

Jan SYPOSZ

Politechnika Wrocławska
Instytut Inżynierii Chemicznej
i Urządzeń Ciepłych

BADANIA STRAT CIŚNIENIA W ŁUKACH INSTALACJI TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania wpływu na współczynnik oporu dodatkowego łuku takich wielkości, jak: masowe natężenie przepływu materiału, prędkość powietrza, średnica gięcia łuku, średnica ziarna, współczynnik tarcia materiału o ściankę łuku, prędkość unoszenia ziarna, kształt ziarna, gęstość ziarna, kąt zmiany kierunku łuku, rodzaj materiału użytego do wykonania łuku i zdolność elektrostatycznego ładowania materiału. Na bazie wyprowadzonych równań kryterialnych i przeprowadzonych badań eksperymentalnych opracowano nowe formuły do obliczeń współczynnika oporu miejscowego łuków instalacji transportu pneumatycznego.

1. Wstęp

Rozwój rozwiązań konstrukcyjnych instalacji transportu pneumatycznego oraz ich pełna automatyzacja znacznie wyprzedzają znajomość zjawisk występujących przy przepływach mieszanin dwufazowych gaz - ciało stałe.

W ostatnich latach podejmuje się próby dokładnego prześledzenia wzjawisk zachodzących w transporcie pneumatycznym i ujęcia ich w uogólnione równania, uwzględniające wszystkie warunki i parametry mogące wpływać na przebieg tych zjawisk.

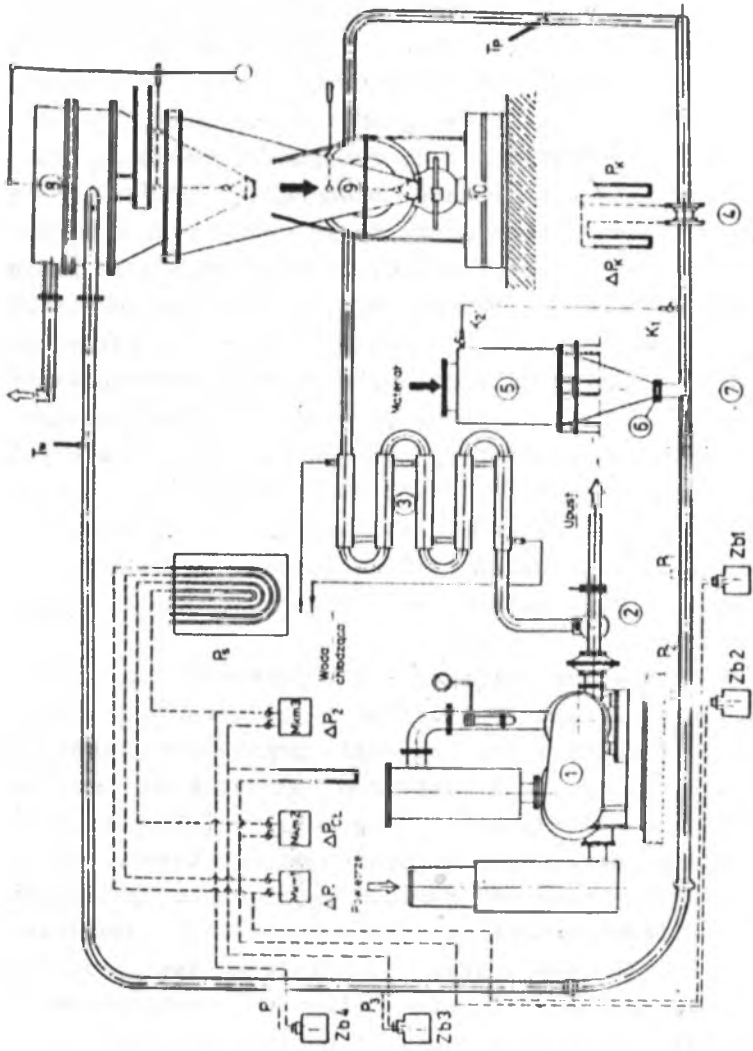
Zadanie to jest jednak trudne do zrealizowania tak pod względem teoretycznym jak i doświadczalnym ze względu na dużą liczbę parametrów przepływu. Odnosi się to szczególnie do strumieni krzywoliniowych, potykanych m.in. w urządzeniach odpylających, klasyfikatorach i łukach instalacji pneumatycznych.

Urządzenia do zmiany kierunku przepływu mają decydujący wpływ na ogólną stratę ciśnienia w rozgałęzionej instalacji transportu pneumatycznego. Niewłaściwy dobór promienia gięcia może niepotrzebnie zwiększyć zużycie energii na napęd urządzeń podających powietrze oraz doprowadzić do awarii wskutek szybkiego zużycia łuku. Powszechność występowania przepływów dwufazowych gaz - ciało stałe nie tylko w transporcie na odległość ale także w procesach technologicznych wielu gałęzi przemysłu jest powodem ciągłego zainteresowania tym problemem.

Próby zbadania i teoretycznego opracowania przepływów w łukach podejmowano w: [1], [2], [3], [4], [5], [7], [8], jednak wyniki ich prac są w dużym stopniu rozbieżne. Badania prowadzone przez nich ograniczały się zwykle do wybranego materiału, jak np. pszenica, piasek i wąskiego zakresu warunków transportu, uniemożliwiając porównanie uzyskanych wyników. Znając doświadczenia i trudności jakie napotykali w pracy nad tym tematem autorzy cytowanych publikacji podjęto próbę wykonania nowych, bardzo szerokich badań, których wyniki zawarto w tym opracowaniu.

2. Opis instalacji doświadczalnej

Powietrze tłoczy do instalacji dmuchawa rotacyjna 1, typu DRT3. Regulacja ilości powietrza podawanego do transportu pneumatycznego odbywa się przy pomocy dwu przepustnic 2; dławiącej i upustowej. Ogrzane powietrze w czasie sprężania chłodzone jest dwustrefową chłodnicą 3. Za chłodnicą na prostym przewodzie aluminiowym zainstalowano kryzę pomiarową 4 typu ISA z przytarczowym punktowym odbiorem ciśnienia, wykonaną zgodnie z PN-65/M-53950. Materiał podawany jest do instalacji podajnikiem komorowym. W skład podajnika wchodzi szczelnie zamykany zbiornik ciśnieniowy 5, z wymienną kryzą 6, regulującą ilość materiału "spływającego" grawitacyjnie do inżektora 7. Zadaniem inżektora jest wytworzenie jednorodnej mieszaniny powietrza i materia-



Rys.1. Schemat instalacji doświadczalnej

ku oraz niedopuszczenie do pulsacyjnego odbioru materiału spod kryzy 6. Dla każdego materiału dobierano doświadczalnie, metodą prób, minimalną średnicę kryzy, przy której materiał "wypływał" w sposób stabilny. Zwiększenie natężenia podawanego materiału uzyskiwano przez wymianę kryz z otworami stopniowanymi co 0,5 mm. Dalsze zwiększenie intensywności wypływu materiału ze zbiornika i uzyskiwano przez regulację ciśnienia powietrza doprowadzonego przewodem obejściowym po otwarciu kurków K_1 i K_2 . Parametry geometryczne iniektora były każdorazowo dopasowywane do wymaganych warunków transportu, tj. ilości i rodzaju podawanego materiału oraz ilości przepływającego przez dyszę powietrza. Konstrukcja iniektora 7 umożliwia wymianę gardzieli oraz zmianę średnicy wylotowej końcówki dyszy. Gwintowe połączenie końcówki dyszy z dyszą główną pozwalało na ustawienie optymalnej odległości pomiędzy wylotem z dyszy a wlotem do gardzieli. W cyklonie 8, połączonym z filtrem tkaninowym, materiał oddzielany jest od powietrza i kierowany do spoczywającego na wadze 10 zbiornika 9. Zbiorniki 8 i 9 połączone elastycznie i wyposażono w zamknięcia dzwonowe. Duża średnica cyklonu 8 powoduje zmniejszenie prędkości ruchu ziarna i zabezpiecza je przed pękaniem i ścieraniem.

Odbiór ciśnień statycznych z przewodów instalacji odbywał się przez nawiercone i połączone z króćcem otwory o średnicy 2 mm. Ponieważ przykładowo zmierzone ciśnienia statyczne w czterech punktach na obwodzie przewodu nie różniły się między sobą, w dalszych pomiarach odbierano ciśnienie tylko jednego otworu w danym przekroju. Na gumowych rurkach impulsowych łączących przewód transportowy z mikromanometrem umieszczono zbiorniki kompensacyjne, zabezpieczające przyrząd przed zanieczyszczeniem się pyłem oraz ułatwiające odczyt ciśnień dzięki kompensacji chwilowych wahań /wahania te występują szczególnie podczas transportu niestabilnego w zakresie niskich prędkości powietrza/.

3. Materiały ziarniste użyte w badaniach eksperymentalnych

Wykonanie zamierzonego programu badań wymagało wielokrotnego obiegu stosowanych materiałów w przewodach instalacji z gwarancją pełnej powtarzalności wyników pomiarów dla tych samych warunków transportu. Warunek ten mógł być spełniony jedynie przy materiałach nie zmieniających swych własności w czasie transportu, tj. zachowujących ten sam kształt, wymiary, gęstość, wilgotność, sprężystość, stan powierzchni ziarna, a także oddziaływujących w sposób nie niszczący na powierzchnię wewnętrzną rur instalacji badawczej. Najpełniej spełniają te warunki granulaty tworzyw sztucznych. Odnóżają się one również dużą jednorodnością wymiarów i podobieństwem kształtu ziaren, wynikającymi z technologii ich wytwarzania. Stosowane również w badaniach nasiona zbóż posiadają bardziej zróżnicowane rozmiary i kształty ziaren w tym samym gatunku.

Ważniejsze parametry badanych materiałów zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Zestawienie materiałów stosowanych w badaniach

Lp	Nazwa materiału i kształt ziarna	d_s	ρ_s	w_u	Re_u	f_s
		mm	kg/m ³	m/s	-	-
1	Gorzycza	1,15	1160	5,22	400	0,51
2	Pszenica	3,87	1380	8,5	2193	0,46
3	Proso	2,06	1240	7,25	996	0,29
4	Kukurydza	7,26	1350	12,6	6195	0,43
5	Lubin	7,0	1340	11,8	5507	0,37
6	Polistyren-pastyłki	3,4	1040	8,77	2020	0,40
7	Polistyren-prostopadłościan	3,08	1040	7,6	1560	0,52
8	Polistyren-walec	2,42	1050	6,54	1050	0,51
9	Polistyren-kulisty /styropian do spieniania/	0,225	1040	-	-	-
		-5,5	"	-	-	-
		3,33	"	8,81	1950	0,08
		1,68	"	6,16	690	0,24
		1,02	"	4,26	290	0,33
		0,75	"	3,0	150	0,36

4. Metodyka opracowania wyników pomiarów

Całkowitą stratę ciśnienia gazu na odcinku pomiarowym zawierającym łuk oraz prosty odcinek poziomy i pionowy możemy zapisać w postaci sumy poszczególnych strat ciśnienia:

$$\Delta P_{MC} = \Delta P_{ML} + l_{pz} \cdot \Delta P_{JM}^{pz} + l_{pn} \cdot \Delta P_{JM}^{pn} \quad /1/$$

Podstawiając do wzoru /1/ uzyskane w pomiarach wartości ΔP_{MC} , l_{pz} , l_{pn} , ΔP_{JM}^{pz} i ΔP_{JM}^{pn} obliczano stratę ciśnienia na łuku ΔP_{ML} a następnie współczynnik oporu łuku ζ_M i ψ_M .

$$\psi_M = \frac{D}{1_L} \cdot \zeta_M = \frac{\Delta P_{ML}}{\frac{1_L}{D} \cdot \frac{w^2}{2}} \quad /2/$$

Końcową poszukiwaną wielkością był współczynnik oporu dodatkowego łuku ψ_S lub ζ_S obliczony jako:

$$\psi_S = \psi_M - \psi \quad \text{lub} \quad \zeta_S = \zeta_M - \zeta, \quad /3/$$

przy czym wartość współczynnika oporu łuku ψ , ζ przy przepływie czystego powietrza obliczano ze wzorów opracowanych dla każdego łuku oddzielnie, a uzyskanych przez korelację własnych wyników badań [6].

5. Aproksymacja wyników badań

Podstawą do zbudowania prawa oporu w łukach instalacji pneumatycznej było wyprowadzone przy pomocy analizy wymiarowej równanie /4/:

$$\psi_S = r / Fr, \frac{D_L}{D}, \frac{d_S}{D}, \frac{\rho_S}{\rho}, \mu, r_{S,Re_u} / \quad /4/$$

Przy doborze postaci funkcji kierowano się w dużym stopniu jej prostotą, tak aby przy stosunkowo dużej ilości zmiennych /7 liczb bezwymiarowych i 13 wielkości fizycznych/ można było łatwo z niej korzystać w praktyce projektowej.

Analizując kształt zależności ψ_s od poszczególnych liczb podobieństwa zauważono, że większość z nich da się przedstawić w postaci funkcji;

$$y = b_1 x^{b_2}. \quad /5/$$

Wówczas równanie kryterialne można zapisać w postaci iloczynu potęgowego:

$$\psi_s = b_1 Fr^{b_2} \cdot \left(\frac{D_L}{D}\right)^{b_3} \left(\frac{d_s}{D}\right)^{b_4} \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{b_5} \mu^{b_6} f_s^{b_7} \cdot Re_u^{b_8} \quad /6/$$

z następującymi zastrzeżeniami:

1/ zależność ψ_s od stosunku d_s/D należy podzielić na dwa obszary: pierwszy określony funkcją rosnącą:

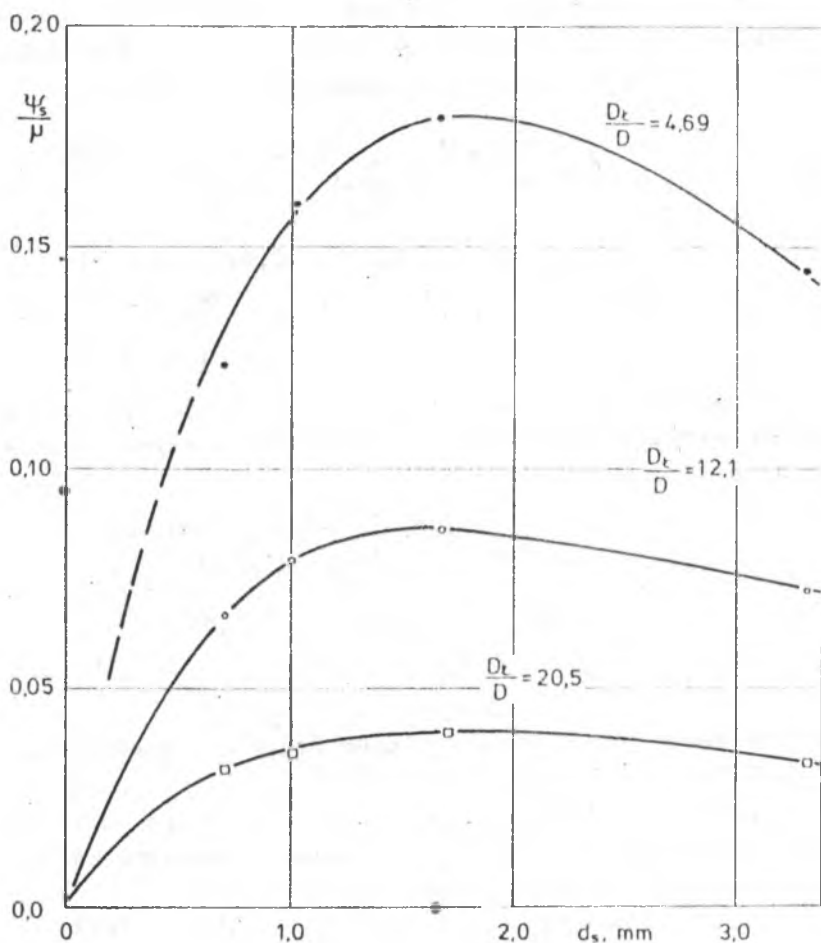
$$\psi_s = K \left(\frac{d_s}{D}\right)^b \quad /7/$$

dla $d_s \ll 1,5$ mm i drugi określony funkcją malejącą:

$$\psi_s = K \left(\frac{d_s}{D}\right)^{-b} \quad /8/$$

dla $d_s \gg 1,5$ mm - patrz rys. 2.

2/ podział obszaru funkcji $\psi_s = f/d_s/D/$ dotyczy również podziału zależności $\psi_s = f/Re_u/$; przy niezbyt dużych różnicach gęstości ρ_s i sferyczności ziarna, graniczna wartość Re_u odpowiada granicznej średnicy ziarna.



Rys. 2. Wyniki badań zależności odniesionych wartości dodatkowego współczynnika oporu łuku ψ_s/μ od średnicy ziarna d_s dla różnych stosunków zakrzywienia D_t/D przy transporcie styropianu i liczbie $Fr \approx 640$.

3/ zależność od f_s należy podzielić na materiały idealnie kuliste o współczynniku tarcia potoczystego i materiały pozostałe, ze współczynnikami tarcia ślizgowego, ze względu na różny wpływ obu współczynników na wartość współczynnika oporu dodatkowego ψ_s - patrz rysunek 3.

Pierwszą aproksymację wykonano bez uwzględnienia powyższych zastrzeżeń, tj. dla wszystkich wyników badań eksperymentalnych, uzyskując równanie w postaci:

$$\psi_s = 0,697 \cdot 10^{-3} \text{ Fe}^{-0,51} \left(\frac{D_L}{D}\right)^{-1,22} \left(\frac{d_s}{D}\right)^{0,095} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{1,92} \cdot \mu^{0,82} f_s^{-0,64} \text{ Re}_u^{-0,5} \quad /9/$$

ze średnim błędem względnym aproksymacji ± 21 %.

Po zawężeniu obszaru zmienności: $d_s > 1,5$ mm dla ziaren niekulistych /zboża i granulaty tworzyw sztucznych/ otrzymano zależność:

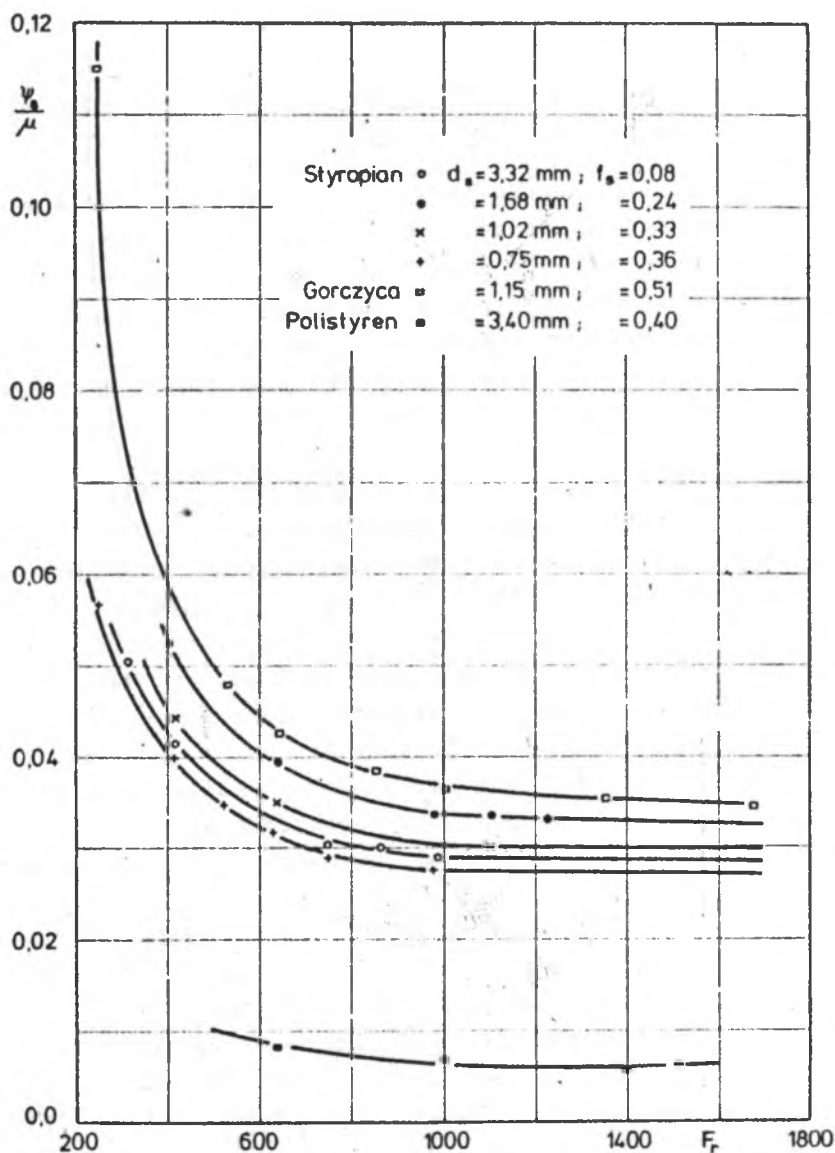
$$\psi_s = 0,942 \cdot 10^{-5} \text{ Fr}^{-0,45} \left(\frac{D_L}{D}\right)^{-1,8} \left(\frac{d_s}{D}\right)^{-0,060} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{2,9} \cdot \mu^{0,79} f_s^{0,39} \text{ Re}_u^{-0,53} \quad /10/$$

ze znacznie niższym już błędem średnim aproksymacji $\pm 14,6$ %.

Dla ziaren kulistych $d_s \leq 1,5$ mm opracowano oddzielną zależność opartą na wynikach badań transportu kulistych ziaren styropianu i gorczycy:

$$\psi_s = 55 \cdot \text{Fr}^{-0,36} \left(\frac{D_L}{D}\right)^{-0,62} \left(\frac{d_s}{D}\right)^{0,69} f_s^{0,43} \quad /11/$$

Powyższe zależności są ważne w zakresie zmienności liczb podobieństwa:



Rys. 3. Porównanie odniesionych wartości dodatkowego współczynnika oporu miejscowego łuku $\psi_s/\mu = f/Fr$, dla grupy materiałów kulistych/styropian gorczyca/ oraz materiału niekulistego, pastylek polistyrenu.

$$Fr = 200 - 3100, \quad Re = /25 - 90/ \cdot 10^4$$

$$D_L/D = 4 - 21$$

$$Q_s/Q = 850 - 1120$$

$$\mu = 0,25 - 8 \text{ dla wzoru } /9/ \text{ i } /10/$$

$$\mu = 0,25 - 1,5 \text{ dla wzoru } /11/$$

6. Wnioski końcowe uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych

1. Współczynniki oporu łuku nie zawsze są funkcjami liniowymi współczynnika koncentracji masowej μ .
2. W zakresie niskich prędkości gazu $Fr = 200 - 800$ decydującą rolę w stracie energii kinetycznej ziarna odgrywają siły ciężkości powodujące parokrotny wzrost wartości współczynników oporu dodatkowego ψ_s , natomiast dla prędkości dużych $Fr > 2500$ współczynnik ten praktycznie nie zależy od liczby Frouda.
3. Współczynnik dodatkowego oporu ψ_s osiąga najwyższą wartość przy średnicy ziarna $d_s \approx 1,5$ mm.
4. Współczynnik tarcia f_s nie jest parametrem jednoznacznym ze względu na różnice w charakterze tarcia ślizgowego i potoczystego. Użycie μ we wzorach wymaga podziału materiałów transportowych na dwie grupy: grupę o ziarnach kulistych i grupę o ziarnach niekulistych.
5. Kształt ziarna w zakresie ziaren niekulistych o sferyczności większej od 0,7 jako oddzielny parametr nie ma istotnego wpływu na wartość współczynnika oporu ψ_s .
6. Siła własność ładowania elektrostatycznego materiału wpływa w widoczny sposób na zwiększenie wartości ψ_s w zakresie niskich prędkości transportu.
7. Rozdrabnianie ziaren o średnicach większych od 1,5mm powoduje wzrost współczynnika oporu łuku ψ_s .
8. Kąt zmienny kierunku łuku w zakresie $\varphi = 90 - 45^\circ/\text{deg}$ nie wpływa na wartość współczynnika oporu łuku ψ_s .

Oznaczenia

- $b_1, b_2 \dots b_8$ - wykładniki potęg w równaniu /6/
 d_s - średnica zastępcza ziarna, m
 D - średnica rurociągu, m
 D_L - średnica łuku, m
 f - funkcja nieoznaczona,
 f_s - współczynnik tarcia materiału o ściankę przewodu,
 g - przyspieszenie grawitacyjne, m/s^2
 l_{pz}, l_{pn} - długość prostych poziomych i pionowych odcinków przewodu, m
 ΔP_{MC} - całkowita strata ciśnienia przy przepływie mieszaniny powietrza i ziarnistego materiału w odcinku przewodu zawierającym łuk, N/m^2
 Δp_{JM} - jednostkowa strata ciśnienia przy przepływie mieszaniny powietrza i ziarnistego ciała stałego w prostym przewodzie, $N/m^2 \cdot m$
 ΔP_{ML} - dodatkowa strata ciśnienia przy przepływie mieszaniny powietrza i materiału ziarnistego, spowodowana zmianą kierunku przepływu w łuku, N/m^2
 w - prędkość powietrza, m/s
 w_u - prędkość unoszenia, m/s
 x - zmienna niezależna
 ζ - współczynnik oporu miejscowego łuku przy przepływie czystego powietrza,
 ζ_M - współczynnik oporu miejscowego łuku przy przepływie mieszaniny: gaz - ciało stałe
 ζ_s - dodatkowy współczynnik oporu miejscowego łuku wywołowany obecnością fazy stałej w strumieniu gazu
 ψ, ψ_M, ψ_s - jak wyżej lecz w odniesieniu do długości łuku $\psi = \frac{D}{1_L} \zeta$
 μ - współczynnik koncentracji masowej,
 ν - współczynnik lepkości kinetycznej, m^2/s

ρ	- gęstość powietrza, kg/m^3
ρ_B	- gęstość materiału, kg/m^3
φ	- kąt zmiany kierunku łuku, $^\circ$

Liczby podobieństwa

$Fr = \frac{w^2}{D \cdot g}$	- liczba Frouda
$Fr_0 = \frac{w_0^2}{D \cdot g}$	- liczba Frouda dla prędkości ozopowania materiału
$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$	- liczba Reynoldsa
$Re_u = \frac{w_u \cdot d_s}{\nu}$	- liczba Reynoldsa odniesiona do prędkości unoszenia ziarna.

LITERATURA

- [1] Jung R.: Die Strömungsverluste in 90° - Umlenkungen beim pneumatischen Staubtransport. Brennst. Wärmekr. 1967, 19, nr 9, p. 430 - 435.
- [2] Kovacs L.: Berechnung des druckabfalls in 90° horizontal eingebauten Krümmern pneumatischer Getreideförderleitungen. Period. Polytechn. 1963, 8/4, s. 448 - 467.
- [3] Kriegel E.: Druckverlust und Verschleiss in Rohrkrümmern bei pneumatischen Transport. Verfahrenstechnik, 4. 1970, nr 8, s. 333 - 339.
- [4] Repp K.R., Dziadzio A.M., Kemmer A.S.: Obobščennye kriterial'nye uravnenia dla rasčeta povorotov potoka pri pnevmotransportie. Izv. Wyżs. Učeb. Zaved. Pišč. Technol., 1973, nr 1, s. 140 - 142.
- [5] Schuchart P.: Widerstandgesetze beim pneumatischen Transport in Rohrkrümmern. Chem. Ing. Techn., 1968 40, nr 21/22, s. 1060 - 1067.
- [6] Syposz J.: Wyniki badań strat ciśnienia powietrza przepływającego w łukach gładkich, COW, 1977, nr 1/88/, s. 27 - 28.
- [7] Uematu T., Morikawa Y.: Druckverluste im Krümmer einer wagerechten Förderung von körnigen Gütern Bull. Soc. Mech. Engrs., 1961, 4, nr 15, s. 531 - 538
- [8] Weidner O.: Grundsätzliche Untersuchung über den pneumatischen Fördervergang, insbesondere über die Verhältnisse bei Beschleunigung und Umlenkung Forsch. Ing.-Wes., 1955, 21, nr 5, s. 145-153.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ДУГАХ УСТАНОВКИ
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО АВТОТРАНСПОРТА

Р е з ю м е

Экспериментально исследовано влияние величин характеризующих протекание на дугах установки пневматического транспорта на величину коэффициента сопротивления дополнительной дуги. На основе выведенного критериального уравнения и результатов экспериментальных исследований разработано новые формулы для расчёта коэффициента местного сопротивления в дугах установок пневматического транспорта.

INVESTIGATIONS OF PRESSURE LOSSES IN THE BENDS
OF PNEUMATIC CONVEYING INSTALLATIONS

S u m m a r y

Effects of quantities characterizing flows in the bends of pneumatic conveying installations on the value of additional bend drag coefficient has been experimentally examined.

On the base of derivated dimensionless equation and also on the ground of experimental examination results a new formulas for calculation of bends local drags in the pneumatic conveying installations has been elaborated.