

Zbigniew Piątkiewicz

PROJEKT PNEUMATYCZNEGO TRANSPORTU PIASKU W KATEDRZE ODLEWNICTWA

STRESZCZENIE

Ogólna charakterystyka pneumatycznego transportu. Metody obliczeń. Sposoby pomiarów spadków ciśnień. Zasady doboru właściwej prędkości powietrza. Zasady doboru współczynników techniczno-ekonomicznych.

Projekt pneumatycznego transportu piasku w Zakładzie Doświadczalnym Katedry Odlewnictwa.

1. Wstęp

Jednym z nowoczesnych środków transportu piasków i mas formierskich jest transport pneumatyczny. Taki rodzaj transportu nadaje się do wszystkich ziarnistych i tworzących pył materiałów, jak: cement, wapno, pył węglowy, popiół, żużel, drobny węgiel, trociny, zboża. Zasada działania pneumatycznego transportu polega na ruchu mieszaniny rozdrobnionego ciała stałego i powietrza (gazu) w przewodach rurowych. Rysunek 1 podaje klasyczny przykład pneumatycznego transportu poziomego. Materiał do przewodów rurowych wprowadzany jest zasilaczem, skąd jest porywany przez płynące z dużą prędkością powietrze. Urządzeniem odbiorczym jest cyklon, w którym następuje oddzielenie rozdrobnionego materiału od powietrza z pyłem. Czynnikiem pokonującym opory ruchu mieszanki jest różnica ciśnień utrzymywana wentylatorem.

W zależności od sposobu otrzymywania tej różnicy ciśnień rozróżnia się zasadnicze dwa typy urządzeń pneumatycznych:

- a) pracujące na podciśnieniu (zasysające),
- b) pracujące na nadciśnieniu (tłoczące).

Na ogół urządzenia, pracujące na zasadzie podciśnienia, stosowane są w wypadku transportu materiału z wielu punktów do jednego, w przeciwieństwie do urządzeń nadciśnieniowych stosowanych wówczas gdy materiał z jednego punktu należy dostarczyć do kilku punktów odbioru.

Na rys. 1 podano schemat urządzenia pomiarowego transportu, pracującego na zasadzie podciśnienia. Na rys. tym pokazano w sposób graficzny spadki i straty ciśnień:

Δp_d — przy wlocie strumienia powietrza do dyszy,

Δp_z — podczas zasilania materiałem,

Δp_v — na wywołanie ruchu materiału po prostoliniowych odcinkach transportowych,

$\Delta p_{cykl.}$ — w cyklonach,

Δp_p — całkowity spadek ciśnienia.

Pneumatyczny transport nadciśnieniowy jest jednak wygodniejszym środkiem transportującym, ponieważ powietrze można dowolnie sprężyć, co pozwala na osiągnięcie większej wydajności nawet przy transporcie na dużą odległość.

Ciśnienie (podciśnienie) przy pneumatycznym transporcie tłoczącym (ssącym) zależy w pierwszym rzędzie od rodzaju materiału, długości i jakości przewodów, ilości zakrzywień oraz wysokości podnoszenia. Ze względów ekonomicznych ciśnienie powietrza nie powinno przekraczać 2—3 atm. Przy transporcie suchego piasku waha się ono w granicach 0,2—0,5 atm.

Do najważniejszych zalet pneumatycznego transportu tłoczącego i ssącego zaliczamy:

- 1) higienę, bezpieczeństwo i pewność pracy,
- 2) dużą zdolność przystosowania się do miejscowych warunków,
- 3) niskie koszty instalacji,
- 4) zabezpieczenie materiału przed stratami.

Do wad zaliczamy:

- 1) duże zużycie energii — kilkakrotnie większe w porównaniu z zespołem przenośników taśmowych (kubelkowych) o tej samej wydajności i odległości (wysokości) transportu,
- 2) zużycie przewodów zwłaszcza na krzywiznach.

Należy podkreślić, że w wielu wypadkach duże zużycie energii pneumatycznego transportu wynika z niewłaściwej konserwacji urządzeń, a w szczególności z niewłaściwego uszczelnienia połączeń rurowych i urządzeń pomocniczych.

2. Ogólna charakterystyka pneumatycznego transportu

Koncentracja mieszaniny powietrznej (gazowej)

$$\mu = Q^x_c / Q^x$$

gdzie:

- Q^x_c — masowe natężenie przepływu transportowanego materiału w kg/sec.
- Q^x — masowe natężenie przepływu tłoczonego (ssącego) powietrza w kg/sec.

Koncentrację mieszaniny ustala się empirycznie. Wartość jej waha się od 2 do 100 w zależności od:

- a) rodzaju transportowanego materiału,
- b) długości przewodów transportu.

Szeroki zakres zmian koncentracji mieszaniny, która równocześnie pozwala określić ile kg materiału transportuje jeden kg „tłoczonego” powietrza, świadczy o jej decydującym wpływie na ekonomiczność pneumatycznego transportu.

Zredukowany przekrój „strumienia” cząstek i powietrza

W celu uproszczenia obliczeń transport mieszaniny rozdrobnionego ciała stałego i powietrza rozkładamy jak gdyby na dwa oddzielne strumienie o różnych prędkościach oraz różnym przekroju i ciężarze właściwym.

Jak widać z rys. 2 zredukowany przekrój strumienia transportowanego materiału o prędkość V_c posiada przekrój bardzo mały (wielkość jego zależy od koncentracji mieszaniny — patrz wzór 1) w porównaniu z przekrojem strumienia powietrza poruszającego się z prędkością V .

Dlatego w przybliżeniu można przyjąć

$$F_p = F - F_m \approx F$$

gdzie:

F — przekrój przewodów rurowych,

F_p, F_m — zredukowany przekrój strumienia powietrza i materiału.

W oparciu o zredukowany przekrój można określić masowe natężenie przepływu transportowanego materiału i tłoczonego powietrza:

$$Q^x = F_p \cdot V \cdot \gamma \text{ kg/sec.}$$

$$Q^x_c = F_m \cdot V_c \cdot \gamma_c \text{ kg/sec.} \quad (2)$$

Graniczna prędkość powietrza

Wybór prędkości transportu danego materiału oparty jest na granicznej prędkości powietrza, której zakres ograniczony jest maksymalną (V_g) max. i minimalną (V_g) min. prędkością, co notujemy następująco:

$$(V_g) \text{ min.} < V_g < (V_g) \text{ max.}$$

Praktyczny sens doboru granicznej prędkości w takim zakresie tkwi w tym, że:

- wartość (V_g) max., określa dopuszczalna maksymalna prędkość danego materiału, zapewniająca zachowanie pierwotnego kształtu transportowanych cząstek. Do najważniejszych czynników wpływających na parametr prędkości (V_g) max. zaliczamy: gatunek i zawartość wilgoci w transportowanym materiale oraz kształt, ilość krzywizn, sposób montażu przewodów i urządzeń,
- wartość (V_g) min., określa dopuszczalna minimalna prędkość danego materiału, po przekroczeniu której można zaobserwować osadzanie się cząsteczek w przewodach. Większe skupienia cząstek zakłócają ciągłość transportu, a często są przyczyną całkowitych „zabić” przewodów transportowanym materiałem.

Prędkość krytyczna (zawieszenia V_z)

Prędkość krytyczną doświadczalnie określamy w sposób następujący: w rurce pionowej wykonanej ze szkła zmniejszamy prędkość powietrza, a tym samym siłę naporu powietrza na cząsteczki, do chwili osiągnięcia równowagi przeciwnie skierowanych wektorów, siły ciężkości cząsteczek i siły naporu powietrza na cząsteczkę.

Taki stan równowagi ujmuje prawo Newtona:

$$P = m \cdot g \quad (3)$$

Jeżeli siła naporu powietrza na cząsteczkę jest większa od siły ciężkości (mg) to cząsteczka wykonuje ruch w górę ($V_c > 0$). W przypadku $P < mg$ cząsteczka opada ($V_c < 0$). Stąd wniosek, że istnieje pewna szczególna prędkość powietrza, przy której cząsteczka pozostaje w zawieszeniu (cząsteczka nie wykonuje ruchu $V_c = 0$). Prędkość tę zapewniającą istnienie równowagi sił ($P = mg$) nazywamy prędkością krytyczną lub zawieszenia.

Jeżeli prawą stronę równania Newtona określimy posługując się prawem Archimedesesa, a lewą wzorem określającym siłę oporu ośrodka to otrzymamy:

$$\psi \cdot F_c \cdot \frac{V_w^2 \cdot \gamma}{2g} = V_d (\gamma_c - \gamma) \quad (4)$$

gdzie:

ψ — współczynnik oporu ośrodka,

F_d — rzut przekroju poprzecznego cząsteczki w kierunku ruchu m^2 ,

$V_w = V - V_c$ — względna prędkość powietrza $m/sec.$,

V, V_c — prędkość powietrza i cząsteczki $m/sec.$,

γ, γ_c — ciężar właściwy powietrza i cząsteczki kG/m^3 ,

V_d — objętość cząsteczki m^3 ,

g — przyspieszenie grawitacyjne $m/sec.^2$.

Ponieważ przy danej stałej prędkości powietrza następuje równowaga ruchu cząsteczek (cząsteczka osiągnie stałą prędkość), wobec tego można napisać:

$$-\frac{dV_w}{dt} = \frac{dV_c}{dt} = 0$$

czyli przyspieszenie cząsteczki wynosi zero.

Przyjmując, że cząsteczki transportowanego materiału mają kształt

kulisty $F_d = \frac{\pi d_c^2}{4}$; $V_d = \frac{\pi d_c^3}{6}$ prędkość krytyczna z równania 4

wynosi:

$$V_z = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d_c (\gamma_c - \gamma)}{3 \cdot \gamma \cdot \psi}} \text{ m/sec.} \quad (5)$$

Jeżeli czynnikiem transportującym jest powietrze to wówczas można przyjąć $\gamma_c - \gamma \approx \gamma_c$.

W oparciu o dane z licznych doświadczeń, roboczą prędkość powietrza przyjmuje się:

$$V_R = (2 \div 3) V_z \quad (6)$$

Określenie oporów przepływu powietrza na krótkiej odległości

Pokonanie oporów przepływu odbywa się kosztem różnicy ciśnień między końcami przewodów rurowych (p_1 , p_2), przez które przepływa czynnik.

Jeżeli przewodami rurowymi przepływa tylko powietrze to spadek ciśnienia wywołany oporami przepływu określamy następująco:

$$-\Delta p_0 = p_1 - p_2 \text{ kG/m}^2 \quad (7)$$

Opory przepływu wyrażone jako różnica ciśnień ($-\Delta p_0$) są funkcją kilku zmiennych:

$$-\Delta p_0 = f(D; L; V; \rho; \eta) \quad (8)$$

gdzie:

- D , L — średnica i długość przewodów rurowych,
- V — średnia prędkość liniowa powietrza,
- ρ — gęstość powietrza,
- η — dynamiczny współczynnik lepkości powietrza.

Po rozwiązaniu tej zależności przy pomocy tzw. analizy wymiarowej otrzymujemy równanie Dary-Weisbacha w następującej postaci:

$$-\Delta p_0 = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad (9)$$

Wzór ten określa spadek ciśnienia na pokonanie oporów przepływu powietrza na krótkiej odległości.

Współczynnik oporów określa wzór Filomenka

$$\lambda = \left(\frac{0,55}{\log. Re/8} \right)^2 \quad (10)$$

w którym liczbę Reynolds'a (dla przewodów rurowych, przez które przepływa powietrze) określamy następująco:

$$Re = \frac{D \cdot V}{\nu} \quad (11)$$

gdzie: $\nu = \eta/\rho$ — kinetyczny współczynnik lepkości.

Ten tok obliczeń spadku ciśnienia na pokonanie oporów przepływu powietrza dopuszczalny jest tylko przy transporcie na krótką odległość, ponieważ tylko w takim przypadku można z wystarczającą dla praktyki dokładnością pominąć zmiany prędkości i ciężaru właściwego powietrza wzdłuż przewodów rurowych.

Określenie oporów' przepływu powietrza na dużej odległości

Przyjmujemy, że przepływ powietrza jest izotermiczny. Ze względu na dużą odległość transportu przy obliczaniu spadku ciśnienia (wskutek wzrostów oporów w kierunku przepływu) należy uwzględnić towarzyszące mu zmiany prędkości, ciężaru właściwego i energii kinetycznej powietrza.

Dlatego przy określaniu oporów przepływu powietrza na dużej odległości równanie (9) odnosimy do elementarnego odcinka przewodu rurowego dx , otrzymując równanie różniczkowe w następującej postaci:

$$-\Delta p = \gamma \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \cdot dx \quad (12)$$

Ponieważ rozpatrujemy przepływ izotermiczny ($t = t_1$) zależność między ciśnieniem a prędkością powietrza w przewodzie rurowym o stałym przekroju można podać w postaci:

$$p \cdot V = p_1 \cdot V_1 \quad (13)$$

Ciężar właściwy powietrza w kierunku przepływu zmienia się proporcjonalnie do ciśnienia:

$$\gamma/p = \gamma_1/p_1 \quad (14)$$

Zmianę energii kinetycznej powietrza można pominąć. Uwzględnia się ją tylko w przypadku przeprowadzania bardzo ścisłych obliczeń.

Współczynnik oporu λ wartości swej nie zmienia, ponieważ licznik i mianownik liczby Reynolds'a zmieniają się proporcjonalnie.

Do równania (12) wstawiamy wartości wzorów (13), (14). Po zcałkowaniu w granicach ciśnień od p_1 do p na odcinku od 0 do x i uporządkowaniu otrzymujemy następujące równanie:

$$\frac{p_1^2 - p^2}{2} = p_1 \cdot \gamma_1 \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \cdot X \quad (15)$$

Postać równania (15) nie jest wygodną w użyciu. Obliczenie spadku ciśnienia jest o wiele łatwiejsze jeżeli równanie przekształcimy do postaci nadającej się wprost do odczytu różnicy ciśnień na przyrządzie pomiarowym:

$$\Delta_p = p_1 - p_2 \quad (16)$$

Określenie parametru Δ_p rozpoczyna się od spadku ciśnienia Δ_p^* — jako efektów oporów strumienia powietrza Q^* odniesionego do początku układu (rys. 1 przekrój 1) niezmiennego wzdłuż przewodów na długości X .

W przypadku $\gamma = \gamma_1$, $V = V_1$ równanie (9) można podać w następującej postaci:

$$\Delta_p^* = \gamma_1 \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \cdot X \quad (17)$$

Równanie (15) po uwzględnieniu wartości równania (17) i odpowiednim przekształceniu otrzymuje się w następującej postaci:

$$\Delta_p = p_1 - \sqrt{p_1^2 - 2 p_1 \cdot \Delta_p^*} \quad (18)$$

gdzie:

$\Delta_p^* = p_1 - p^*$ — spadek ciśnienia wywołany oporami przepływu powietrza.

3. Pneumatyczny transport — poziomy

Spadek ciśnienia wywołany oporami przepływu powietrza określa równanie Darcy-Weisbacha (wzór 9).

Gdy do przewodów rurowych wprowadzimy rozdrobnione ciało stałe, zostaje ono porwane przez strumień powietrza. Spadek ciśnienia wywołany oporami przepływu mieszaniny rozdrobnionego ciała stałego i po-

wietrza są funkcją masowego natężenia przepływu transportowanego materiału. Z powyższych rozważań wynika, że całkowity spadek ciśnienia wynosi:

$$\Delta p_v = \Delta p_o + \Delta p_c \text{ kG/m}^2 \quad (19)$$

gdzie:

Δp_c — spadek ciśnienia wywołany oporami ciała stałego w kG/m^2 .

Wyznaczenie całkowitego spadku ciśnienia najczęściej przeprowadza się w ten sposób, że drogą licznych doświadczeń określa się stosunek oporów przepływu mieszanki do oporów przepływu powietrza, co można wyrazić w postaci

$$\Delta p_v / \Delta p_o = \frac{\Delta p_o + \Delta p_c}{\Delta p_o} = 1 + \mu \cdot k \quad (20)$$

gdzie:

μ — współczynnik koncentracji (patrz wzór 1),

k — współczynnik empiryczny zależny od prędkości powietrza (rys. 5).

Całkowity spadek ciśnienia pneumatycznego transportu poziomego otrzymamy z równania (20) po uwzględnieniu wartości wzoru (9):

$$\Delta p_v = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} (1 + \mu \cdot k) \text{ kG/m}^2 \quad (21)$$

4. Pneumatyczny transport — pionowy

Sposób ujęcia podstaw obliczeń pneumatycznego transportu pionowego jest analogiczny do transportu poziomego.

Całkowity spadek ciśnienia Δp_v przy transporcie poziomym, zastępujemy całkowitym spadkiem ciśnienia Δp_H — przy transporcie pionowym. Wobec tego zgodnie z równaniem (19) można napisać:

$$\Delta p_H = \Delta p_o + \Delta p_c \text{ kG/m}^2 \quad (22)$$

Całkowitą siłą naporu powietrza P , działającą na cząsteczki w przewodzie rurowym o przekroju F , określamy ze spadku ciśnienia p_c , które wywołane jest oporem transportowanego materiału na rozważanym odcinku.

$$P = F \cdot \Delta p_c \quad (23)$$

Wartość siły P można określić jako iloczyn oporu jednej cząsteczki (P_1) pomnożonej przez ilość cząsteczek (n_c) przypadających na metr długości przewodu rurowego (H). Wówczas równanie (23) można podać w postaci:

$$F \cdot \Delta p_c = P_1 \cdot n_c \cdot H \quad (24)$$

Ilość cząsteczek znajdujących się w jednym metrze bieżącym przewodu rurowego wynosi:

$$n_c = q_c / G_1 \quad (25)$$

gdzie:

$q_c = \frac{Q_c^*}{V_c}$ — ciężar cząsteczek w jednym m. b. przewodu rurowego.

Siłę naporu powietrza na jedną cząsteczkę określa wzór:

$$P_1 = \psi \cdot F_c \cdot \frac{\gamma \cdot V_w^2}{2 \cdot g} \quad (26)$$

Z równania (24), po uwzględnieniu wartości równań (25) i (26), spadek ciśnienia wywołany oporami ciała stałego wynosi:

$$\Delta p_{cH} = \frac{\psi \cdot \gamma \cdot Q_c^* \cdot F_{cH} V_w^2}{2 \cdot g \cdot V_c \cdot F \cdot G_1} \quad \text{kG/m}^2 \quad (27)$$

Spadek ciśnienia wywołany oporami przepływu powietrza określamy z równania Dary-Weisbacha (wzór 9), zastępując L — długość transportera poziomego wysokością H — przy transportcie pionowym.

$$\Delta p_{oH} = \lambda \cdot \frac{H}{D} \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad \text{kG/m}^2 \quad (28)$$

5. Dodatkowe straty ciśnienia

Straty ciśnienia przy wlocie strumienia powietrza do dyszy:

$$\Delta p_d = (1 + \xi_d) \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad \text{kG/m}^2 \quad (29)$$

gdzie:

ξ_d — współczynnik uwzględniający ostrość krawędzi.

Straty ciśnienia podczas zasilania materiałem:

Prędkość cząsteczki o masie $m = Q_c^*/g$ zmienia się od V_x — prędkości początkowej (krytycznej) do prędkości V_c . Niezbędną siłę impulsu w celu nadania cząsteczce prędkości V_c określa wzór:

$$F \cdot \Delta p_z = m (V_c - V_x) \quad \text{skąd} \quad \Delta p_z = \frac{Q_c^* (V_c - V_x)}{F \cdot g} \quad \text{kG/m}^2 \quad (30)$$

Straty ciśnienia na krzywiznie:

$$\Delta p_k = \xi_k \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad \text{kG/m}^2 \quad (31)$$

Wartość współczynnika Seglera ξ_k obliczamy na podstawie równania (20):

$$\xi_k = \xi (1 + \mu \cdot k) \quad (32)$$

Straty ciśnienia w cyklonach określa wzór:

$$\Delta p_{cykl.} = \xi_c \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad \text{kG/m}^2 \quad (33)$$

Straty ciśnienia w oddzielaczach obliczamy wzorem Kantrowicza:

$$\Delta p_{oddz.} = (\xi_c + \mu \cdot k_1^2) \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad \text{kG/m}^2 \quad (34)$$

gdzie:

$\xi_c = 1,5 - 2,5$ — współczynnik uwzględniający straty na skutek nagłego rozszerzania przewodów,

$k_1 = V_c/V = 0,65 - 0,85$ — stosunek średniej prędkości transportowanego materiału do średniej prędkości powietrza.

6. Sprawność pneumatycznego transportu — p o z i o m e g o

Sprawność pneumatycznego transportu określa stosunek pracy użytecznej — do pracy włożonej:

$$\eta_v = \frac{Q_c^x \cdot L}{V^x \cdot \Delta P_v} \quad (35)$$

Wzorem (35) można posługiwać się tylko przy transporcie materiału na krótką odległość, ponieważ przy transporcie materiału na długim odcinku wartość pracy włożonej określa zależność:

$$75 N_v = V_1 \cdot p_1 \ln(p_1/p_2) \quad (36)$$

Wobec tego sprawność długiego pneumatycznego transportera można podać w postaci:

$$\eta_v = \frac{Q_c^x \cdot L}{V_1 \cdot p_1 \cdot \ln(p_1/p_2)} \quad (37)$$

Jeżeli do równania (35) wstawimy zamiast:

$$Q^x = V^x \cdot \gamma, \quad \mu = Q_c^x/Q^x \quad \text{oraz} \quad \Delta p_v/L = \gamma \cdot (i_o + i_c)$$

to sprawność krótkiego pneumatycznego transportera można podać w postaci:

$$\eta_v = \frac{\mu}{i_o + i_c} \quad (38)$$

gdzie:

i_o, i_c — spadek ciśnienia wywołany oporami przepływu powietrza i transportowanego materiału na jednostkę długości przewodu rurowego.

Ze wzoru (38) wynika, że ekonomiczność pracy pneumatycznego transportu jest wprost proporcjonalna do koncentracji mieszaniny.

Sprawność pneumatycznego transportu — p i o n o w e g o — obliczamy z równania (35) zastępując: L (długość), Δp_v (całkowity spadek ciśnienia) transportera poziomego, wysokością (H) i całkowitym spadkiem ciśnienia (ΔP_H) — transportera poziomego.

$$\eta_H = \frac{Q_c^x \cdot H}{V^x \cdot \Delta P_H} \quad (39)$$

7. Projekt pneumatycznego transportu piasku w Katedrze Odlewnictwa

Na rys. 6 podano schemat (wykonanego projektu) usytuowania zasadniczych urządzeń pneumatycznego transportu pracującego na zasadzie nadciśnienia.

Zasada działania: wysuszony piasek z suszarni gazowej 2, samoczynnie przesypuje się do zbiornika 3, skąd zasilaczem gwieździstym 4, wprowadzony jest w strumień powietrza. Następnie przewodami 5, piasek w postaci mieszaniny z powietrzem, zostaje przetransportowany do urządzenia odbiorczego — cyklonu 6, — który umieszczony jest w oddziale przeróbki mas. Odpylony piasek w cyklonie opada do zasobnika 7.

Założenia do projektu:

- wymagana wydajność — $Q_c^x = 1$ t/h,
- długość przewodów poziomych — $L = 30$ m,
- długość przewodów pionowych — $H = 6$ m,
- ilość zakrzywień przewodów rurowych — $i = 6$
- ciężar właściwy transportowanego piasku — $\gamma_c = 1500$ kg/m³,
- ciężar właściwy transportowanego powietrza — $\gamma = 1,1$ kg/m³,
- maksymalna średnica ziarn piasku — $d_c = 2$ mm.

Prędkość krytyczna (wzór 5):

$$V_z = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot d_c \cdot \gamma_c}{3 \cdot \gamma \cdot \psi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,81 \cdot 0,002 \cdot 1500}{3 \cdot 1,1 \cdot 0,25}} = 12 \text{ m/sec.}$$

Wartość współczynnika oporu ψ określono doświadczalnie. Dla cząstek o kształcie kulistym wynosi 0,25.

Robocza prędkość powietrza (wzór 6):

$$V_R = 2,5 V_z = 2,5 \cdot 12 = 30 \text{ m/sec.}$$

Masowe natężenie tłoczonego powietrza (wzór 1), po przyjęciu koncentracji mieszaniny $\mu = 3,8$ wynosi:

$$Q^x = \frac{Q_c^x \cdot 1000}{\mu \cdot \gamma \cdot 60} = \frac{1 \cdot 1000}{3,8 \cdot 1,1 \cdot 60} = 4 \text{ m}^3/\text{min.}$$

Średnicę przewodów rurowych obliczamy z następującej zależności:

$$Q^x = \gamma \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_R \cdot 60 \text{ m}^3/\text{min.}$$

skąd

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q^x}{60 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot V_R}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4}{60 \cdot 3,14 \cdot 1,1 \cdot 30}} = 0,0507 \text{ m}$$

Przyjmuję $D = 52$ mm.

Wartość liczby Reynolds'a (wzór 11):

$$R_e = \frac{D \cdot V_R}{\nu} = \frac{0,052 \cdot 30}{16,5 \cdot 10^{-6}} = 94\,500.$$

Współczynnik oporów (wzór 10):

$$\lambda = \left(\frac{0,55}{\log R_{e/8}} \right)^2 = \left(\frac{0,55}{\log 11\,800} \right)^2 = 0,0182.$$

Spadek ciśnienia wywołany oporami przepływu powietrza i piasku na odcinku poziomym (wzór 21):

$$\Delta P_v = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} (1 + \mu \cdot k) = \frac{0,0182 \cdot 30 \cdot 1,1 \cdot 30^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,052}$$

$$\cdot (1 + 3,8 \cdot 0,3) = 1145 \text{ kg/m}^2.$$

Wartość współczynnika k odczytujemy z wykresu (rys. 5) dla prędkości $V_R = 30$ m/sec.

Spadek ciśnienia wywołany oporami przepływu powietrza na odcinku pionowym (wzór 28):

$$\Delta P_{oH} = \lambda \cdot \frac{H}{D} \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} = \frac{0,0182 \cdot 6 \cdot 1,1 \cdot 30^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,052} = 106 \text{ kG/m}^2.$$

Ciężar jednej cząsteczki piasku przy założeniu, że są one kształtu kulistego, wynosi:

$$G_1 = \frac{\pi \cdot d_c^3}{6} \cdot \gamma_c = \frac{3,14 \cdot 1500 (0,002)^3}{6} = 42 \cdot 10^{-6} \text{ kG}.$$

Średnia wartość $V_w/V = 0,4$ — ustalono doświadczalnie skąd:

$$V_w = 0,4 \quad V = 0,4 \cdot 30 = 12 \text{ m/sec}.$$

Prędkość cząsteczki piasku:

$$V_c = V - V_w = 30 - 12 = 18 \text{ m/sec}.$$

Rzut przekroju poprzecznego cząsteczki (kuli):

$$F_d = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,002)^2}{4} = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.$$

Przekrój poprzeczny przewodu rurowego:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,052)^2}{4} = 21,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Spadek ciśnienia wywołany oporami ruchu piasku na odcinku pionowym (wzór 27):

$$\Delta P_{cH} = \frac{\psi \cdot \gamma \cdot Q_c^x \cdot F_{cH} \cdot V_w^2}{2 \cdot g \cdot V_c \cdot F \cdot G_1} = \frac{0,25 \cdot 1,1 \cdot 1000 \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot (12)^2}{360 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 18 \cdot 21,3 \cdot 10^{-4} \cdot 42 \cdot 10^{-6}} = 65,4 \text{ kG/m}^2.$$

Całkowity spadek ciśnienia na odcinku pionowym (wzór 22):

$$\Delta P_H = \Delta P_{oH} + \Delta P_{cH} = 106 + 65,4 = 171,4 \text{ kG/m}^2.$$

Suma spadku ciśnień na odcinku poziomym i pionowym:

$$\Delta P_{v+H} = \Delta P_v + \Delta P_H = 1145 + 171,4 = 1316,4 \text{ kG/m}^2.$$

Straty ciśnienia przy wlocie strumienia powietrza do dyszy (wzór 29):

$$\Delta P_d = (1 + \xi_d) \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} = (1 + 0,5) \frac{1,1 \cdot 30^2}{2 \cdot 9,81} = 75,5 \text{ kG/m}^2.$$

Straty ciśnienia podczas zasilania materiałem (wzór 30):

$$\Delta P_z = \frac{Q_c^x (V_c - V_z)}{F \cdot g} = \frac{1000 (18 - 12)}{360 \cdot 21,3 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81} = 796 \text{ kG/m}^2.$$

Straty ciśnienia na jednej krzywiznie (wzór 31):

$$\Delta P_k = \xi_k \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} = \frac{1,5 \cdot 1,1 \cdot 30^2}{2 \cdot 9,81} = 76 \text{ kG/m}^2$$

gdzie:

$$\xi_k = \xi (1 + \mu \cdot k) = 0,7 (1 + 3,8 \cdot 0,3) = 1,5.$$

Suma strat ciśnień na sześciu krzywiznach:

$$\Sigma \Delta P_k = 6 \cdot \Delta P_k = 6 \cdot 76 = 456 \text{ kG/m}^2.$$

Strata ciśnienia w cyklonie (wzór 33):

$$\Delta P_{cykl.} = \xi_c \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2 \cdot g} = 1,9 \cdot \frac{1,1 \cdot 30^2}{2 \cdot 9,81} = 96 \text{ kG/m}^2.$$

Całkowity spadek ciśnienia podczas transportu otrzymamy jako sumę poszczególnych spadków i strat ciśnień powiększoną o 20% w celu uwzględnienia nieszczelności przewodów:

$$\begin{aligned} \Delta_p &= 1,2 (\Delta P_{v+H} + \Delta P_d + \Delta P_z + \Sigma \Delta P_k + \Delta P_{cykl.}) = \\ &= 1,2 (1316,4 + 75,5 + 796 + 456 + 96) = 3300 \text{ kG/m}^2. \end{aligned}$$

Objętościowe natężenie przepływu powietrza:

$$V^x = F \cdot V = 21,3 \cdot 10^{-4} \cdot 30 = 0,0638 \text{ m}^3/\text{sec}.$$

Zapotrzebowanie mocy silnika wentylatora:

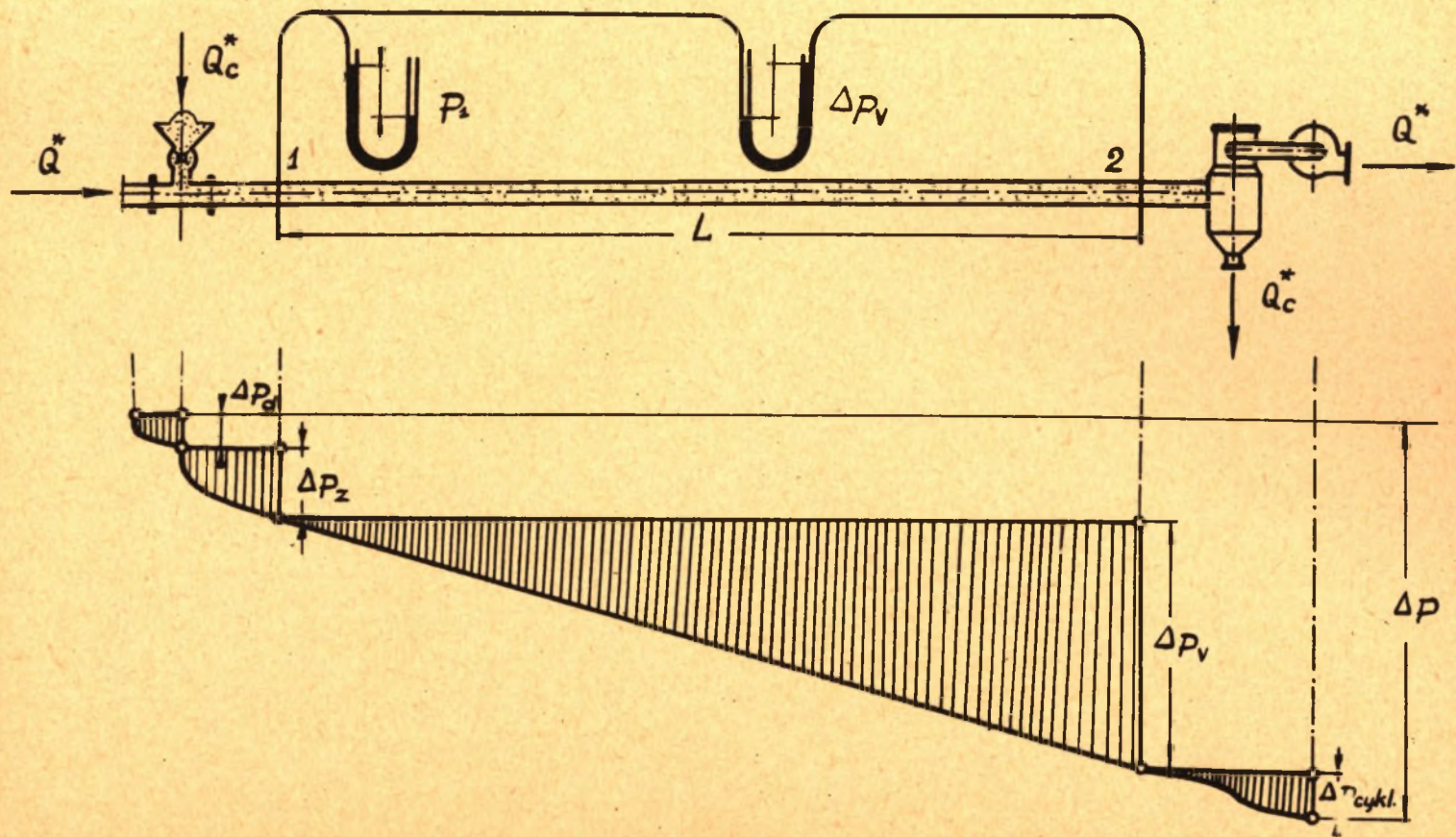
$$N = \frac{V^x \cdot \Delta P}{75 \cdot \eta_s} = \frac{0,0638 \cdot 3300}{75 \cdot 0,7} = 4 \text{ KM}.$$

Sprawność pneumatycznego transportera:

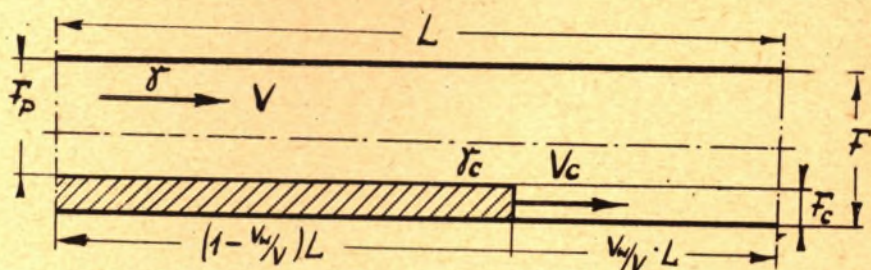
$$\eta = \frac{Q_c^x \cdot 1000 (L + H)}{360 \cdot V^x \cdot \Delta_p} = \frac{1000 (30 + 6)}{360 \cdot 0,0638 \cdot 3300} = 0,475.$$

LITERATURA

- P. N. Aksjonow: *Oborudowanije litiejnych cechow*. Maszgiz. Moskwa, 1949.
 K. W. Alfepow: *Bunkiernyje ustanowki*. Maszgiz. Moskwa, 1955.
 R. Chudzikiewicz: *Pneumatyczny transport*. Przegląd Odlewnictwa. 1954, nr 7/8.
 D. J. Ciborowski: *Inżynieria chemiczna*. P. W. T., Warszawa, 1952 (część I).
 A. G. Kasatkin: *Podstawowe procesy i aparaty w technologii chemicznej*. P. W. T., Poznań, 1953.
 M. L. Kiselgof: *Pneumatyczny razmot uglej*. G. E. I., Moskwa, 1955.
 G. A. Pattantjus: *Pneumatyczny transport*. Acta Technica, Budapeszt, 1953.
 F. Łęcznar: *Maszyny do przeróbki mechanicznej minerałów*. P. W. T., Łódź, 1955 (część V).
 M. J. Sapażnikow: *Maszyny i aparaty silikotnoej promyszlennosti*. G. I. L., Moskwa, 1955.
 J. Szpak: *Przenośniki*. P. W. T., Poznań, 1953.
Maszynostrojenije. Encyklopedyczny sprawocznik. Tom 9, Moskwa, 1949.



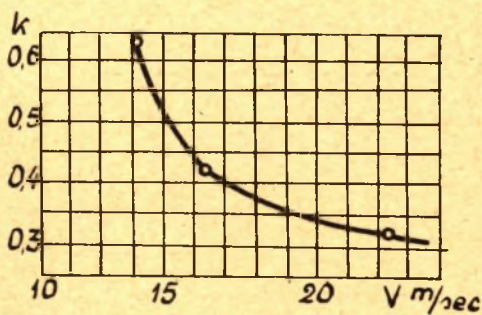
Rys. 1. Schemat urządzenia pomiarowego pneumatycznego transportu



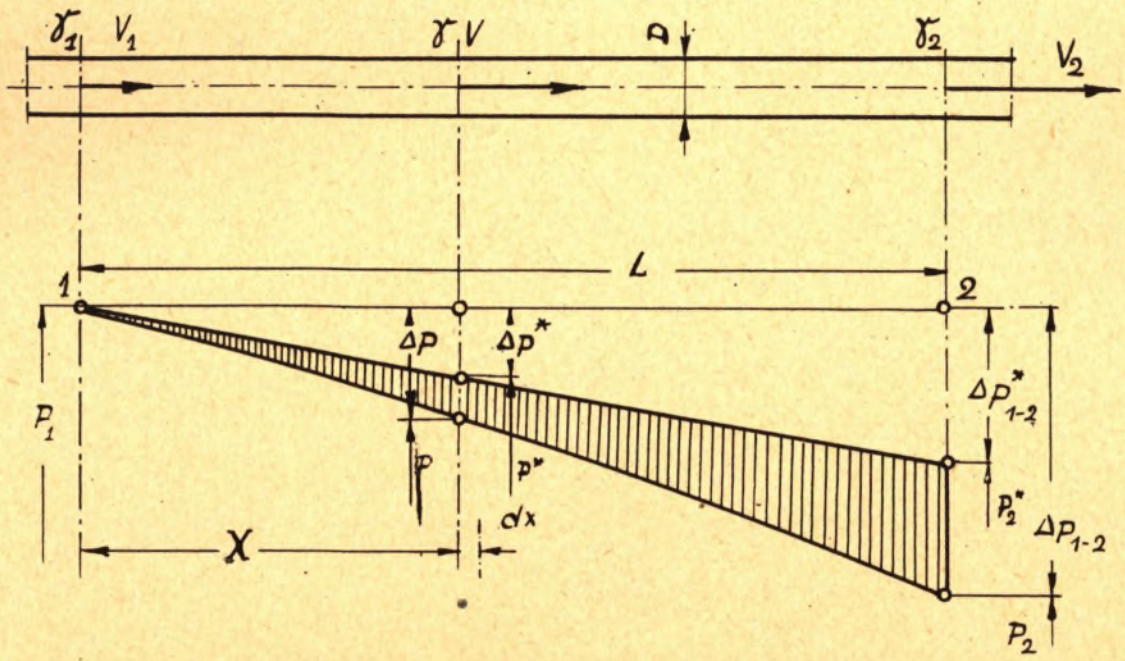
Rys. 2. Zredukowany przekrój powietrza i materiału.



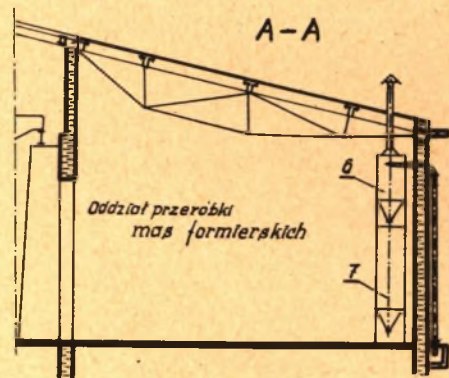
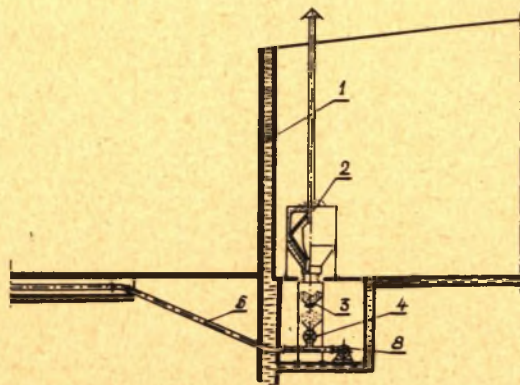
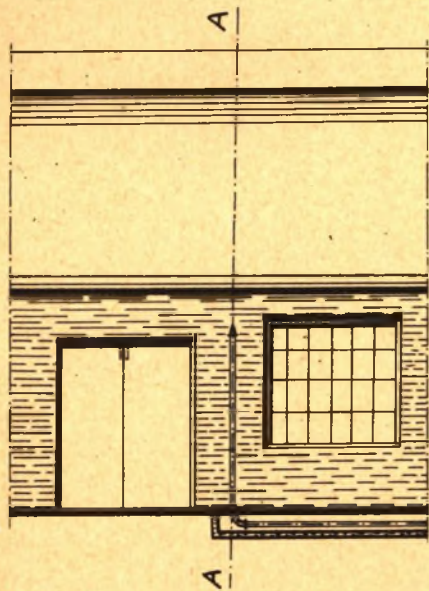
Rys. 3. Schemat ruchu cząsteczki w pionowej rurze



Rys. 5. Zależność współczynnika k od prędkości powietrza



Rys. 4 Spadki ciśnień na długim odcinku



Rys 6 Schemat usytuowania urządzeń pneumatycznego transportu piasku w Katedrze Odlewnictwa
 1 - zasobnik mokrego piasku 2 - suszarka gazowa 3 - zbiornik 4 - zastłoc bębnowy gwiezdziasty 5 - przewody rurowe
 6 - cyklon 7 - zasobnik 8 - wentylator