

Henryk Olejniczak, Zbigniew Piątkiewicz,
Henryk Szluczczyk
Instytut Odlewnictwa Politechniki Śląskiej

TRANSPORT AERACYJNY PIASKU KWARCOWEGO

Streszczenie. W części teoretycznej przedstawiono szereg równań przepływu sfluidyzowanych sypkich materiałów. W wyniku przeprowadzonych badań własnych ustalono optymalne dynamiczne parametry charakteryzujące transport aeracyjny piasku kwarcowego.

Wstęp

Nowoczesne technologie wytwarzania odlewów wymagają pewnych i tanich środków transportu, którymi są z pewnością przenośniki aeracyjne, wykorzystujące fizyczne zjawisko przepływu sprężonego gazu przez ośrodki porowate. Takimi ośrodkami porowatymi są niejednorodny piasek kwarcowy, glina kaolinitowa, bentonit, a więc podstawowe składniki tworzące formę odlewniczą. Dostarczenie tych materiałów nad stanowiska formowania to zadanie przenośników aeracyjnych.

Dotychczasowe prace [1, 2] traktują o przepływach niskich zaerowanych warstw, co ułatwiło przystosowanie równań Hagena-Poiseuille'a, Bernoulliego do napisania uogólniających równań przepływu sfluidyzowanych materiałów sypkich. Autorzy doświadczalnie ustalonymi współczynnikami modyfikowali znane klasyczne równanie przepływu laminarnego cieczy przez prostokątne przekroje. Równania te umożliwiły praktyczne ich wykorzystanie dla niskich warstw i dla określonego rodzaju przepływającego sypkiego materiału.

Uogólnione teoretyczne podstawy transportu aeracyjnego

Fluidyzacja sypkich materiałów jest zjawiskiem fizycznym, będącym wzajemnym oddziaływaniem drobnych stałych cząstek i strugi czynnika fluidyzującego. Gaz czy ciecz przepływając przez ośrodki porowate powodują "upłynnienie" złoża zasypowego. Umożliwia to transport sypkich materiałów suchych przy zastosowaniu odpowiednio skonstruowanych urządzeń. Za naczelne zadanie poznawcze uznano zależności pomiędzy prędkością przepływającego powietrza, spadkiem ciśnienia, ekspansją złoża, lepkością ośrodka sfluidyzowanego oraz współczynnikiem oporu przepływającego złoża sfluidyzowanego.

Ergun i Orning [3] wyprowadzili równanie, umożliwiające obliczenie spadku ciśnienia. Równanie to potwierdzone zostało empirycznie aż do wartości liczby Reynoldsa $Re = v \cdot d/\nu \approx 1000$. Równanie to składa się z części dotyczącej przepływów laminarnych i turbulentnych, a jego konstrukcja odpo-

wiada znanym teoretycznym założeniom dla obliczeń przepływów laminarnych i turbulentnych w rurach o przekroju kołowym. Przyjmując stałą laminarną K_l oraz stałą burzliwości K_t omawiane równanie można napisać w prostej postaci:

$$\frac{\Delta p}{h_o} = K_l \cdot \frac{\eta}{d_k^2} v \cdot \frac{(1 - \epsilon_o)^2}{\epsilon_o^3} + K_t \frac{1}{d_k} \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \frac{1 - \epsilon_o}{\epsilon_o^3} \quad (1)$$

gdzie:

- Δp - spadek ciśnienia na złożu,
- h_o - wysokość spoczynkowa złoża,
- K_l - stała laminarna,
- K_t - stała turbulentna,
- η - współczynnik dynamicznej lepkości powietrza,
- d - średnica ziarna,
- d_k - średnica kuli,
- ν - współczynnik lepkości kinematycznej,
- v - prędkość powietrza,
- ϵ_o - względna objętość międzyziarnowa złoża spoczynkowego,
- ρ - gęstość powietrza,
- ρ_p - gęstość piknometryczna sypkiego materiału,
- Re - liczba Reynoldsa.

Ergun [3] wyznaczył wartości $K_l = 150$ i $K_t = 3,5$, potwierdzające późniejsze pomiary.

Z równania (1) można wyznaczyć prędkość krytyczną fluidyzacji v_k , i tak:

dla przepływu laminarnego

$$v_k = \frac{d_k^2 g (\rho_p - \rho)}{K_l} \cdot \frac{\epsilon_o^3}{1 - \epsilon_o} \quad (2)$$

dla przepływu turbulentnego

$$v_k = \sqrt{\frac{d_k}{K_t} \frac{2g(\rho_p - \rho)}{\rho} \epsilon_o^3}, \quad (3)$$

dla przepływu przejściowego

$$v_k = \sqrt{\frac{K_l}{K_t} \frac{(1 - \epsilon_o)^2}{d_k} + \frac{d_k}{K_t} \frac{2g(\rho_p - \rho)}{\rho} \epsilon_o^3 - \frac{K_l}{K_t} \frac{\nu(1 - \epsilon_o)}{d_k}}. \quad (4)$$

W celu określenia charakteru przepływu złoża sfluidyzowanego należy wyznaczyć współczynnik lepkości dynamicznej η_r , będący funkcją liczby Rey-

noldsaa. Prokopek i Trawiński [4] opracowali empiryczny wzór, umożliwiający wyznaczenie tego współczynnika złoża sfluidyzowanego.

Zależność pomiędzy dynamicznym współczynnikiem lepkości a pozostałymi parametrami charakteryzującymi laminarny przepływ złoża sfluidyzowanego przedstawia równanie:

$$\eta_f = \eta + K_{\eta} \frac{1 - \xi_0}{\xi_0} \cdot \frac{v_k}{d_r^2} \frac{\left(\frac{v}{v_k}\right)^m}{\left(\frac{\Delta h}{h_0}\right)} \quad (5)$$

Przy przepływach złoża sfluidyzowanego w rynnach aeracyjnych należy określić współczynnik oporu przepływu λ . Ogólne równanie pozwalające na wyznaczenie tego współczynnika wyprowadzono na podstawie praw hydrauliki, a jego modyfikację przedstawił Keuneker [5] w postaci:

$$\lambda_f = \frac{64}{\text{Re} \left[1 + 12(a^*/D_h) \right]} \quad (6)$$

gdzie:

- λ - współczynnik oporu przepływu,
- ϕ - współczynnik kształtu ziarna wg Levy,
- a^* - współczynnik poślizgu,
- D_h - średnica hydrauliczna.

Dla celów użytkowych, przy przepływach złoża sfluidyzowanego w rynnach aeracyjnych o prostokątnym przekroju kanału transportowego, współczynnik oporu przepływu można obliczyć z zależności:

$$\lambda_R = \text{tg} \alpha \frac{2g}{v_m^2} \frac{4F}{U} \quad (7)$$

gdzie:

- λ_R - współczynnik oporu przepływu sfluidyzowanego materiału w rynnach aeracyjnych,
- α - kąt pochylenia rynn aeracyjnych,
- g - przyspieszenie ziemskie,
- F - poprzeczny przekrój płynącej warstwy,
- U - obwód zwilżony,
- v_m - minimalna prędkość przepływu sfluidyzowanego materiału.

Znajomość podstawowych wielkości złoża sfluidyzowanego pozwoliła na napisanie uogólniających równań przepływu warstwy fluidalnej. W tej mierze Farský [6] na podstawie analizy bezwymiarowej opracował równanie empiryczne,

$$\frac{\Delta p_k}{\rho_p \cdot s \cdot g} = f \left[\frac{\dot{Q}}{K_p (d_m \cdot \rho_p \cdot g)^2}, \frac{\rho_{su}}{\rho_p} \right], \quad (8)$$

gdzie:

- s - grubość dna porowatego,
- K_p - współczynnik przepuszczalności powietrza,
- d_m - średnia arytmetyczna średnica ziarna,
- ρ_{su} - gęstość nasypowa materiału,
- \dot{Q} - masowe natężenie przepływu materiału,

pozwalające wyznaczyć wydajność rynień aeracyjnych przy znanym spadku ciśnienia Δp_k w skrzyni powietrznej. Parsky nie uwzględnił jednak wysokości płynącej warstwy sfluidyzowanego materiału sypkiego. Próbował to uczynić Chandelle [6], proponując obliczenia wydajności przenośników aeracyjnych z zależności:

$$\dot{Q} = A \cdot b^x \cdot h^y \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

gdzie:

- b - szerokość rynny aeracyjnej,
- h - wysokość warstwy,
- x, y - wykładniki potęgowe.

Uwzględniając proporcję między wysokością h upłynnionej warstwy a szerokością b rynny aeracyjnej można obliczyć jej wydajność z zależności:

dla $h \ll 0,5 b$

$$\dot{Q} = A \cdot b \cdot h^3 \cdot \sin \alpha,$$

dla $h \cong 0,5 b$

$$\dot{Q} = A \cdot b^2 \cdot h^2 \cdot \sin \alpha,$$

dla $h > 0,5 b$

$$\dot{Q} = A \cdot b \cdot h^3 \cdot \sin \alpha,$$

Autor równania (9) podając ogólnie, że wartości współczynnika A zależą od własności fizycznych materiału, nie wyodrębnił wielkości, które można w znany sposób obliczyć na podstawie wzorów teoretycznych sprawdzonych w praktyce. W oparciu o klasyczne równanie Hagena, Poiseuille'a [7] przepływu cieczy w rurociągu Hopf, Straub i Perry [8] opracowali równanie:

$$\dot{Q} = \frac{h^2 \cdot b^2 \cdot \rho_f^2 \cdot g \cdot \sin \alpha}{\eta_f} \cdot n_{g1} (h/b), \quad (10)$$

gdzie funkcja empiryczna $n_{g1} (h/b)$ posiada postać $1/12 (h/b)$. Równanie to wg Hopfa ważne jest jednak tylko dla liczb Reynoldsa poniżej 1300, przy czym Re_f zdefiniowano przy pomocy średnicy hydraulicznej kanału transportowego rynny aeracyjnej:

$$Re_f = \frac{D_h \cdot v_m \cdot \rho_f}{\eta_f} \quad (11)$$

gdzie:

Re_f - liczba Reynoldsa dla przepływu sfluidyzowanej warstwy,

ρ_f - gęstość warstwy sfluidyzowanej,

η_f - współczynnik lepkości złoża sfluidyzowanego,

przy czym:

$$D_h = 4 \frac{b \cdot h}{b + 2h}, \quad (12)$$

W oparciu o analizę znanego równania przepływu Bernoulliego, Keuneker [5] opracował zależność:

$$\dot{Q} = \frac{g \rho_f \cdot \text{tg} \alpha}{4 \cdot \phi \cdot \eta_f} \cdot (U)^2 \quad (13)$$

gdzie:

$$\rho_f = \frac{\rho_p (1 - \epsilon_0)}{h/h_0}; \quad (14)$$

ϕ - współczynnik kształtu wg [9].

Wartości natężenia masowego przepływu wyliczone z równania (13) są zbliżone do wyników uzyskanych doświadczalnie.

Analizując dane literaturowe, podjęto badania rynny aeracyjnej systemu POLKO, w której możliwy był transport fluidalny o znacznych wysokościach warstwy sfluidyzowanej, pamiętając, że prędkość krytyczna fluidyzacji jest prawie jednakowa dla każdej wysokości złoża fluidalnego. Zużycie powietrza na tonę przetransportowanego materiału będzie mniejsze przy wyższych optymalnych wysokościach warstwy sfluidyzowanej.

Badania własne

Badania rozpoczęto od wyznaczenia charakterystyk fluidyzacji dla złoża piasku kwarcowego o oznaczonych frakcjach.

Zależność od spadku ciśnienia na złożu Δ_{Pz} od prędkości powietrza v , wyznaczono przy pomocy aparatów fluidyzacyjnych (rys. 1). Fluidyzatory zbudowane są ze skrzyń powietrznych 1 i pojemników na piasek kwarcowy 3. Obie części oddzielone były wkładką dyfuzyjną 2, wykonaną z płótna żaglowego typu TOR-Ż 1563. Pomiarów ciśnienia dokonano przy pomocy manometrów różnicowych typu MUR-1200.

Tablica 1

Wyniki analizy sitowej piasku kwarcowego

Wielk. sita	Waga (g)	Waga (g)	Waga (g)	Waga sred. (g)	X_i (%)	d_i (mm)
1,6	0,09	0,12	0,10	0,103	0,21	1,6
1,0	0,30	0,30	0,32	0,306	0,61	1,3
0,80	1,35	1,22	1,32	1,293	2,58	0,9
0,63	1,19	1,48	1,27	1,313	2,63	0,71
0,40	6,35	6,64	6,52	6,503	13,0	0,51
0,32	0,69	7,79	7,45	7,310	14,6	0,36
0,20	16,54	16,35	16,45	16,446	32,9	0,26
0,16	9,45	8,64	9,10	9,063	18,13	0,18
0,10	5,43	5,06	5,10	5,203	10,4	0,13
0,071	1,71	1,70	1,60	1,670	3,3	0,085
0,056	0,35	0,38	0,35	0,360	0,72	0,063
denko	0,09	0,07	0,08	0,080	0,16	0,020

Zawartość lepiszcza wynosi 0,83%. Frakcjami głównymi są 0,20/0,16/0,32. Dla badanego piasku przyjęto oznaczenie 1K - 0,20/0,16/0,32 M - 66-1350.

Mierzone były wartości ciśnień:

- w skrzyniach powietrznych 1,
- tuż nad wkładką porowatą przy pomocy rurek pneumometrycznych 6,
- na różnych wysokościach warstwy piasku kwarcowego.

Natężenie przepływu mierzone przy pomocy rotametrów typu ROL:

- dla fluidyzatora prostopadłościennego ROL-165,
- dla fluidyzatora cylindrycznego ROL-252.

Wartości zmian wysokości odczytywane były na skalach arytmetycznych 4. Charakterystykę niektórych wkładek porowatych wyznaczono na aparacie do badania przepuszczalności powietrza typ ATL-2 (EF-12) produkcji węgierskiej.

Uzyskane wyniki były podstawą do skonstruowania rynny aeracyjnej i wykonania stanowiska pomiarowo-badawczego. Niektóre własności fizyczne badanego piasku kwarcowego podano w tablicy 2.

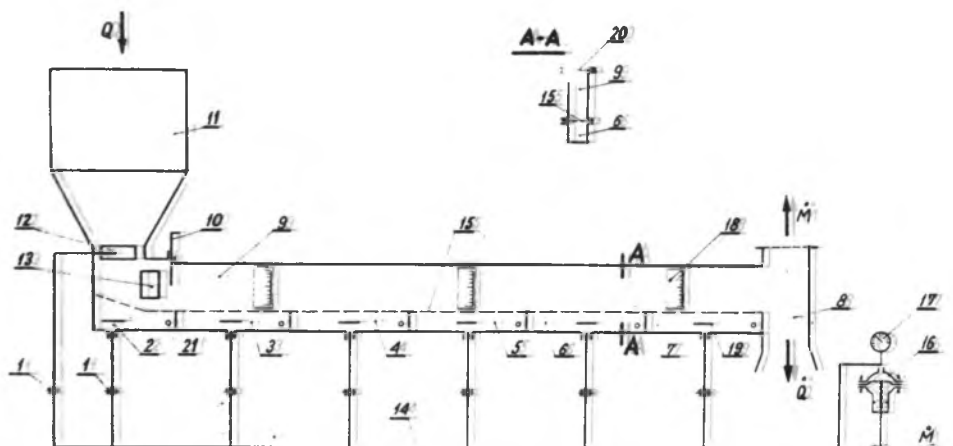
Tablica 2

Własności fizyczne piasku kwarcowego

ρ_p kg/m ³	ρ_u kg/m ³	d_m mm	d_r mm	d_v mm	B rd	ζ_o	S_w cm ² /g	S_t cm ² /g	w_k
2625	1439	0,3069	0,2274	0,166	0,45378 (26°)	0,452	98,175	37,05	1,72

gdzie:

- ϕ - kąt tarcia wewnętrzznego stosu ziarna,
- S_w - powierzchnia właściwa ziarna,
- S_t - teoretyczna powierzchnia właściwa ziarna,
- W_k - współczynnik kształtu ziarna wg Hoffmana [10].



Rys. 2. Schemat układu rynny aeracyjnej o długości $l = 13$ m, szerokości $b = 0,05$ m i wysokości kanału transportowego $h = 0,4$ m

Wykonano prototypową rynnę aeracyjną o długości $l = 13,5$ m, szerokości $b = 0,05$ m i wysokości kanału transportowego $h = 0,4$ m. Rynna aeracyjna (rys. 2) zbudowana jest z segmentów o długości $2,5$ m każdy. Skrzynie powietrzne 2, 3, 4, 5, 6, 7 oraz skrzynia aeracyjna 12 zasilane są oddzielnie. Kształt zbiornika 11 zasilającego [11, 12] kanał transportowy 9 został ustalony na stanowisku laboratoryjnym. Pomiedzy kanałem transportowym 9, a skrzyniami powietrznymi znajduje się wkładka porowata 15. Na bocznych ścianach kanału transportowego 9, wmontowano okienka z metaplexu 18, umożliwiające obserwację zachowania się materiału. Na okienkach umieszczono skalę arytmetyczną, aby można było odczytać wysokość płynącej warstwy sfluidyzowanej. Kanał transportowy 9 przykryty był od góry tkaniną filtracyjną 20 typu ET-3. Sprężone powietrze płynie do skrzyń powietrznych poprzez krzyże 1. Na rurociągu głównym 14 umieszczono zawór regulacyjny normalnie otwarty typ 37-20251 stałoprocentowy z grzybkim konturowym i otworem przelotowym o średnicy 36 mm. Zawór regulacyjny 16 ustala ciśnienie powietrza w rurociągu 14. Wartość tego ciśnienia odczytywano na manometrze z rurką Burdona 17. Przed dynamicznym oddziaływaniem powietrza na wkładkę porowatą zabezpieczały płytki 19, umieszczone naprzeciw otworów wlotowych. Każda skrzynia powietrzna zaopatrzona była w króćce 21, po-

zwalające na podłączenie manometru. Rynna aeracyjna systemu POLKO zakończona była wysypem 18. Pochylenie rynny aeracyjnej można było zmieniać w zakresie od 0-2° stopni.

W oparciu o wyniki badań i obliczenia ustalono optymalne parametry pracy rynny aeracyjnej (tablica 3).

Obliczenia wykonano przy pomocy maszyny elektronicznej HEWLETT PACKARD 9800 MODEL 30 A według uprzednio ułożonego programu.

Tablica 3

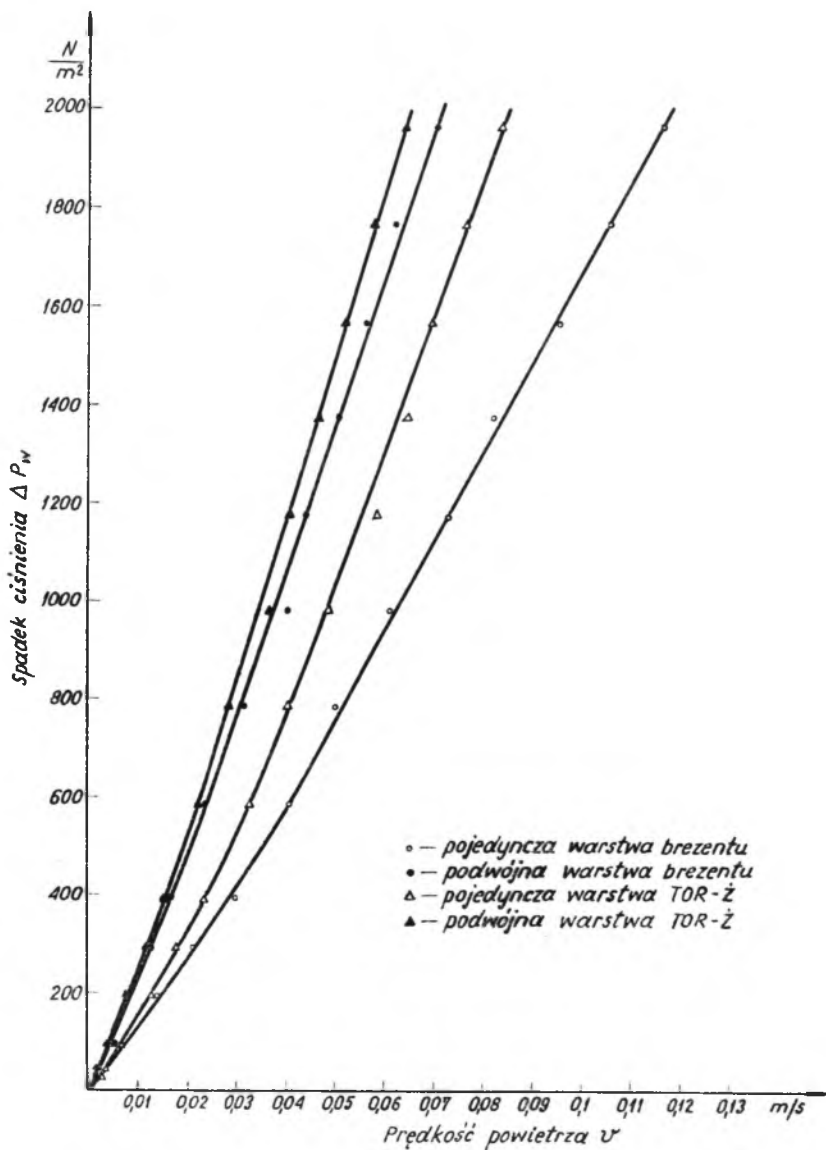
Optymalne parametry pracy rynny aeracyjnej badanego piasku kwarcowego

Lp.	Wielkości obliczone	Kąty pochylenia rynny aeracyjnej	
		$\alpha = 0$	$\alpha = 2^\circ$
1	Q [kg/s]	7,5	15,2
2	M [kg/h]	387,1	412,4
3	V [m ³ /h]	169,6	193,8
4	V _N [Nm ³ /h]	303,4	370,0
5	V _t [m ³ /t]	6,26	4,36
6	V _{tN} [Nm ³ /t]	11,21	6,56
7	F _F [m ³ /m ²]	272,9	395,39
8	V _{FN} [Nm ³ /h.m ²]	487,8	595,29
9	E [k/t]	812,9	358,8
10	E [k/h/t]	0,258	0,099
11	Pzas [at]	1,14	0,80

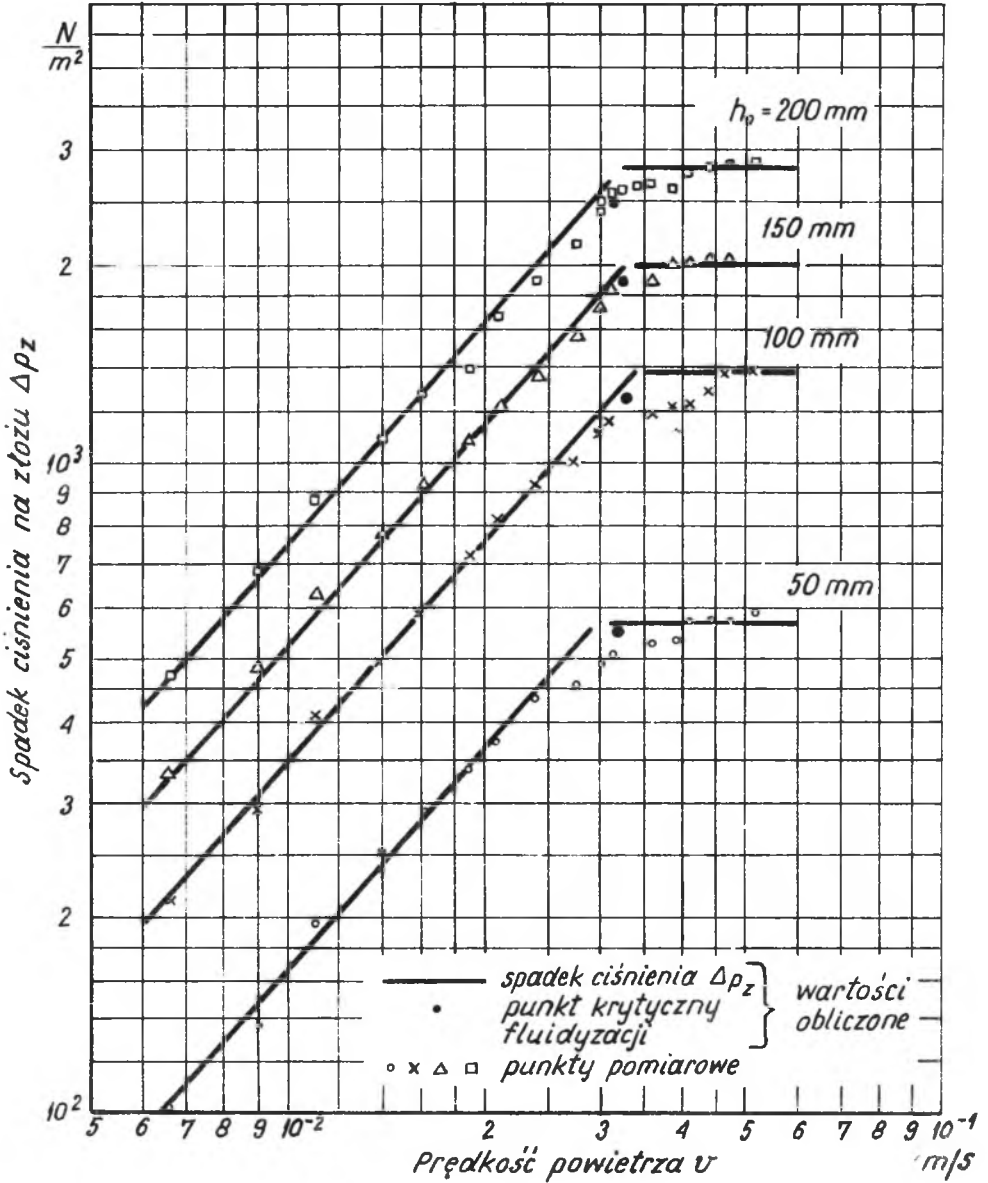
Optymalne warunki przepływu uzyskano dla średnicy przelotowej kryz 1 (rys. 2) równej 8 mm.

Analiza wyników

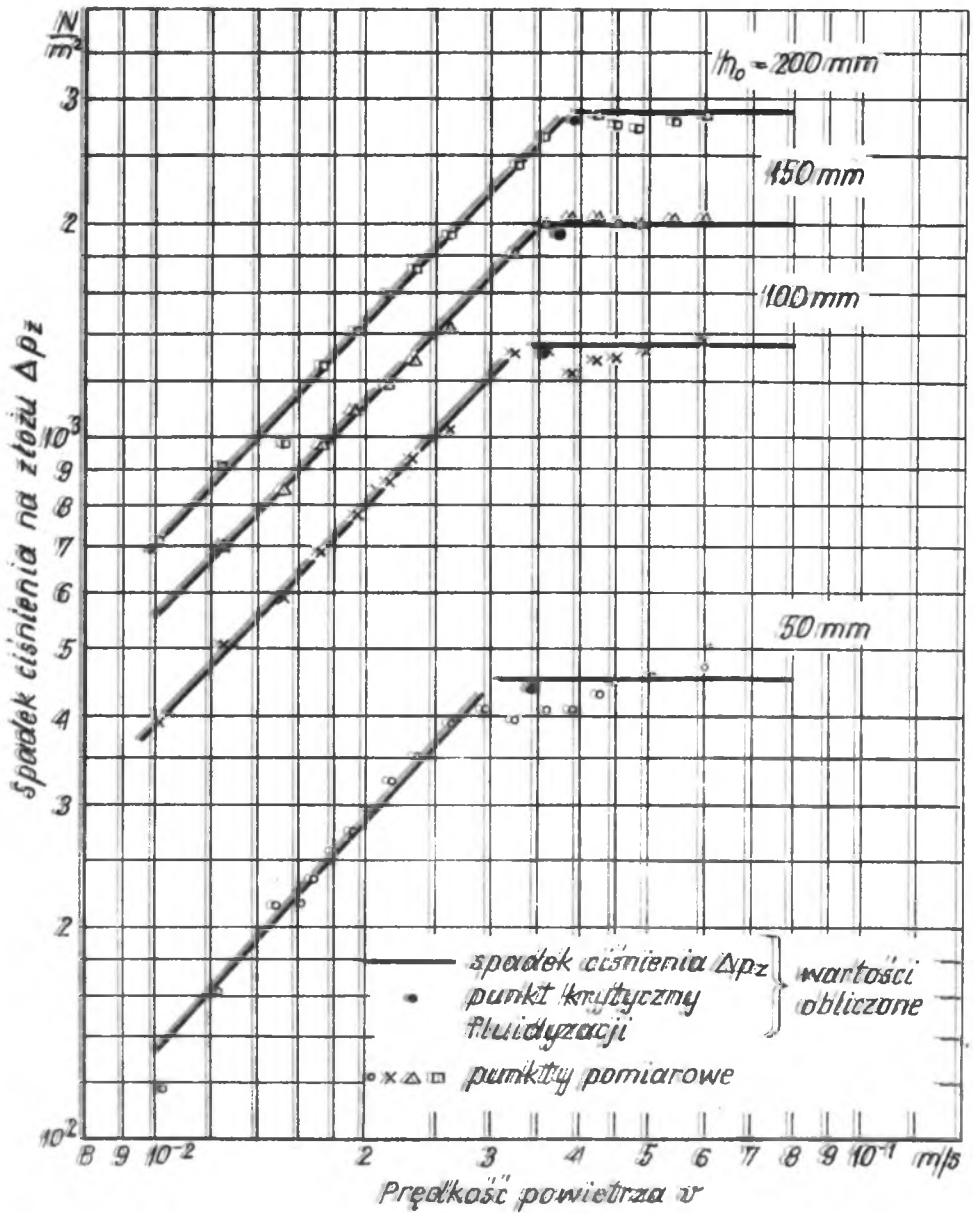
W wyniku badań przepuszczalności wkładek porowatych największym współczynnikiem oporności przepływu powietrza $K_{\Delta p} = \frac{\Delta P_w}{V} \frac{N}{m^2} \frac{m^2}{m/s}$ charakteryzuje się tkanina torlenowa typu TOR-Ż-1563. Współczynnik ten dla pojedynczej wkładki wykonanej z tkaniny TOR-Ż wynosi 25 333, gdy tymczasem dla brezentu technicznego typu "Kahki" wynosi tylko 13666. Poza tym tkanina torlenowa nie absorbuje wilgoci i wytrzymuje temperaturę 553°K. Charakterystyki przepuszczalności pojedynczych i podwójnych warstw badanych tkanin przedstawiono na rys. 3. Zależności spadku ciśnienia Δp_z na złożu badanego piasku kwarcowego 1 K-0,20/0,16/0,32 M-66-1350, od prędkości powietrza v przedstawiają rys. 4 i 5 odpowiednio dla: fluidyzatora, cylindrycznego i prostopadłościennego. Prędkość krytyczna fluidyzacji wyznaczona we fluidyzatorze cylindrycznym jest jednakowa dla wszystkich badanych wysokości spoczynkowych warstw h_0 . Natomiast prędkość krytyczna fluidyzacji wyznaczona we fluidyzatorze prostopadłościennym nieznacznie się zwiększa ze



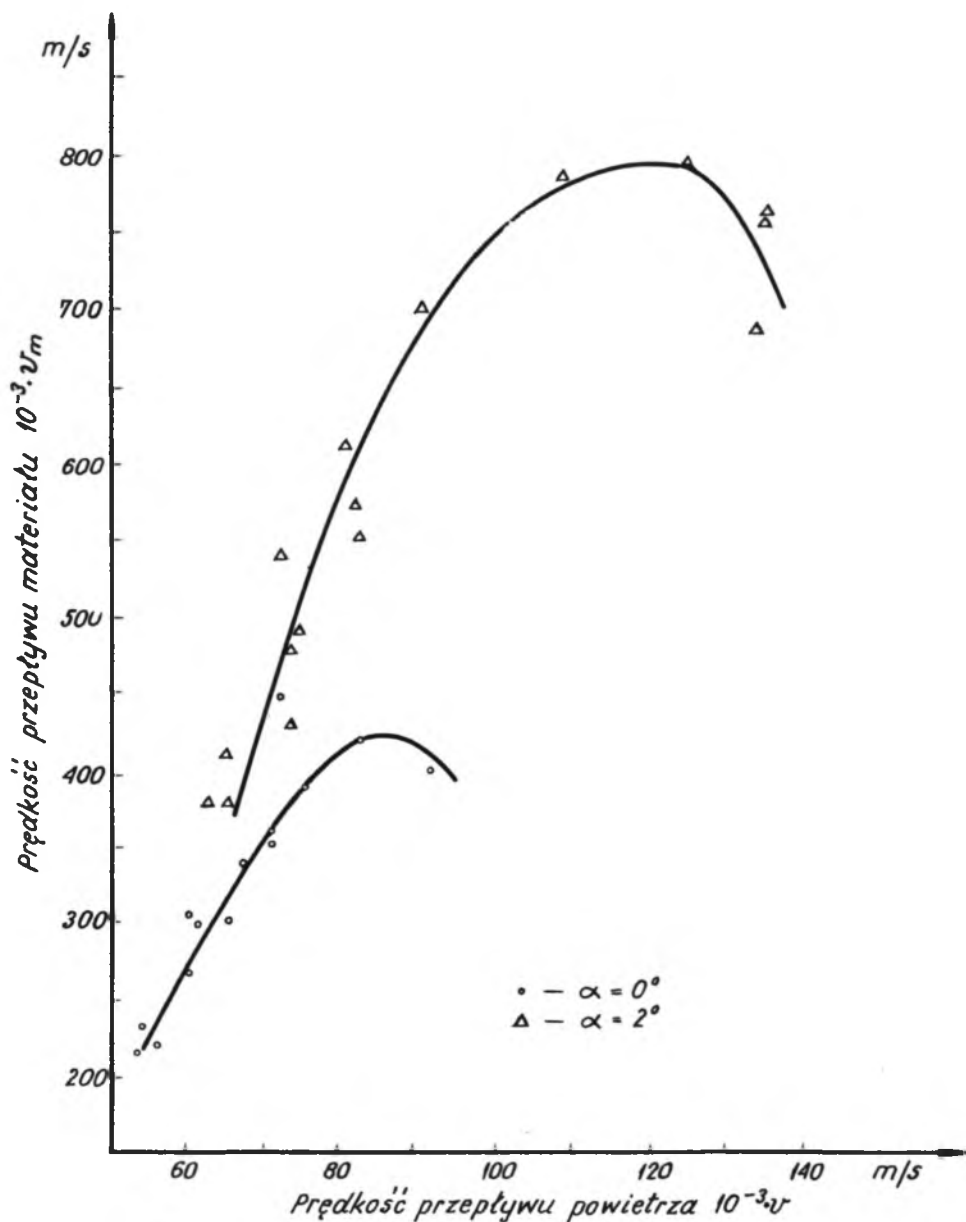
Rys. 3. Spadek ciśnienia ΔP_w na wkładkach porowatych w funkcji prędkości przepływu powietrza v



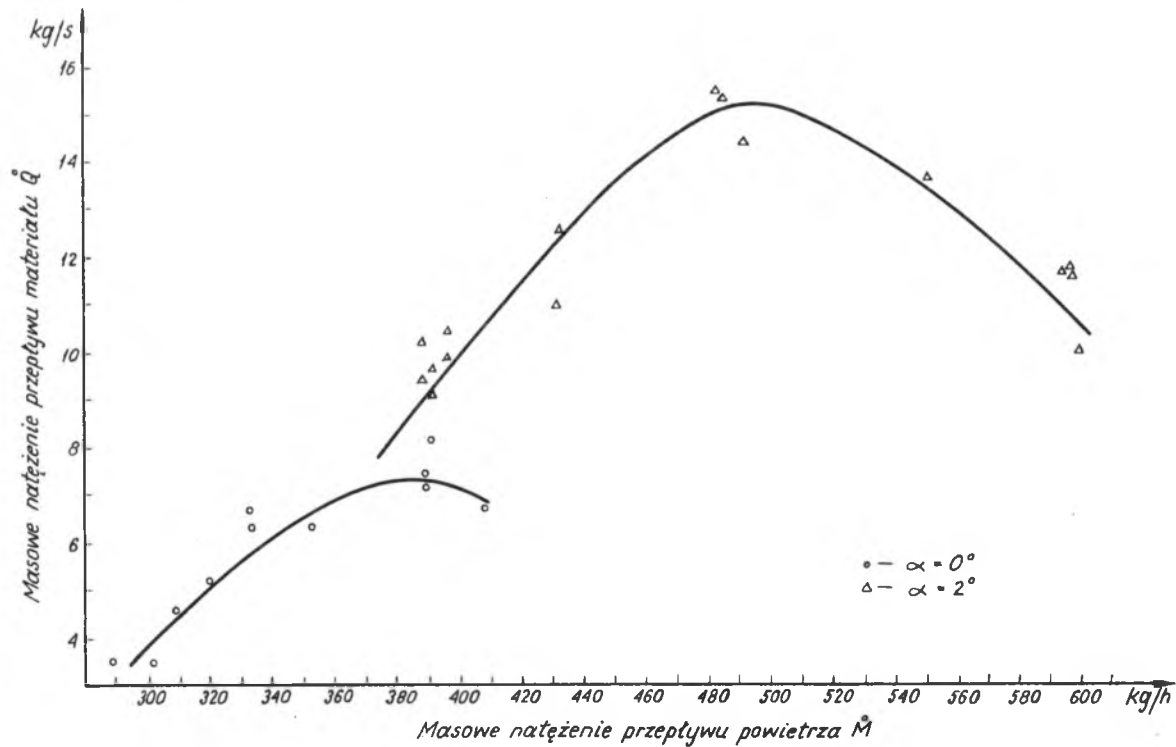
Rys. 4. Zależność spadku ciśnienia Δp_z na złożu piasku kwarcowego 1K-0,20/0,16/0,32 M-66-1350, od prędkości powietrza v . Fluidyzator cylindryczny $D_F = 0,292 \text{ m}$



Rys. 5. Zależność spadku ciśnienia Δp_z na złożu piasku kwarcowego 1K-0,20/0,16/0,32 M-66-1350, od prędkości powietrza v . Fluidyzator prostopadłościenny $F = 0,04 \text{ m}^2$



Rys. 6. Prędkość transportowanego materiału w rynnie aeracyjnej w funkcji prędkości przepływu powietrza.



Rys. 7. Natężenie masowe przepływu transportowanego materiału w funkcji masowego natężenia przepływu powietrza

wzrostem wysokości nasypowych h_0 . Wynika to ze wzrostu udziału powierzchni bocznej fluidyzatora prostopadłościennego w stosunku do czynnej powierzchni wkładki porowatej.

Na podstawie wyników badań i obliczeń dynamicznych parametrów przepływu materiału sfluidyzowanego w kanale transportowym rynny aeracyjnej systemu POLKO ustalono zależność średniej prędkości przepływu materiału od średniej prędkości przepływu powietrza. Zależność tę przedstawiono graficznie (rys. 6) dla pochyień rynny aeracyjnej 0 i 2 stopnie. Wzrost prędkości przepływu powietrza przez ośrodek porowaty ponad wartość optymalną powoduje zmniejszenie średniej prędkości przepływu piasku kwarcowego. Optymalne wartości funkcji masowego natężenia przepływu materiału \dot{Q} i powietrza \dot{M} widoczne są także na rys. 7. Wartości liczbowe powyższych optymalnych parametrów podano w tablicy 3.

Wnioski

Równomierny rozkład strugi powietrznej aerującej piasek kwarcowy zapewnia:

- podział skrzyni powietrznej na niezależnie zasilane komory powietrzne,
- zastosowanie dysz wlotowych,
- zastosowanie wkładki porowatej o niewielkiej przepuszczalności,
- odprowadzenie powietrza na całej długości kanału transportowego rynny aeracyjnej,
- zastosowanie automatycznego układu regulacji ciśnienia powietrza w rurociągu zasilającym instalację rynny aeracyjnej.

Optymalne wydajności rynny aeracyjnej osiąga się dla średnicy przelotowej kryzy 1 (rys. 2) równej 8 mm, i tak dla kąta pochylenia rynny aeracyjnej $\alpha = 0$

$$\dot{Q}_{op} = 7,5 \text{ kg/s przy } \dot{M}_{op} = 387,1 \text{ kg/h, natomiast dla } \alpha = 2^\circ$$

$$\dot{Q}_{op} = 15,2 \text{ kg/s przy } \dot{M}_{op} = 412,4 \text{ kg/h.}$$

LITERATURA

1. Ciborowski J.: Flzidyżacja, PWT Warszawa, 1957.
2. Frąsky L.: Fluidační žlab-nový způsob dopravy materiálu v chemickém průmyslu, Chemický průmysl, roč IV/29, 1954.
3. Ergun S., Orning A.: Fluid flow through rand-omly pacled columns and fluidized beds, Industr. Engng, Chem. 41, 1949, nr 6.
4. Trawiński H.: Effektive Zähigkeit und Inhomogenität von wirbelschichten Chemie Ing.-Techn. 25/6 1953.
5. Keuneke K.: Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern kleiner Teilchengröße, VDI Forschungsheft, 509, 1965.
6. Chandelle V.: Manutention de produits granuleux par airestides. Annales de Mines de Belgique 1971.
7. Prandtl D.: Dynamika przepływów, PWT Warszawa, 1956.

8. Davidson J.F.: Fluidization, Academii Press, London and New York, 1971.
9. Leva M.: Fluidization, McGraw-Hill, Book Company, London, 1959.
10. Sakwa W., Wachelko M.: Teoria i praktyka technologii materiałów formierskich, Wyd. "Śląsk", Katowice, 1971.
11. Olejniczak H.: Urządzenia fluidyzacyjne w Odlewnictwie, WZO STOP, Gliwice, 1971.
12. Sakwa W., Piątkiewicz Z., Olejniczak H.: Wpływ kształtu geometrycznego zbiornika zasilającego rynnę aeracyjną na dynamikę przepływu sfluidyzowanego materiału, materiały konferencyjne "Termofluid", Częstochowa, 1973.

МЕХАНИКА ТРАНСПОРТА КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

Резюме

В теоретической части предлагается ряд уравнений течения флюидизированных сыпучих материалов. В результате проведенных в рамках работы исследований были определены оптимальные динамические параметры характеризующие аэрационный транспорт кварцевого песка.

AERATOR HANDLING OF QUARTZ SANDS

Summary

In the theoretical part a number of equations of the flow of fluidized loose materials have been presented. As a result of the conducted own investigations the optimum dynamic parameters have been established characterizing aerator handling of quartz sands.