

Zbigniew PIĄTKIEWICZ

Politechnika Śląska, Gliwice

ROZWÓJ TRANSPORTU RUROWEGO

Streszczenie. Podano rodzaje transportu rurowego, struktury przepływu materiałów sypkich i ich zakres zastosowań. Przedstawiony rozwój transportu rurowego uwzględnia zastosowania bieżące, koncepcje rozwiązań uniwersalnych łącznie z koleją pneumatyczną, służącą do przewozu pasażerów.

PIPING TRANSPORTATION DEVELOPMENT

Summary. There are given types of piping transportation, structures of loose material flows and the range of its application. The piping transportation development presented in this work takes into consideration the current applications and the universal resolution concepts including such like a pneumatic railroad for passengers.

1. Wprowadzenie

W świetle istniejących badań i aktualnych zastosowań w przemyśle transport rurowy jest stosowany do przenoszenia różnorodnych materiałów na krótkie i długie odległości. Transport rurowy ze względu na rodzaj napędu i przesyłania materiałów dzielimy na przenośniki pneumatyczne, pneumatyczno-pojemnikowe, hydrauliczne, hydrauliczno-pojemnikowe. Transport rurowy stanowi alternatywne rozwiązanie w porównaniu z innymi transportami. Przesyłanie materiałów w zamkniętych przewodach transportowych odznacza się następującymi własnościami: zabezpieczenie materiałów przed środowiskiem i środowiska przed materiałem transportowym, elastyczność prowadzenia trasy w zadanych warunkach, możliwość prostych połączeń do wielopunktowego pobierania i odbioru materiałów, bezpieczeństwo transportu w

przypadku zagrożenia wybuchowego i toksycznego, wysoki stopień niezawodności i współczynnika obciążenia oraz pełna automatyzacja transportu.

2. Transport pneumatyczny

Transport pneumatyczny to dwufazowy przepływ cząstek fazy stałej i gazu (zwykle powietrza) w przewodzie zamkniętym lub otwartym. Rodzaj transportu pneumatycznego zależy od wielkości ciśnienia gazu zasilającego i w przewodach transportowych, struktury (postaci), przepływu dwufazowego cząstek stałych i gazu oraz właściwości materiału transportowanego.

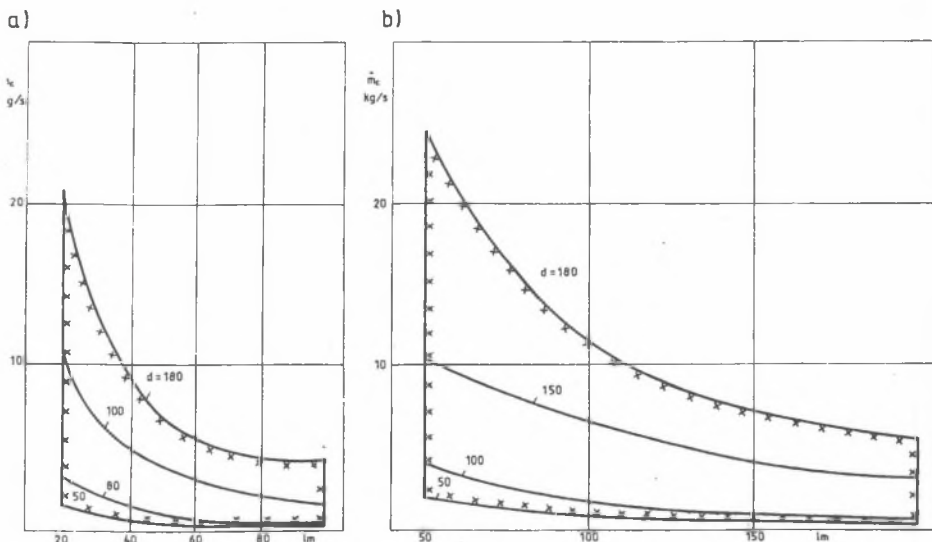
2.1. Rodzaje transportu (przenośników)

Przenośniki ssące (podciśnieniowe) praktycznie pracują przy podciśnieniu do 0,05 MPa. W związku z tym zakres ich zastosowań jest ograniczony do transportu materiałów suchych (zwłaszcza toksycznych), łatwo transportujących się, przy odległości transportu do 100 m (200 m), przy stężeniu masowym mieszaniny 4 - 10.

Przenośniki tłoczące (nadciśnieniowe) są zasilane powietrzem o sprężu do 0,8 MPa względu na wielkość stosowanych ciśnień rozróżnia się instalacje nisko-, średnio- i wysokociśnieniowe. Przenośniki niskociśnieniowe pracują przy sprężu $p_n < 0,02$ MPa, wytwarzanym przez wentylator wysokoprężny oraz średnociśnieniowe przy sprężu $0,02 < p_n < 0,08$ MPa, wytwarzanym przez dmuchawę. Przenośniki te są przystosowane do transportu materiałów sypkich łatwo transportujących się. Zależność wydatku masowego materiału (m_c) od odległości (l) i średnicy (d) instalacji transportu pneumatycznego, a - nisko-, b - średnio-ciśnieniowego podano na rys. 1.

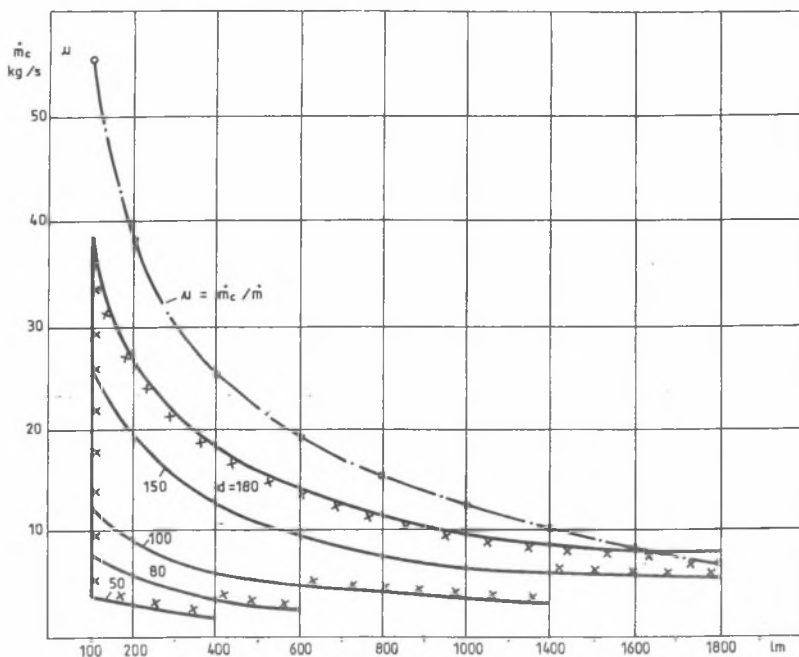
Przenośniki wysokociśnieniowe zasilane powietrzem o sprężu $0,3 < p_n < 0,8$ MPa, wytwarzanym przez kompresor, są stosowane do transportu materiałów sypkich, suchych i wilgotnych o średnicy frakcji ziarnowej nie przekraczającej 1/3 średnicy rurociągu transportowego. Zależność wydatku masowego materiału (m_c) od odległości (l) i średnicy (d) instalacji transportu pneumatycznego materiałów o gęstości rzeczywistej $\rho_c = 2,5 - 3,0$ Mg/m³ podano na wykresie rys. 2.

Współczesne rozwiązania urządzeń są stosowane do transportu materiałów na odległość do 3,0 km.



Rys. 1. Zależność wydatku masowego materiału (\dot{m}_c) od odległości (l) i średnicy (d) instalacji, a - nisko-, b - średniociśnieniowej

Fig. 1. Dependence between an expenditure of material's mass (\dot{m}_c) and a distance (l) and an installation diameter (d). a - low-, b - mid-pressure

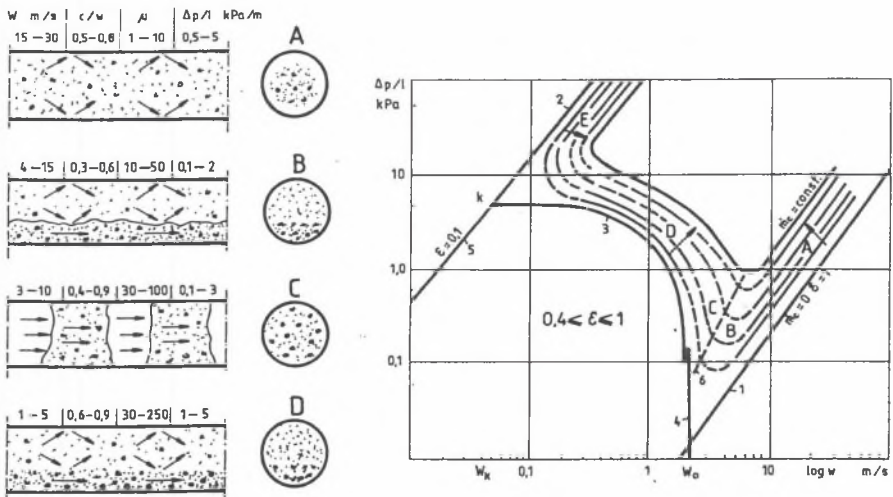


Rys. 2. Zależność wydatku masowego materiału (\dot{m}_c) od odległości (l) i średnicy (d) instalacji, transportu pneumatycznego wysokociśnieniowego

Fig. 2. Dependence between an expenditure of material's mass (\dot{m}_c) and a distance (l) and an installation diameter (d) in high-pressure pneumatic transportation

2.2. Struktura przepływu

Struktura przepływu dwufazowego cząstek stałych i gazu w przewodzie transportowym zależy przede wszystkim od prędkości przepływu obu faz, stężenia cząstek stałych w gazie i właściwości fizykochemicznych materiału transportowanego (rozmiar i kształt cząstek stałych oraz ich prędkość opadania). Do jakościowego opisu struktur (rodzajów) przepływu w układach transportu pneumatycznego stosuje się zależność między średnią prędkością gazu odniesioną do przekroju rurociągu ($w = \dot{V} / A$) a spadkiem ciśnienia gazu transportującego na jednostkę przewodu ($\Delta p / l$) rys. 3.



Rys. 3. Rodzaje przepływów transportu pneumatycznego materiałów sypkich o frakcji ziarnowej
Fig. 3. Types of pneumatic transportation flows of loose materials of a grain fraction

Przebieg krzywych dla transportu pneumatycznego pionowego (rys. 3) ma podobny charakter przy transporcie poziomym. Transport pneumatyczny jest możliwy w obszarze ograniczonym krzywymi 1, 2, 3, 4 (rys.3), uwarunkowanymi brakiem przepływu materiału ($\dot{m}_c = 0$). Poszczególne krzywe charakteryzują przebieg jednostkowych spadków ciśnień ($\Delta p / l$) przy przepływie gazu przez rurociąg pusty (krzywa 1), przez rurociąg całkowicie napełniony nieruchomym materiałem sypkim (krzywa 2), przez warstwę materiału fluidyzowanego (krzywa 3), przez rurociąg z prędkością (w_0) adekwatną prędkości opadania cząstek materiału (linia 4). Linia graniczna 5 wyznacza przebieg spadku ciśnienia na jednostkę wysokości warstwy nieruchomej (swobodnie rozpylonych cząstek materiału, $\epsilon \sim 0,4$) przy wzroście prędkości gazu fluidyzującego. Przy prędkości gazu w_k , zwanej prędkością krytyczną, następuje przejście warstwy nieruchomej materiału w warstwę fluidalną. Cechą charakterystyczną warstwy fluidalnej jest prawie stały spadek ciśnienia przy wzroście prędkości gazu fluidyzującego. Przy

dalszym wzroście prędkości gazu stężenie warstwy fluidalnej maleje, a spadek ciśnienia przypadający na jednostkę wysokości warstwy maleje zgodnie z krzywą 3. Gdy prędkość gazu zrówna się z prędkością swobodnego opadania cząstek (w_0) powstaje stan graniczny, w którym kończy się fluidyzacja ($\epsilon = 1$). W zależności od stężenia cząstek w strumieniu gazu różni się następujące rodzaje przepływów (rys. 3): A - z unoszeniem fazy rozproszonej, B - warstwowy, C - porcjowy, D - fluidalny, E - przetwarzający.

Przepływ A z unoszeniem fazy rozproszonej cząstek stałych występuje przy dużych prędkościach strumienia gazu $w = 20 - 40$ m/s i z tym związanymi stratami ciśnienia na jednostkę długości rurociągu transportowego w granicach $\Delta p/l = 0,1 - 1,0$ kPa/m, przy stosunku prędkości obu faz $c/w = 0,5 - 0,8$ i masowej koncentracji mieszaniny $\mu = 1 - 10$. Cząsteczki stałe lub ich zbiory unoszone są w strumieniu gazu ze zwiększonym na ogół nagromadzeniem ich w środkowej części strumienia. Cząsteczki znajdują się w ruchu chaotycznym, zderzają się między sobą i o wewnętrzne powierzchnie rurociągu transportowego.

Przepływ B warstwowy fazy stałej występuje przy mniejszych prędkościach strumienia gazu $w = 15 - 30$ m/s oraz większych spadkach ciśnień $\Delta p/l = 1 - 2$ kPa/m. Stosunek prędkości obu faz wynosi $c/w = 0,3 - 0,6$, a masowa koncentracja $\mu = 5 - 50$. Zmniejszone prędkości gazu wywołują rozwarstwienie strumienia fazy stałej. W części dolnej przekroju rurociągu cząsteczki stałe tworzą warstwę przepływającą ruchem poślizgowym, a w górnej cząsteczki przepływają w stanie fazy rozproszonej.

Przepływ C porcjowy fazy stałej przy prędkościach gazu $w = 5 - 15$ m/s, spadku ciśnienia $\Delta p/l = 1 - 2,5$ kPa/m, stosunku prędkości obu faz $c/w = 0,6 - 0,9$ i masowym stężeniu mieszaniny $\mu = 30 - 100$. Istotą przepływu jest tworzenie i ruch porcji materiału wzdłuż rurociągu transportowego pod działaniem sił powierzchniowych ciśnienia gazu. Przepływ porcjowy charakteryzuje się występowaniem ruchomych porcji materiału wypełniających cały przekrój rurociągu, rozdzielonych pęcherzami (komorami) strumienia gazu.

Przepływ D fluidalny w przewodach zamkniętych i otwartych to ruch fazy stałej upłynniającej strumieniem przepływającego gazu. Przepływ fluidalny występuje przy małych prędkościach obu faz w granicach $2 - 6$ m/s oraz dużym stężeniu objętościowym cząstek materiału $\epsilon_c = 0,35 - 0,50$.

3. Transport pneumatyczny - pojemnikowy

Transport pneumatyczny pojemnikowy to przenośnik pneumatyczny służący do transportowania materiałów (przedmiotów) w pojemnikach wewnątrz przewodów. Ruch pojemnika wewnątrz rurociągu transportowego jest wymuszony przez wytwarzanie różnicy ciśnień przed i za pojemnikiem. Nowoczesne systemy pracują przy nadciśnieniu do 100 kPa (najczęściej 20 - 40 kPa). Pojemniki są na każdym końcu wyposażone w wózki wielokołowe oraz specjalne kołnierze uszczelniające. W celu uzyskania optymalnej wydajności transportowania pojemniki są łączone ze sobą sprzęgłami w zespoły (6 - 14 pojemników) i tworzą rodzaj pociągu. Prędkość transportu pojemników wynosi najczęściej 30 - 45 km/godz. Rurociągi transportowe o średnicy 1000 - 1600 mm są wykonane z rur stalowych (spawanych) lub łączonych kołnierzami. Instalacje w zależności rodzaju materiału transportowanego (sypki - piasek, żwir, tłuczeń oraz kruszywa, odpady komunalne), zadanej wydajności (2 - 10 mln Mg/rok) oraz odległości transportu (2 - 10 km) są wykonywane w wariantach jedno-, dwu- i wielorurowym. Operacje związane z za- i rozładunkiem pojemników jak również sterowaniem ich ruchu są zautomatyzowane i kontrolowane z centrali dyspozytora. Najdłuższa instalacja „Lito 2”, zabudowana w Rosji, transportuje piasek, żwir, tłuczeń itp. rurociągiem o średnicy 1220 mm na odległość 49 km. Instalacja wyposażona jest w 25 pociągów, a każdy pociąg składa się z 8 pojemników o długości 3,5 m i średnicy 1000 mm. Łączna ładowność pociągu ok. 36 Mg. Instalacja pracuje przy ciśnieniu max 40 kPa i posiada 10 stacji urządzeń wspomagających, z których każda zużywa ok 250 kW. Prędkość pojemników (pociągów) wynosi ok. 45 km/godz. Wydajność instalacji 2 mln. Mg/rok. Charakterystyczną cechą transportu pneumatycznego-pojemnikowego jest niski pobór mocy (0,3 - 0,8 kWh/Mg km), zdolność pracy prawie w każdym terenie i w dowolnych warunkach klimatycznych.

4. Transport hydrauliczny

Transport hydrauliczny to dwufazowy przepływ cząstek fazy stałej i cieczy (zwykle wody) w przewodzie zamkniętym lub otwartym. Jest szeroko stosowany do transportu różnorodnych materiałów (węgiel, żwir, ruda żelaza i złota, siarkę, wapno itp.) na odległości przekraczające 600 km, przy wydajności 16 mln Mg/rok. Ekonomiczność i poprawność działania transportu hydraulicznego jest związana z potrzebą przygotowania ciał stałych do transportowania i od-

bioru. Konieczne jest rozdrabnianie materiału (najkorzystniej na proszek) i jego odwodnienie na końcu procesu technologicznego. W zależności od rodzaju transportowanego materiału płyn nośny (woda), często zanieczyszczony, wymaga odpowiedniego przygotowania. Zastosowanie transportu hydraulicznego jest warunkowane dostępnością wody.

Transport hydrauliczny pojemnikowy. Dotychczasowe pozytywne wyniki badań nie zostały wprowadzone do przemysłu. W transporcie hydraulicznym pojemniki są unoszone w płynie nośnym i nie wymagają stosowania kół (wózków). Pojemniki te muszą być wodoszczelne, a związane z tym stacje nadawania i odbioru pojemników są rozwiązaniami złożonymi.

5. Tendencje rozwoju

Badania transportu rurowego najczęściej mają na celu wzrost wydajności instalacji oraz niezawodności i ekonomiczności pracy. Transport rurowy przyszłości to nie tylko transport różnorodnych materiałów sypkich ale również przedmiotów i ludzi. W czasie transportu realizowane są operacje technologiczne, a różne środki transportu ze sobą współdziałają.

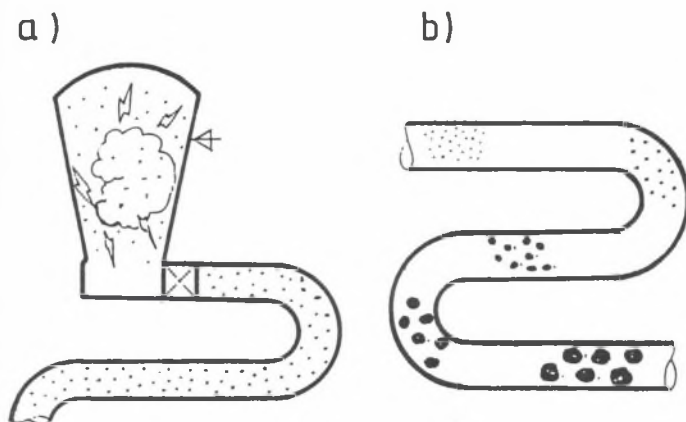
5.1. Transport pneumatyczny o wysokim stężeniu energii

Zbadano możliwości transportu pneumatycznego węgla sproszkowanego w gazie węglowym. Wyniki badań umożliwiają projektowanie transportu pneumatycznego węgla sproszkowanego wysokoenergetycznego na odległość do 500 km. Gazem nośnym jest gaz węglowy, otrzymywany przez gazyfikację i oczyszczanie węgla niższego gatunku. Instalacje tego typu są wyposażone w stacje pośrednie, w których węgiel i gaz są rozdzielone. Gaz węglowy jest ponownie wykorzystywany w transporcie. W celu ograniczenia wzrostu prędkości transportowej przyjęto stopniowanie średnic rurociągu z 250 do 750 mm na długości 50 km. Gaz zasilający jest sprężany do 8,4 MPa i rozprężany do 3,5 MPa przed dekompresją na stacji pośredniej lub końcowej. Wydajność projektowa instalacji wynosi 1,33 kg/s. Zaproponowane rozwiązanie instalacji transportu pneumatycznego węgla sproszkowanego wraz z gazem węglowym dostarczy wysokoenergetycznego paliwa zdolnego zasilać 1000 MW elektrownię.

5.2. Operacje technologiczne w czasie transportu

Badania prowadzono w instalacjach składających się z komory ciśnieniowej (dozownika), wprowadzającej materiał do rurociągu transportowego. Wzrost ciśnienia w komorze dozownika, w zależności od rodzaju materiału, powstaje w wyniku zainicjowania reakcji fizycznej,

chemicznej, biochemicznej lub ich kombinacji. W instalacji pneumatycznej wzrost ciśnienia w komorze podajnika może powstać w wyniku reakcji chemicznej zainicjowanej (np. parą wodną) lub eksplozją wytworzonej mieszanki wybuchowej (rys. 4a).



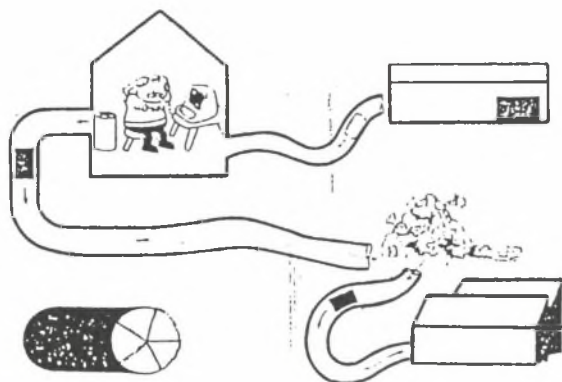
Rys. 4. Schemat instalacji reaktorowej
Fig. 4. Reactor's installation scheme

Przykładem łączenia operacji transportowej i technologicznej jest chemiczna obróbka wody odpadowej z linii ściekowej (rys. 4b). Najczęściej prędkość przepływu szlamu wynosi 1,5 m/s, a stosowane długości linii transportowej 40 - 160 km, co określa czas chemicznej obróbki na ok. 30 h.

5.3. Transport pneumatyczny dla potrzeb domu

Rozważana jest koncepcja transportu pojemnikowego dla potrzeb domu mieszkalnego, a ściślej dostarczania towarów i mniejszych przedmiotów gospodarstwa domowego oraz usuwania odpadów komunalnych.

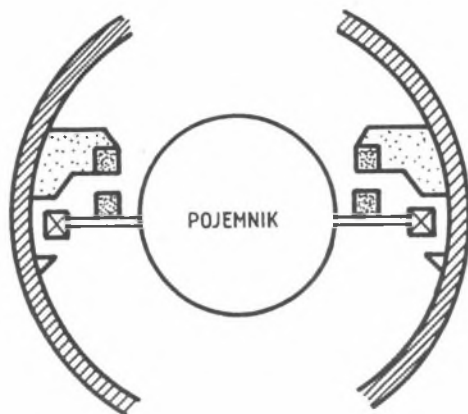
Proponuje się instalowanie w domu systemu video, za pomocą którego można dokonywać zakupów. W sklepie odpowiednio zapakowany i zakodowany pojemnik jest wysyłany do domu odbiorcy. System transportu pojemnikowego może spełniać funkcje usuwania domowych odpadków. Pojemnik podzielony wewnątrz na różne odpady (roślinne, papierowe, blaszane, plastikowe itp.) jest kierowany do centralnego wysypiska śmieci. Kontrola komputerowa daje pełną elastyczność wyboru trasy.



Rys. 5. Transport pneumatyczny pojemnikowy
 Fig. 5. Container-type pneumatic transportation

5.4. Transport pojemników unoszonych w polu magnetycznym

W transporcie pneumatycznym pojemnikowym koła nośne pojemników ze względu na małe wielkości, duże prędkości obrotowe i obciążenie jednostkowe stanowią najłabszy węzeł przenośnika. Stąd propozycje rozwiązań unoszenia pojemnika w polu magnetycznym, wykorzystujące zjawisko odpychania się biegunów jednoimiennych (rys. 6).

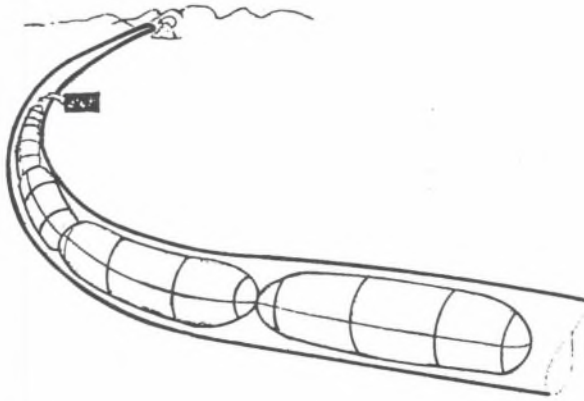


Rys. 6. Pojemnik unoszony w polu magnetycznym
 Fig. 6. Container floated in a magnetic field

Projekt instalacji tego typu opracowano dla potrzeb transportu węgla i żwiru o wydajności 10 mln Mg/rok. Do napędu pojemników zaproponowano zastosowanie liniowych silników indukcyjnych.

5.5. Transport hydrauliczny w pojemnikach plastikowych

Istota rozwiązania polega na zastosowaniu długich, smukłych pojemników plastikowych, napełnianych materiałem transportowym. (rys. 7).



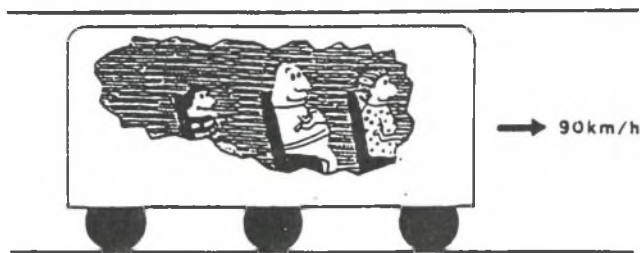
Rys. 7. Transport w pojemnikach plastikowych
Fig. 7. Transportation in the plastic containers

Pojemniki są łączone razem i tworzą ciąg transportowy unoszony i przemieszczany hydraulicznie w rurociągu transportowym. Materiał zamknięty w pojemnikach plastikowych jest wolny od zanieczyszczeń płynu transportującego. Instalacje tego typu proponowane są do transportu na duże odległości (najczęściej podmorskie) przy średnicy rurociągu transportowego 900 i długości 4 m pojemnika plastikowego.

5.6. Kolej pneumatyczna

W 1864 r. w Wielkiej Brytanii w londyńskim Pałacu Kryształowym zabudowano kolej pneumatyczną o napędzie próżniowo-ciśnieniowym dla przewozu ludzi i towarów. Kolej kursowała na trasie o długości 400 m, w tunelu o średnicy 3m. Podstawowe przeszkody w rozwoju kolei pneumatycznej wynikały z zastosowań dużych średnic tuneli nośnych oraz mało sprawnych urządzeń. Przedstawiono propozycję rozwiązania przenośnika pneumatycznego rurowego pojemnikowego dla przewożenia pasażerów na 20 km odcinku pod Moskwą.

Przewidywana prędkość przewozu ludzi (pojemników) 90 km/godz. Zastosowany system kontroli komputerowej daje możliwość pełnej elastyczności trasy. Transport pneumatyczny kolejowy jest wolny od zanieczyszczeń i ma stacjonarny napęd pneumatyczny.



Rys. 8. Kolej pneumatyczna
Fig. 8. Pneumatic Railroad

6. Wnioski

Ostatnie lata przyniosły szeroki rozwój transportu rurowego w różnorodnych dziedzinach przemysłu. Stosowane instalacje są w pełni zautomatyzowane, komputerowo sterowane oraz dostosowane do różnych specjalnych procesów technologicznych, a często do realizacji tych procesów w czasie transportu. W świetle zaostżenia kryteriów odpowiedzialności w transporcie kolejowym należy oczekiwać w niedalekiej przyszłości, że kolej pneumatyczna do przewozu ludzi będzie akceptowanym środkiem transportu.

LITERATURA

1. Piątkiewicz Z.: Transport pneumatyczny. Poradnik inżyniera „Odlewnictwo”, t II, rozdz. XX, Warszawa 1986.
2. Piątkiewicz Z. i inni : Wyniki badań transportu pneumatycznego wysokociśnieniowego materiałów sypkich, ZN Pol. Śl., s. Transport z. 66, ss. 66-88, Gliwice.
3. Marcus A.D., The Three Phase of Freight Pipeline Development. Pneumatic Conveying o Bulk, Volume 3, November 1983.

Recenzent: Prof. dr hab. Zdzisław Samsonowicz

Abstract

This research work presents stages of the pneumatic and the hydraulic piping transportation development. Results of pneumatic conveyors tests for low-, mid-, and high pressure devices are shown in the form of dependence's between an expenditure of material's mass and a distance and a pneumatic transportation installation diameter. There is recorded a diagram which shows the dependence between a pressure loose and a conveying gas speed in the pneumatic transportation. The most often used types of flows are shown on that diagram (flow with floated dissipated phase, laminar flow, portion flow and fluidised flow) and their technical characteristics. The next stage of the transportation development is a hydraulic and a pneumatic transportation applied to conveying materials or objects closed in containers which are relocated inside the conduits. A sequence of tendencies in the piping transportation development are presented in a form of resolutions' samples concerning such cases like: the pneumatic transportation of a great energy density, the pneumatic and hydraulic transportation with simultaneously proceeding technology operations, the pneumatic transportation for dwelling-houses purposes, the pneumatic transportation in closed containers floated in the magnetic field, the hydraulic transportation in the closed plastic containers and the pneumatic railroad for passengers. Last part of the present research work contains conclusions.