Pressure losses and power consumption depending on the diameter of a pipeline while transporting concentrated volatile ashes

Korzystając z równań (16a), następnie (19-22 i 23-27) oraz wzoru (30) przeanalizujemy zmianę strat ciśnienia i zapotrzebowania mocy od średnicy rurociągu i rodzaju ruchu. Założone parametry do obliczeń podano na wykresach, rys. 5, 6.

Z wykresów tych wynika jednoznacznie, że z ekonomicznego punktu widzenia zagęszczony transport pneumatyczny jest szczególnie opłacalny dla drobnoziarnistych materiałów. Przykładowo, zwiększenie zagęszczenia z $\mu = 30$ do $\mu = 70$ dla $D = 0,200$ m pozwala na zmniejszenie zainstalowanej mocy sprężarek o 250%. Wprowadzenie w tym przypadku transportu w postaci korków prowadzi do jeszcze mniejszego zapotrzebowania mocy.

WNIOŚKI

Przedstawiona tutaj teoretyczna analiza pneumatycznego transportu drobno- i gruboziarnistych materiałów podsadzkowych pozwala stwierdzić, że dotychczasowe parametry instalacji odbiegają od wartości optymalnych. W celu poprawy parametrów tego transportu należy stosować jak największe zagęszczenie cząstek stałych w rurociągu, co pozwala uzyskać znacznie mniejsze zużycie energii przypadające na jednostkę przetransportowanego materiału. Wniosek taki można wyciągnąć analizując szczegółowo wykresy (5 i 6). Podane równania mogą być wykorzystane do projektowania tradycyjnych instalacji podsadzkowych, jak i do projektowania pneumatycznego transportu pyłów dymnicowych lub suchych mas betonowych. Proces projektowania instalacji podsadzkowych obejmuje wyznaczenie nie tylko parametrów pneumatycznego transportu, ale także dobór stacji kompresorów i sieci sprężonego powietrza. Sieć sprężonego powietrza można zaprojektować w oparciu o równania (4-6):

LITERATURA

1. Barth W.: Pneumatische Förderung. Fortschritte der Verfahrenstechnik. CIT 26. 1954.
2. Palarski J.: Badania nad określeniem strat ciśnienia w pneumatycznym transporcie materiału podsadzkowego poziomymi rurociągami. Przegląd Górniczy, nr 1. 1975.
3. Rausch W.: Untersuchung über die pneumatische Dichtstromförderung. f-h. 12, 1966.
4. Weber M.: Strömungsfördertechnik. Karlsruhe 1973.

Recenzent: Doc. dr inż. Stanisław Ropski

Wpłynęło do Redakcji w lutym 1987 r.

Spis oznaczeń:

- A - przekrój rurociągu
 C - koncentracja objętościowa
 D - średnica rurociągu
 d - średnica ziarna
 e - podstawa logarytmu naturalnego
 F - siła
 G - ciężar
 g - przyspieszenie ziemskie
 h - wysokość
 k - współczynnik
 l, L - długość
 M - masa
 M - masowe natężenie przepływu
 n - wykładnik politropowy
 p - ciśnienie
 Q - objętościowe natężenie przepływu
 R - stała gazowa
 T - temperatura
 t - czas
 v - prędkość
 W - opór aerodynamiczny
 w_s - prędkość opadania materiału
 Δp - strata ciśnienia
 α - kąt nachylenia rurociągu
 ϵ - $1 - C_v$
 φ - kąt tarcia wewnętrznego materiału
 η - lepkość dynamiczna
 ξ - współczynnik
 λ_2 - współczynnik oporu ruchu cząstek zależny od parametrów ruchu
 λ_2^* - współczynnik oporu zależny od rodzaju materiału
 μ - stosunek masowych natężeń przepływu materiału do powietrza
 μ_R - współczynnik tarcia materiału o ścianki rurociągu
 g - gęstość
 F_r - liczba Frouda
 F_r^* - liczba Frouda odniesiona do cząstek materiału

Indeksy:

- 1, 2 - wielkość odnosi się do punktów początkowego i końcowego rurociągu
 h - położenie, wysokość
 n - warunki normalne
 p - powietrze
 r - rurociąg

s	-	cząstki stałe
z	-	zastępcza
ś	-	ścianka rury
ws	-	ciśnienie na ściankę
kop	-	ciśnienie w sieci kopalnianej pod ziemią
sieć	-	sieć
ot	-	otoczenie
u	-	unoszenia
m	-	miejscowa

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ЗАКЛАДКИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Резюме

В работе представлен теоретический анализ пневмотранспорта закладочного материала в трубопроводах. Обсуждены виды течений, вступающих в пневмотранспорте и охарактеризована установка.

Представлены расчётные уравнения сети сжатого воздуха и математические зависимости, разрешающие проектировать закладочные установки с конвекционным и загущённым течениями.

В заключении обосновано применение загущённого пневмотранспорта.

Применяемые в настоящее время в горной практике установки пневмотранспорта закладочного материала характеризуются длиной более 200 м и производительностью более 150 м³/ч, что позволяет учитывать в расчётах сжимаемость воздуха и потери энергии в следствии его расширения.

На основе полученных расчётов видно, что в особых случаях двукратное увеличение загущения твёрдых частиц в струе воздуха вызывает 2,5 кратное снижение употребляемой энергии.

Полученные уравнения могут послужить основой для проектирования пневмотранспорта дробленой пустой породы, дынной пыли и массы бетона.

THEORETICAL ANALYSIS OF TECHNOLOGY OF PNEUMATIC
STOWING IN COAL-MINES

S u m m a r y

The paper gives theoretical analysis of pneumatic transport of stowing materials in pipelines. Different kinds of flows in pneumatic transport are discussed and installations are characterized.

Equations for the network of compressed air and mathematical dependences for designing stowing installations with concentrated and floating flow are given.

The use of concentrated pneumatic transport is justified in Conclusions.

Pneumatic installations now used in the mining for transport of stowing materials are characterized by the length greater than 200 m and capacity over $150 \text{ m}^3/\text{h}$, which makes it necessary to take into account compressibility of air and energy losses caused by its decompression.

As a result of the carried out computations it has been stated that in particular cases twice as large concentration of solid particles in the air flow causes 2,5 times drop in energy consumption.

The derived equations can be used for designing pneumatic transport of crushed waste rock, fly-ashes and concrete.