

Zbigniew Korzeń

Paweł Zajac

Logistyczne technologie pneumatycznego za- i rozładunku statków i barek – kierunki badań rozwojowych

Analiza światowych trendów rozwojowych obserwowanych w obszarach mechanicznej inżynierii materiałów ziarnistych jednoznacznie wykazuje, że gwałtownie wzrasta zainteresowanie technologiami pneumatycznymi, określanymi również mianem tzw. technologii „suchych”. Stwierdzenie to dotyczy głównie tych zagadnień związanych z problematyką pneumatycznego przeładunku i transportu materiałów ziarnistych o specyficznych cechach fizyko – mechanicznych i silnej skłonności do pylenia. Natomiast rozwój nowych, efektywnych technologii pneumatycznego przeładunku i transportu bliskiego materiałów ziarnistych jest w znaczący sposób uzależniony od postępów w mechanice procesów powietrzno – strumieniowych i siłą rzeczy łączy się z koniecznością realizacji zaawansowanych badań eksperymentalnych w tym zakresie.

Znane obecnie tradycyjne technologie przewozu i przeładunku w transporcie morskim i śródlądowym wynikają z podstawowego podziału ładunków na masowe i drobnicowe. Wzrastające obroty towarowe drogą wodną oraz postęp techniczny w transporcie przesądziły o zmianach technologii ich przewozów i przeładunków, odejściu od, np. pracochłonnych i czasochłonnych tradycyjnych metod przeładunków bezpośrednich w kierunku usprawniania przeładunków pośrednich, konwencjonalnych, z zastosowaniem systemów: pneumatycznego, hydraulicznego i przeładunków w kontenerach. Ładunki masowe (m.in. surowce przemysłowe, energetyczne, budowlane, prefabrykaty, zboże luzem, nawozy itp.) przewożone są najczęściej w dużych partiach całostatkowych. Wyodrębnienie ładunku jednostkowego i niepodzielonego w procesie przewozu i przeładunku jest w tym przypadku praktycznie niemożliwe. W przewozie ich znajdują zastosowanie statki uniwersalne – masowce lub specjalizowane, np. zbiornikowce, drewnowce, rudowce,

rudoropowce itd., a w przeładunku portowym urządzenia pracujące w ruchu ciągłym (potokowym): przenośniki taśmowe, urządzenia pneumatyczne, rurociągi, elewatory zbożowe, urządzenia hydrauliczne (metoda Marconaflo).

Wśród najnowszych rozwiązań technologicznych przewozu ładunków masowych występuje tendencja do ich niekonwencjonalnego przemieszczania w specjalistycznych kontenerach. Najczęściej stosowane są:

- kontenery – pudła bez górnej pokrywy, otwarte lub zabezpieczone brezentowym pokrowcem
- kontenery – barki
- kontenery – cysterny.

Zasady transportu i przeładunku ładunków masowych

Istotnym czynnikiem decydującym o sferze zastosowania transportu wodnego śródlądowego i morskiego są: duża nośność, masowość i przestrzenność. Nośność typowej barki, eksploatowanej w warunkach europejskich, wynosi 1350-1500 t. Możliwość formowania zestawów złożonych z kilku barek (zwana masowością) pozwala na przewóz jednorazowo dużych partii ładunkowych. Oferowana masowość transportu wodnego jest zróżnicowana i w zależności od parametrów drogi wodnej waha się od kilku do kilkunastu tysięcy ton (a nawet kilkudziesięciu w wyjątkowo korzystnych warunkach); jest jednak wielokrotnie większa niż pozostałych gałęzi transportu lądowego.

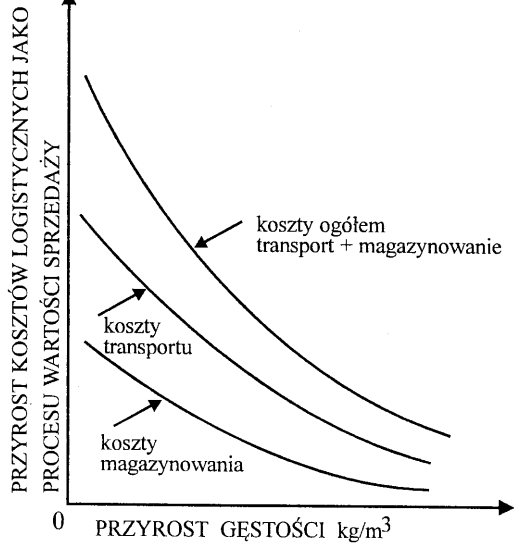
W transporcie i przeładunku materiałów sypkich istotny jest ciężar właściwy produktu, wyrażany stosunkiem ciężaru ciała do jego objętości, który jest ściśle związany z podstawami magazynowania i transportu. Gęstość lub masa właściwa jest wielkością stałą dla każdego ciała i wyraża się stosunkiem masy ciała do objętości. W magazynowaniu i transporcie znajomość gęstości służy do pośredniego określenia masy ładun-

ku płynnego (sypkiego). Z punktu widzenia obsługi w systemie logistycznym istotne są dwa pojęcia gęstości:

1. Gęstość względna, którą charakteryzują się produkty o nieregularnych kształtach oraz ciecze i gazy. Gęstość względna to stosunek gęstości bezwzględnej danego ciała do gęstości bezwzględnej drugiego ciała przyjętej jako wzorzec.
2. Gęstość nasypowa, która oznacza stosunek masy zajmowanej przez ciała stałe występujące w formie kawałków do objętości, które to ciała zajmują. Należy zaznaczyć, iż gęstość nasypowa – zwłaszcza w odniesieniu do ubikwiteków jako produktów logistycznych – charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem.

Gdy gęstość produktu logistycznego wzrasta, koszty transportu i magazynowania, jako procent wartości sprzedaży – maleją.

Jest więc zasadnym dobre wykorzystanie przestrzeni ładunkowych. W przypadku materiałów sypkich chodzi oczywiście o wypełnienie nim ładowni lub zbiorników z wykorzystaniem miejsc niedostępnych przy konwencjonalnym załadunku towarów o większych wymiarach. Zawsze jednak „od góry” pozostaje pewna część wolnej przestrzeni niezbędnej dla kompensacji rozszerzalności albo związanej z równowagą sił pomiędzy drobinami stałymi, czyli z tzw. kątem zasypu. Ładunki sypkie tworzą mniej lub bardziej regularne stożki, pryzmy i kopce na płaszczyznach. Wypełniają one dolną część ładowni (pojemnika) w sposób zbliżony do cieczy, ze szczelinami i komorami powietrznymi tym większymi, im większe są przeciętne wymiary elementów. Natomiast w górnej części ładowni układają się one w postaci wzniesień nasypowych o pochyleniach nie przekraczających kąta usypu. Wielkość tego kąta ma związek z wymiarami i ciężarem elementów ładunku, jego wilgotnością oraz siłami tarcia występującymi pomiędzy tymi elementami. Naturalny kąt usypu jest rów-



Rys. 1. Wpływ gęstości produktu logistycznego na koszty logistyczne [14].

niez większy w warunkach statycznych niż w wypadku występowania wstrząsów. W rzeczywistości ani magazyny, ani ładownie statków nie mogą być wykorzystane przy wypełnianiu ich jednostkami ładunkowymi w sposób porównywalny z wykorzystaniem uzyskanym przez wypełnianie ładunkiem upłynnionym.

Ogólna charakterystyka procesowa przepływów dwufazowych w transporcie pneumatycznym materiałów ziarnistych

Z procesami powietrzno – strumieniowymi mamy wówczas do czynienia, gdy materiał ziarnisty jest z określoną prędkością niesiony w ukierunkowanym strumieniu powietrza. Procesy te stanowią podstawę fizyczną dla rozwoju transportu pneumatycznego typu pionowego, ukośnego i poziomego. Punktem wyjścia w projektowaniu każdego z trzech wyróżnionych rodzajów transportu pneumatycznego jest tzw. koncentracja μ , czyli stosunek ilości niesionego materiału ziarnistego do ilości przepływającego powietrza: (1)

$$\mu = \frac{q_m}{q_p}$$

q_m wydatek masowy przepływu strumienia materiału ziarnistego, $[\frac{kg}{s}]$

q_p wydatek masowy przepływu strumienia powietrza, $[\frac{kg}{s}]$

Jest to parametr, którego wartości są ustalane doświadczalnie i decyduje w znacznym stopniu o charakterze przepływu oraz zużyciu energii. Wartość koncentracji zależy przede wszystkim od długości drogi przenoszenia l [m], gęstości usypowej ρ_m $[\frac{kg}{m^3}]$, własności plastycznych przenoszonego materiału ziarnistego oraz jego przepuszczalności powietrznej. W warunkach tłoczego transportu pneumatycznego ciśnienie Δp [Pa] powietrza roboczego, konieczne do przemieszczania materiału ziarni-

stego jest sumą dwóch składników:

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_r$$

(2) gdzie:

Δp_s składowa odpowiadająca statecznemu ciśnieniu fazy gazowej (powietrza roboczego)

Δp_r składowa potrzebna do pokonania oporów przepływu [Pa]

Składowa Δp_s w zależności (2) jest określana w oparciu o formułę:

$$\Delta p_s = l \rho_u g \quad (3)$$

gdzie:

$$\rho_u = \frac{q_m}{A \cdot V_m} \quad (4)$$

ρ_u - gęstość pozorna ziaren przenoszonych w strumieniu powietrza $[\frac{kg}{m^3}]$
 g - przyspieszenie ziemskie $[m/s^2]$

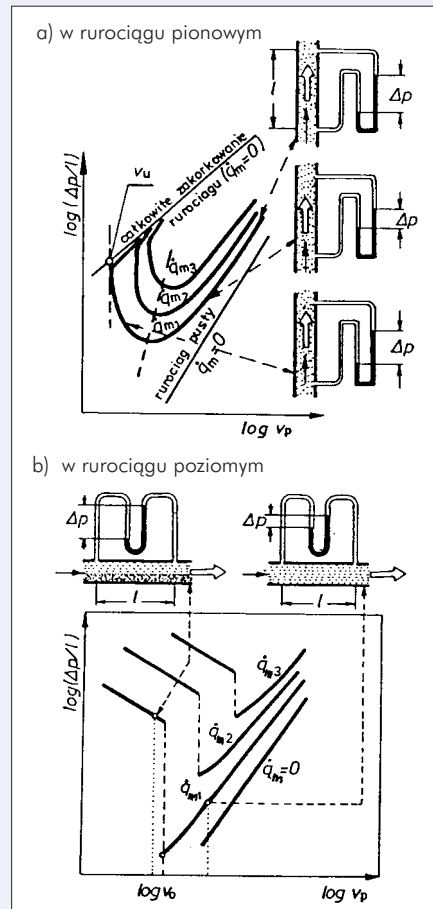
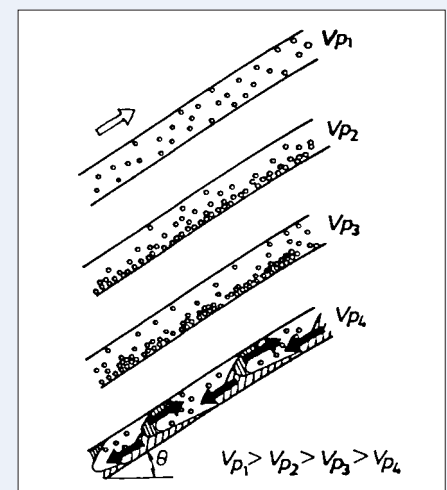
Natomiast miarodajne szacowanie składowej Δp_r wymaga już zaawansowanych studiów badawczych o charakterze eksperymentalnym.

Charakter zmienności $\log \frac{\Delta p}{l}$ w funkcji $\log V_p$ dla zróżnicowanych wydatków masowego przepływu ziaren q_m przedstawiono na rys. 1a, b.

Z rys. 1a wynika, że w odniesieniu do rurociągu pionowego:

- w obszarze większych prędkości strumienia powietrza znaczącą rolę odgrywa składowa oporu przepływu Δp_r i wtedy Δp wzrasta
- w obszarze małych prędkości strumienia powietrza dla poszczególnych natężeń przepływu ziaren $q_m < q_{m2} < q_{m3}$ występują zakłócenia (pulsacje) przepływu najpierw z tendencją do strefowego zalegania ziaren w rurociągu a w konsekwencji do jego całkowitego zakorkowania.

Na rys. 1a linia przerywana oddziela strefę tzw. transportu „łotnego” materiału ziarnistego w stanie rozproszonym od strefy

Rys. 2: Charakter zmienności stosunku $\Delta p/l$ od prędkości przepływu strumienia powietrza [7].

Rys. 3. Charakter przepływu ziarn niesionych w strumieniu powietrza w pochylonym rurociągu [7].

transportu „przesuwego” gdzie materiał ziarnisty jest gęsto upakowany i z niewielką prędkością przesuwany w postaci korków pionowych w górę. Zachowanie się ziaren podczas ich przepływu w strumieniu powietrza o zróżnicowanej prędkości V_p przez rurę nachyloną do poziomu pod kątem $\Theta=30^\circ\text{--}50^\circ$ ilustruje rys. 3.

W granicznym przypadku, gdy $\Theta=0$ mamy do czynienia z poziomym transportem pneumatycznym i zachowanie się ziaren w takich warunkach przepływu (przy postępującym spadku prędkości strumienia powietrza V_p) ilustruje rys. 1b.

Z rys. 1.b wynika, że w warunkach poziomego transportu pneumatycznego materiałów ziarnistych należy brać pod uwagę następujące przypadki:

- przy małej prędkości przepływu strumienia powietrza w części przekroju rurociągu zalega nieruchoma warstwa ziaren
- w miarę wzrostu prędkości strumienia powietrza nieruchoma warstwa ziaren ulega zmniejszaniu na skutek stopniowego wywiewania cząstek (zmniejszająca się warstwa materiału przyjmuje falisty kształt)
- dalszy wzrost prędkości strumienia powietrza prowadzi do całkowitego wywiania nieruchomej warstwy co objawia się prawie skokową zmianą warunków przepływu, (prędkość przepływu w tym punkcie określana jest prędkością startu V_0)
- po przekroczeniu prędkości startu V_0 następuje stopniowy wzrost Δp wywołany wzrostem oporu przepływu w rurociągu.

Na rys. 4 pokazano przypadek stacjonarnego, niestacjonarnego oraz quasi stacjonarnego przepływu ziaren. Przepływ quasi stacjonarny, określany również mianem „korkowy”, jest możliwy do uzyskania poprzez cykliczne zasilanie rurociągu impulsowym strumieniem powietrza. Złożoność fizycznej natury procesu przeniesienia materiałów ziarnistych w strumieniu powietrza spowodowała dużą różnorodność konstrukcyjnych rozwiązań układów transportu pneumatycznego.

Na rys. 5 zestawiono główne, znane obecnie technologie transportu pneumatycznego z jednoczesnym podaniem zakresu ich stosowalności w odniesieniu do wyróżnionych grup materiałów ziarnistych. Wyróżnione technologie są następujące:

- technologia transportu lotnego i wleczanego (a, b) realizowana na bazie dwufazowych przepływów stacjonarnych
- technologia transportu przesuwego (c, d) realizowana na bazie dwufazo-

wych przepływów niestacjonarnych

- technologia transportu korkowego (e, f, g, h) realizowana na bazie dwufazowych przepływów quasi stacjonarnych.

Wg Geldarta [3] zdolność przeniesienia ziaren polidispersyjnych przez strumień powietrza determinują w głównym stopniu dwa parametry:

- różnica masy właściwej ziarna i powietrza ($\rho_m - \rho_p$)
- przeciętna, najbardziej prawdopodobna średnica ziarna d_s (μm).

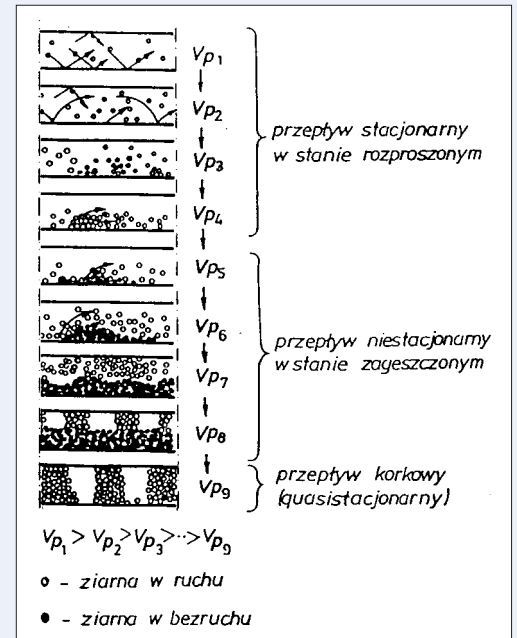
Tzw. „diagram Geldarta” a) przedstawiono na rys. 6.

Geldart dzieli materiały ziarniste pod kątem zdolności ich przenoszenia w strumieniu powietrza na cztery grupy:

- A – materiały ziarniste słabo kohezyjne i bezkohezyjne o słabej przepuszczalności powietrznej (wymagające intensywnej aeracji w fazie inicjacji przepływu dwufazowego)
- B – materiały ziarniste bezkohezyjne o przeciętnej przepuszczalności powietrznej (nie wymagające intensywnej aeracji)
- C – materiały ziarniste średnio i silnie kohezyjne, stwarzające w transporcie pneumatycznym duże trudności bądź też wcale nieprzydatne do tego typu transportu
- D – materiały ziarniste o wysokiej przepuszczalności powietrznej (wcale nie wymagające aeracji), wykazujące dużą podatność do transportu pneumatycznego.

Z dotychczasowego stanu wiedzy dotyczącej problematyki powietrzno-strumieniowych technologii transportu pneumatycznego (np. wg [1], [4], [5], [9]) wynika, że:

- procesy wiążące się z powietrzno-strumieniowym transportem materiałów ziarnistych w warunkach unoszenia oraz przesuwania porcji ziarna o dobrej i bardzo dobrej przepuszczalności powietrza (grupy C, D) są już w dość szerokim zakresie rozeznane i opisane miarodajnymi formułami zarówno typu analitycznego jak i empirycznego
- procesy wiążące się z powietrzno-strumieniowym „transportem przesuwym” materiałów ziarnistych o słabej przepuszczalności powietrznej (grupa B) stanowią obecnie najczęstszy przedmiot studiów analitycznych i badań eksperymentalnych
- procesy wiążące się z powietrzno-strumieniowym transportem kohezyjnych materiałów ziarnistych o znikomej przepuszczalności powietrznej (grupa A) są dotychczas rozeznane w najmniejszym zakresie.

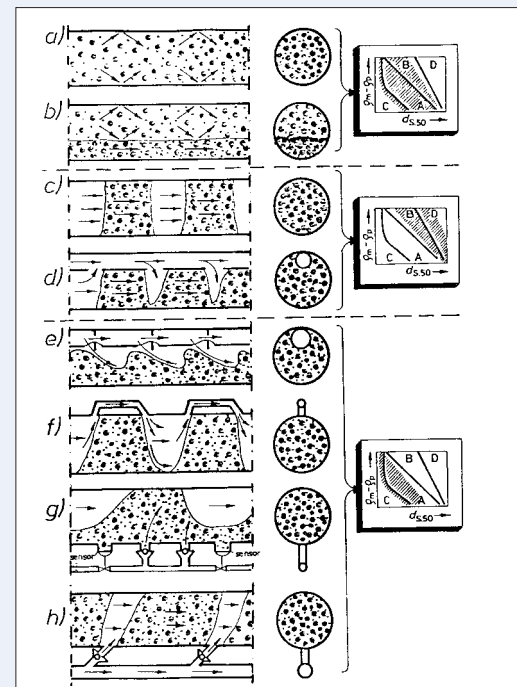


Rys. 4. Charakter przepływu ziaren niesionych w strumieniu powietrza w rurociągu poziomym [8].

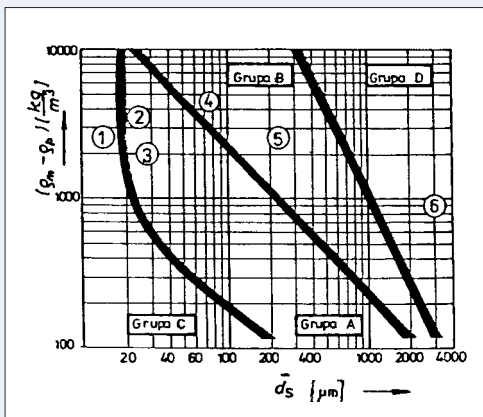
Znajomość scharakteryzowanych wyżej zagadnień procesowych w inżynierii przepływów dwufazowych odgrywa fundamentalną rolę w projektowaniu i budowie:

- stałych technologicznych instalacji transportu pneumatycznego
- mobilnych maszyn pneumatycznych do przeładunku i transportu bliskiego materiałów ziarnistych.

Z problematyką budowy stałych pneumatycznych instalacji transportu pneumatycznego czytelnik może w miarodajny sposób zapoznać się m.in. w pracach [2],



Rys. 5. Zastosowanie podstawowych rodzajów technologii transportu powietrzno-strumieniowego [9]



Rys. 6. Diagram Geldart[®] a określający zdolność przenoszenia ziarn polidispersyjnych w strumieniu powietrza [3]

[7], [9], [10]. Uwarunkowania rozwojowe mobilnych maszyn pneumatycznych do przeładunku i transportu bliskiego materiałów ziarnistych omówiono poniżej.

Uwarunkowania mobilnych maszyn pneumatycznych do przeładunku i transportu bliskiego materiałów ziarnistych.

Historia rozwoju mobilnych pneumatycznych maszyn roboczych do przeładunku i transportu materiałów ziarnistych wiąże się głównie z postęпами w technice:

- portowych przeładunków
- składowania zbiornikowego materiałów pylistych, materiałów masowych

przetwórstwa sypkich surowców technologicznych.

Mobilne maszyny tego rodzaju są obecnie budowane głównie w wersjach:

- na samojezdnym podwoziu szynowym
- ciągnionym (przyczepowym) podwoziu ogumionym
- na podwoziu samochodowym (typu skrzyniowego lub naczepowego).

Na rys. 7 przedstawiono schemat funkcjonalny szynowej pneumatycznej ładowarki służącej do rozładunku statków i barek. Wydajność obecnie budowanych portowych ładowarek pneumatycznych waha się w granicach 100 ÷ 600 t/h przy zainstalowanej mocy napędów rzędu 100 ÷ 400 kW. Urządzeniem odbiorczym w tego typu maszynie przeładowniczej może być zarówno przenośnik określonego typu, jak również pojazdy zbiornikowe (wagony, cysterny, przejezdne wozy kontenerowe itp.).

Bardziej uniwersalną odmianą pneumatycznych maszyn przeładowniczych są przejezdne, ssawne-tłoczne ładowarki montowane na podwoziu ogumionym (rys. 7). Maszyny tego rodzaju mogą być stosowane zarówno w przeładunkach portowych, jak również w przeładunkach i transporcie technologicznym materiałów sypkich, w obsłudze placów składowych materiałów masowych itp. Wydajność mobilnych ładowarek pneumatycznych ssawno – tłocznych stosowanych w przeładunkach i transporcie

technologicznym materiałów sypkich na odległość nawet do 300 [m] jest rzędu 10 ÷ 200 t/h przy zainstalowanej mocy napędu rzędu 10 ÷ 200 kW.

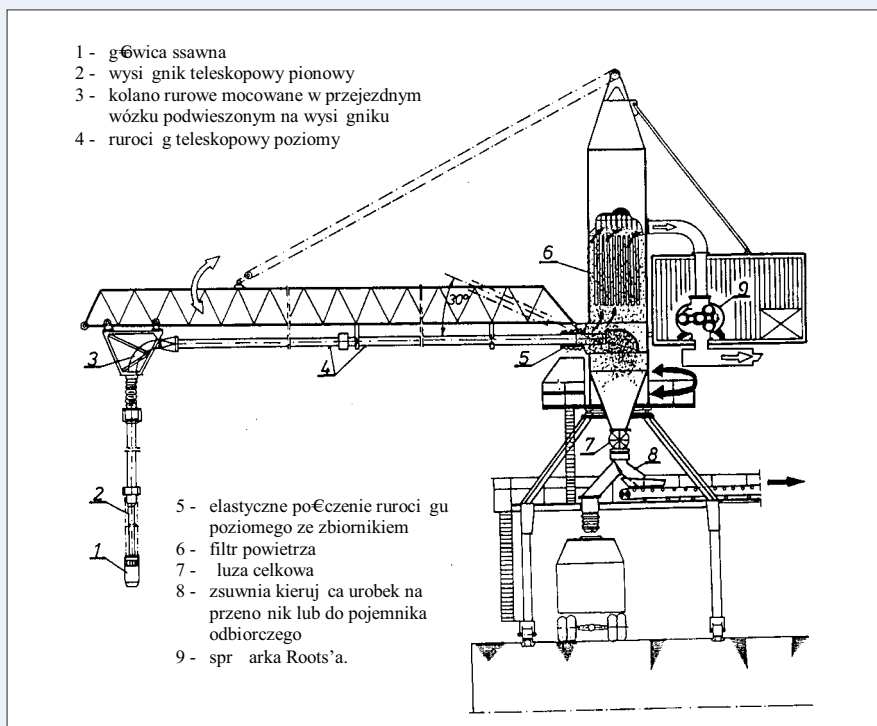
Mając na względzie opracowanie miarodajnych procesowych i konstrukcyjnych podstaw budowy maszyn pokazanych na rys. 6, 7, 8, należy brać pod uwagę:

- możliwość przeładunku materiałów ziarnistych o zróżnicowanych własnościach fizyko – mechanicznych (tzn. materiałów, które są reprezentantami każdej z wyodrębnionych grup materiałowych A, B, C, D wg rys. 6)
- możliwość użycia sprężarek o zróżnicowanym ciśnieniu i wydatku generowanego strumienia powietrza (należy brać również pod uwagę możliwość użycia wysokociśnieniowych wentylatorów pracujących w zależności od potrzeb pojedynczo lub w szeregowym tandemie, a także możliwość użycia sprężarki Roots'a)
- konieczność użycia wysokociśnieniowych śluz obrotowych celkowych o regulowanym wydatku strumienia materiału ziarnistego ($q_m \neq const.$)
- możliwość użycia różnego typu głowic ssawnych o regulowanej chłonności strumienia powietrza ($q_m \neq const.$)
- konieczność użycia oddzielaczy cyklonowych o zróżnicowanej wielkości i geometrii (przystosowanych do wymaganej wydajności przeładunku)
- konieczność użycia odpowiedniego typu filtrów powietrzno – kominowych współpracujących z układami cyklonowymi (tworzących w rezultacie tzw. instalację filtra cyklonową o mobilnym charakterze).

Tego rodzaju informacji czołowi światowi producenci portowych maszyn pneumatycznych do przeładunku i transportu bliskiego materiałów sypkich nie podają, ograniczając się jedynie do danych typu prospektowego. Wynika stąd konieczność podejmowania własnych studiów badawczych (przede wszystkim o charakterze procesowym) w tym zakresie.

Instalacja doświadczalna do badań procesu pneumatycznego transportu i przeładunku materiałów ziarnistych.

Biorąc pod uwagę powyższe ustalenia budowy, autorzy przyjęli wyjściowe założenie, że koncepcja wielofunkcyjnego stanowiska doświadczalnego do badań procesu powietrzno – strumieniowego



Rys. 7. Schemat funkcjonalny przejezdnej, portowej ładowarki pneumatycznej typu wysięgnikowego na podwoziu szynowym

przeladunku i transportu bliskiego materiałów ziarnistych o zróżnicowanych właściwościach fizyko – mechanicznych winno umożliwiać jego pracę w układzie:

- nadawy zbiornikowej i nadciśnieniowego tłoczenia materiału przez rurociąg o zmiennej kształcie i długości
- zasysania i transportu materiału przez rurociąg o zmiennej długości w warunkach podciśnienia
- podciśnieniowego zasysania z jednoczesnym nadciśnieniowym tłoczeniem materiału w linii transportowej rurociągu o zmiennej długości.

Autorzy przyjęli również założenie, że synteza konstrukcyjna każdego z trzech wyróżnionych podukładów doświadczalnych winna być możliwa w oparciu o zastosowanie tych samych modułowych elementów stanowiska doświadczalnego, a konkretnie:

- wentylatora wysokociśnieniowego i alternatywnie sprężarki Roots'a o regulowanej wydajności
- śluzi celkowej (wysokoszczelnej) o sterowalnej prędkości obrotowej wirnika
- typoszeregu cyklonów z automatycznie oczyszczanym filtrem powietrznym – tkaninowym
- odcinków rurociągu (prosto- i krzywoliniowych) odpowiednio łączonych w linię transportu pionowego, ukośnego lub poziomego o zmiennej długości
- zestawu głowic ssawnych o zróżnicowanej geometrii i sterowalnej chłonności.

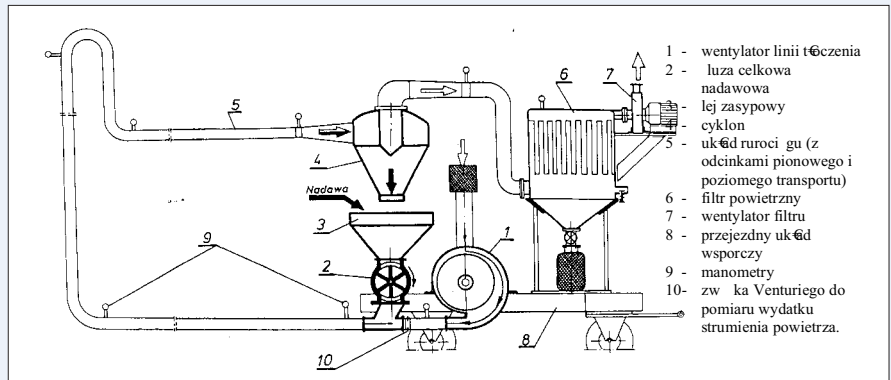
Schemat ideowy instalacji doświadczalnej przystosowanej do pracy w zamkniętym układzie nadawy zbiornikowej i nadciśnieniowego transportu tłoczonego materiałów ziarnistych przedstawiono na rys. 9. Na tym rysunku zaznaczono również położenie elementów układu kontrolno-pomiarowego niezbędnych w toku badań.

Schemat ideowy instalacji doświadczalnej przystosowanej do pracy w zamkniętym układzie ssawnego transportu materiału sypkiego przez rurociąg przedstawiono na rys. 9.

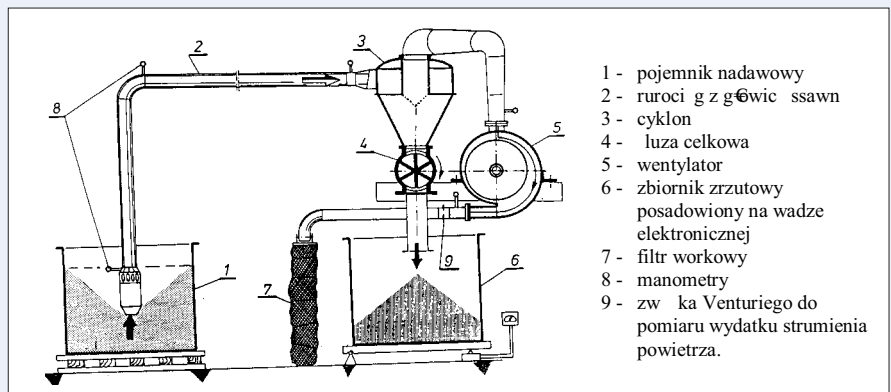
Natomiast schemat ideowy instalacji doświadczalnej przystosowanej do pracy w zamkniętym układzie zarówno podciśnieniowego zasysania jak i nadciśnieniowego tłoczenia materiału ziarnistego w linii transportowej przedstawiono na rys. 10.

Zaprezentowane wersje stanowisk doświadczalnych umożliwiają:

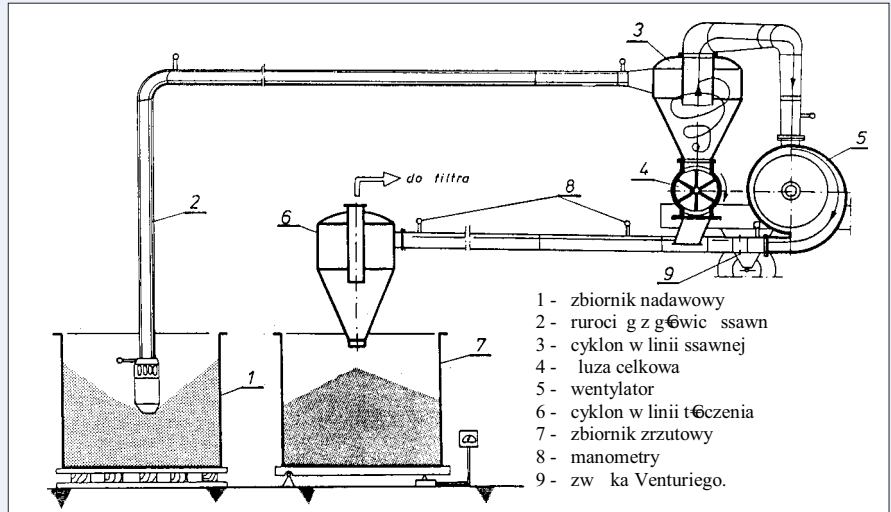
- modelowanie procesowe i optymalizację konstrukcyjną węzła nadawowego, pracującego w warunkach nadci-



Rys. 8. Schemat funkcjonalny wersji stanowiska doświadczalnego do badań procesu i pneumatycznego transportu materiałów ziarnistych w warunkach nadciśnienia powietrza roboczego



Rys. 9. Schemat funkcjonalny wersji stanowiska doświadczalnego do badań procesu zasysania i pneumatycznego transportu materiałów ziarnistych w warunkach podciśnienia powietrza roboczego



Rys. 10. Schemat funkcjonalnej wersji stanowiska doświadczalnego do badań procesu podciśnieniowego zasysania materiału sypkiego z jednoczesnym nadciśnieniowym jego tłoczeniem w linii rurociągu transportowego

- modelowanie procesowe i optymalizację procesową i konstrukcyjną węzła nadawowego, pracującego w warunkach podciśnienia z głowicą ssawną
- modelowanie procesowe i optymalizację transportu pneumatycznego określonych rodzajów materiałów ziarnistych (zarówno w warunkach ich tłoczenia jak i zasysania) na poziomych, pionowych i ukośnych odcinkach rurociągu o zadanych długościach i konfiguracjach połączeń

- modelowanie procesowe i optymalizację procesową i konstrukcyjną węzła nadawowego, pracującego w warunkach nadciśnienia z głowicą ssawną
- modelowanie procesowe i optymalizację transportu pneumatycznego określonych rodzajów materiałów ziarnistych (zarówno w warunkach ich tłoczenia jak i zasysania) na poziomych, pionowych i ukośnych odcinkach rurociągu o zadanych długościach i konfiguracjach połączeń
- modelowanie procesowe i optymalizację procesową i konstrukcyjną węzła nadawowego, pracującego w warunkach nadciśnienia z głowicą ssawną
- modelowanie procesowe i optymalizację transportu pneumatycznego określonych rodzajów materiałów ziarnistych (zarówno w warunkach ich tłoczenia jak i zasysania) na poziomych, pionowych i ukośnych odcinkach rurociągu o zadanych długościach i konfiguracjach połączeń

Pełen wkaz literatury podany przez Autorów znajduje się w internecie na stronie www.czasopismologistyka.pl