

Henryk OLEJNICZAK

Henryk SZLUMCZYK

Instytut Oldawnictwa  
Politechniki ŚląskiejWSPÓŁCZYNNIK OPORU PRZEPŁYWU SFLUIDYZOWANEJ  
STRUGI PIASKU KWARCOWEGO

Streszczenie. W pracy podano niektóre teoretyczne rozważania na temat oporów przepływu cieczy w korytach otwartych oraz wyniki badań i obliczeń współczynnika oporu przepływu sfluidyzowanej strugi piasku kwarcowego w rynnie fluidyzacyjnej.

### 1. Wstęp

Przepływ sfluidyzowanej strugi materiałów sypkich w rynnach przez analogię porównać można z przepływami cieczy rzeczywistych w korytach otwartych.

Najczęściej do opisu hydrodynamiki przepływu cieczy używane jest równanie B. Bernoulliego, uwzględniające straty energetyczne. W tej postaci uogólnione równanie D. Bernoulliego stanowi jedno z podstawowych równań dla opisu przepływu układów dwufazowych w rynnach fluidyzacyjnych.

### 2. Interpretacje współczynnika oporu przy przepływie układu dwufazowego gaz - ciało stałe w rynnach fluidyzacyjnych

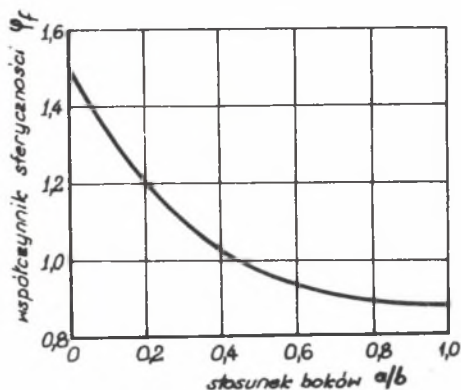
Według [4] współczynniki oporu dla liczb Reynoldsa  $Re < 2000$  podlegają albo prawom przepływu laminarnego cieczy z powierzchnią swobodną przez rury o przekroju prostokątnym, wtedy:

$$\lambda_F = \frac{64 \varphi_f}{Re} \quad (1)$$

albo też przy stałej średnicy hydraulicznej  $D_h$  proste wg równania (1) są równoległe do prostej:

$$\lambda_{Fg} = \frac{64 \varphi_f}{Re [1 + 12(a^*/D_h)]} \quad (2)$$

wyznaczonej wg równania (1). Współczynnik sferyczności  $\varphi_f$  wyznaczyć można z zależności przedstawionej graficznie na ryc. 1.



Ryc. 1. Zależność współczynnika sferyczności  $\varphi_f$  dla rur o przekroju prostokątnym od stosunku boków  $a/b$

Współczynnik  $\alpha^*$  oznacza siarę poślizgu i przy małych kątach nachylenia ryny praktycznie zależy od tworzywa, z którego sporządzony jest kanał transportowy ryny fluidyzacyjnej.

Według równania izochorycznego przepływu cieczy w nachylonych prostych i prostokątnych kanałach transportowych, uwzględniając tarcie przy małych wartościach nachylenia  $\alpha$  rynien fluidyzacyjnych, współczynnik oporu przepływu można obliczyć ze wzoru:

$$\lambda = \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{2g}{v_m^2} \cdot \frac{4F}{U} \quad (3)$$

Jeżeli uwzględnić średnią wysokość płynnego złoża  $h_{\acute{e}r}$ , wtedy:

$$v_m = \frac{\dot{Q}}{b_r \cdot h_{\acute{e}r} \cdot \rho_f} \quad (4)$$

oraz

$$U = \frac{b_r \cdot h_{\acute{e}r}}{b_r + 2h_{\acute{e}r}} \quad (5)$$

to:

$$\lambda_f = 8 \operatorname{tg} \alpha \frac{b_r^3 \cdot \rho_f^2}{\dot{Q}^2} \cdot \frac{h_{\acute{e}r}^3}{b_r + 2h_{\acute{e}r}} \quad (6)$$

Gęstość płynącego złoża obliczyć można ze wzoru:

$$\rho_f = \frac{\rho_w (1 - \epsilon_k)}{h/h_0} \quad (7)$$

Liczbę Reynoldsa wyznacza zależność:

$$Re = \frac{v_m \cdot \rho_f \cdot U}{\eta_F} = \frac{4 \dot{Q}}{\eta_F (b_r + 2h_{\acute{e}r})} \quad (8)$$

Współczynnik lepkości dynamicznej sfluidyzowanego złoza najlepiej wyznaczyć doświadczalnie dla każdego badanego materiału, stosując odpowiedni reometr.

### 3. Badania własne

#### 3.1. Niektóre fizyczne i geometryczne własności transportowanego materiału

W tabeli 1 podano niektóre własności piasku kwarcowego. Po wykonaniu analizy sitowej stosowanego do transportu fluidyzacyjnego materiału piasek kwarcowy oznaczono wg normy branżowej BN-66/4021-12 [6].

#### 3.2. Wyznaczenie charakterystyki fluidyzacji piasku kwarcowego

Charakterystykę fluidyzacji wyznaczono na fluidyzatorze cylindryczna o średnicy wewnętrznej 0,292 m. Dnem rozdzielczym była tkanina typu TOR-2-1565. Wielkością charakterystyczną dla tej tkaniny jest współczynnik oporności przepływu powietrza, który wynosi:  $25333 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Prędkość powietrza  $v$  obliczono znając objętościowe natężenie przepływu powietrza, mierzone za pomocą rotametry; spadek ciśnienia na złożu  $\Delta p$  wyznaczono za pomocą rurki pneumatycznej [5] połączonej z manometrem cieczowym.

#### 3.3. Badania lepkości sfluidyzowanego złoza

Współczynnik lepkości dynamicznej wyznaczono za pomocą reometru rotacyjnego umieszczonego wewnątrz cylindra fluidyzatora. Zasadniczymi elementami viskozymetru były: cylinder o wymiarach  $\varnothing 0,02 \times 0,1$  m, wskaźnik, silnik synchroniczny, płyta obrotowa ze skalą arytmetyczną. Płytę i silnik zawieszono na metalowej strunie. Zależając prędkość przepływu powietrza  $v$  odczytano na obrotowej płycie wartości działają proporcjonalnie do kąta skręcenia struny. Viskozymetr cechowany był za pomocą gliceryny o znanej lepkości.

#### 3.4. Badanie rynny fluidyzacyjnej

Badanie współczynnika oporu przeprowadzono w rynnie fluidyzacyjnej [5] o szerokości  $b = 0,05$  m, długości 3 m i wysokości kanału transportowego 0,4 m. Kanał transportowy zasilany był ze zbiornika o pryzmatycznej kształcie, pod którym umieszczona była skrzynia powietrzna z wkładką porowatą (tkanina TOR-2-1565) nachylona do poziomu pod kątem  $\alpha = 0,436$  rad. Na wlocie do kanału transportowego umieszczono zasuwę, która umożliwiała zmianę wysokości otworu zasypowego. Konstrukcja rynny umożliwiała zmianę kąta jej pochylenia w zakresie od 0-5 stopni. Jedna boczna ściana kanału transportowego była wykonana ze szkła organicznego, na której były naniesione

Tabela 1

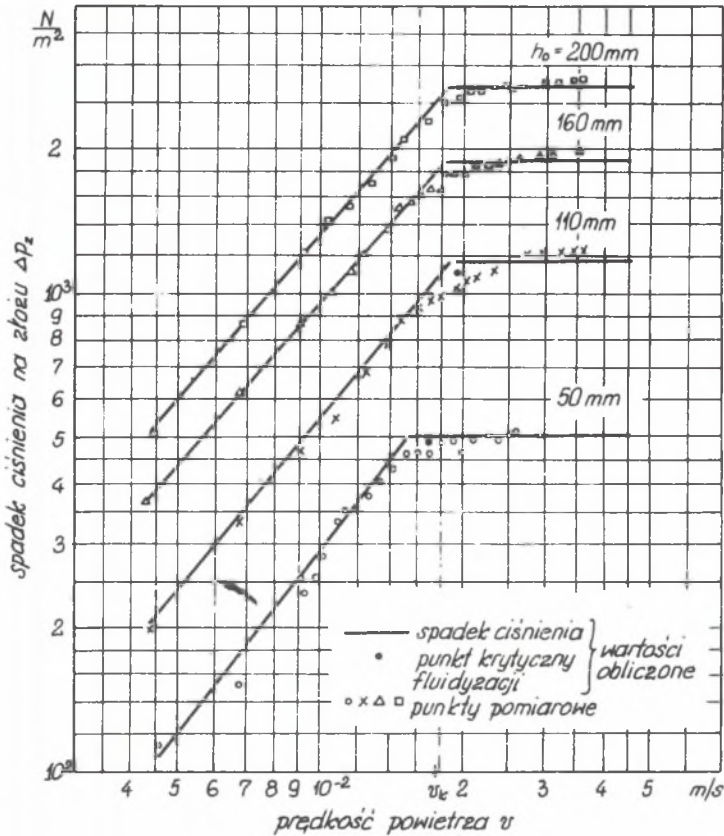
Niektóre fizyczne i geometryczne własności piasku kwarcowego  
stosowanego podczas badań

LP.	$\rho_w$	$\rho_u$	$d_m$	$d_r$	$d_v$	$\beta$	$\psi_f$	$S_w$	$S_t$	$W_k$	$\xi_o$	$D_s$
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>-3</sup> .m	10 <sup>-3</sup> .m	10 <sup>-3</sup> .m	rad(o)	-	m <sup>2</sup> /kg	m <sup>2</sup> /kg	-	-	10 <sup>-5</sup> .m
1K - 0,16/0,10/0,20 J - 90 - 1350												
1	2665	1408	0,1751	0,1547	0,1234	0,4537 (26)	0,8269	9,877	8,2158	1,202	0,471	3,390

skale arytmetyczne, co pozwoliło na dokonywanie odczytu spoczynkowej dynamicznej wysokości sfluidyzowanej strugi piasku kwarcowego.

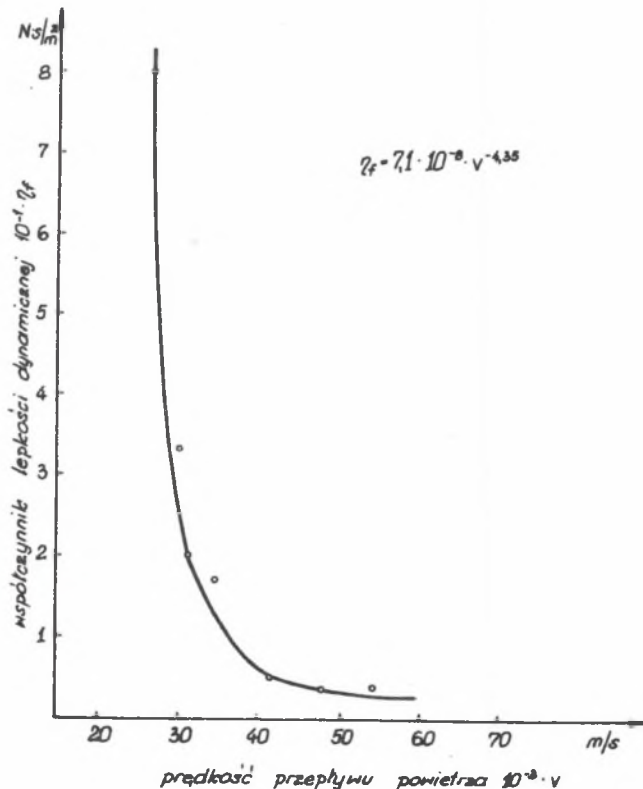
#### 4. Analiza badań i wyników obliczeń współczynnika oporu przepływu sfluidyzowanej strugi piasku kwarcowego

Badanie i obliczenie potrzebne do wyznaczenia charakterystyki fluidyzacji piasku kwarcowego 1K-0,16/0,10/0,20 J9C-1350 [6] przeprowadzono dla trzech różnych wysokości spoczynkowej złoża. Wysokości te odpowiadały średnim spoczynkowym wysokościom warstw piasku w kanale transportowym ryny fluidyzacyjnej. Wyznaczone prędkości krytyczne fluidyzacji niewiele wzrastają wraz ze wzrostem wysokości warstwy. W literaturze [7] podają, że prędkości krytyczne fluidyzacji są jednakowe dla każdej wysokości spo-



Rys. 2. Zależność spadku ciśnienia  $\Delta p_z$  na złożu piasku kwarcowego 1K - 0,16/0,10/0,20 J9C-1350 od prędkości powietrza  $v$

czynkowej złoże. Dokładne badania wykazują nieznaczny wzrost krytycznej prędkości powietrza wraz ze wzrostem wysokości spoczynkowej, jak to przedstawiono na rys. 2. Przyczyny wzrostu prędkości krytycznej wraz z wysokością to: wzrost długości drogi, którą poruszają się ziarna oraz udział powierzchni ścian wewnętrznych fluidyzatora. Wprawdzie podano w literaturze [8] sposób na obliczenie współczynnika lepkości dynamicznej złoże  $\eta_f$ , jednakże obliczenia te dotyczą wyłącznie jednorodnych materiałów (monodispersyjnych). Ponieważ w praktyce mamy najczęściej do czynienia z niejednorodnym ziarnistym złożem (polidispersyjnym), badanie lepkości dynamicznej należałoby przeprowadzić odrębnie dla każdego materiału. Na wykresie rys. 3 przedstawiono zależność lepkości dynamicznej  $\eta_f$  od prędkości przepływu powietrza. Na podstawie obliczeń statystycznych opracowano empiryczną funkcję ujmującą zależności współczynnika lepkości od prędkości przepływu powietrza  $\eta_f = 7,1 \cdot 10^{-8} v^{-4,35}$ . Ze wzrostem prędkości przepływu powietrza



Rys. 3. Zależność współczynnika lepkości  $\eta_f$  sfluidyzowanego piasku kwarcowego 1K-0,16/0,10/0,20 J90-1350 od prędkości przepływu powietrza  $v$

lepkość sfluidyzowanego złoża maleje. Przez analogię do cieczy współczynnik lepkości maleje wraz ze wzrostem temperatury. Prędkość przepływu powietrza przez fluidyzowane złożo materiału sypkiego ma taki sam wpływ na współczynnik lepkości, jaki ma temperatura na lepkość cieczy.

Badania i wyniki obliczeń [5] pozwoliły na graficzne przedstawienie funkcji współczynnika oporu przepływu sfluidyzowanej strugi piasku kwarcowego  $\lambda_f = f(Re_f)$ .

Do obliczeń wykorzystano równanie (6). Dla tak ważnych wielkości charakteryzujących przepływ sfluidyzowanej strugi, jak  $\lambda_f$  i  $Re_f$ , wyznaczono funkcje empiryczne:

$$\lambda_f = 15,3 Re_f^{-0,362} \quad \text{dla} \quad \alpha = 0^\circ,$$

$$\lambda_f = 8,45 Re_f^{-0,3338} \quad \text{dla} \quad \alpha = 1^\circ,$$

$$\lambda_f = 3,206 Re_f^{-0,2238} \quad \text{dla} \quad \alpha = 2^\circ$$

przy współczynniku korelacji  $\delta_k = 0,958$  i błędzie standardowym  $\sigma = 0,176$ .

Poszukując metodę najaniejszych kwadratów uproszczonej postaci empirycznej funkcji  $\lambda_f = f(Re_f)$ , proponuje się następujące zależności:

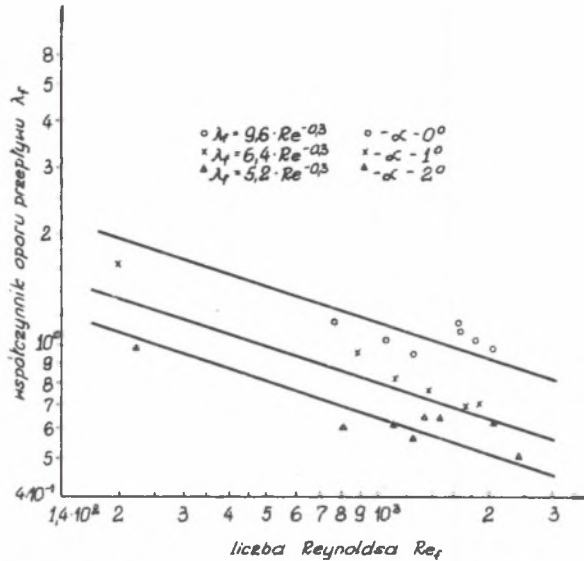
$$\lambda_f = 9,6 Re_f^{-0,3} \quad \text{dla} \quad \alpha = 0^\circ,$$

$$\lambda_f = 6,4 Re_f^{-0,3} \quad \text{dla} \quad \alpha = 1^\circ,$$

$$\lambda_f = 5,2 Re_f^{-0,3} \quad \text{dla} \quad \alpha = 2^\circ,$$

przy współczynniku korelacji  $\rho_k = 0,79$  i błędzie standardowym  $\sigma = 0,154$ .

Jak widać z ryc. 4, można przyjąć, że linie zależności  $\lambda_f = f(Re_f, \alpha)$  dla danego spadku hydraulicznego są równoległe, co zgodne jest z pracą [8]. Natomiast odległości między liniami nie są równe mimo jednakowej o 1 stopień zmiany spadku hydraulicznego, co świadczy o konieczności wyznaczenia empirycznej funkcji  $\lambda_f = f(Re_f, \alpha)$  dla każdego kąta pochylenia rynny. Jak wykazały badania i obliczenia [5], zależność współczynnika oporu przepływu fluidyzowanej strugi piasku kwarcowego od liczby Reynolda  $Re_f$  należy wyznaczyć odrębnie dla każdego rodzaju materiału. Na postać empirycznych funkcji przedstawionych graficznie na ryc 4 decydujący wpływ mają następujące parametry: współczynnik lepkości sfluidyzowanego złoża, kształt ziarna (współczynnik sferyczności), stopień niejednorodności materiału oraz stan powierzchni zwilżonych.



Rys. 4. Zależność liczby Reynoldsa  $Re_f$  od współczynnika oporu przepływu  $\lambda_f$  efluidyzowanej strugi jednorodnego piasku kwarcowego 1K - 0,16(0,10)0,20  $\varnothing$  90-1350

#### OZNACZENIA

- a - wysokość prostokątnej rury, m
- $a^*$  - współczynnik poślizgu, m
- b - szerokość prostokątnej rury, m
- $b_r$  - szerokość rynny fluidyzacyjnej, a
- $D_s$  - współczynnik dyspersji, m
- $d_m$  - średnia średnica arytmetyczna ziarn piasku kwarcowego, m
- $d_v$  - średnia średnica ziaren jako średnia średnica kulistej cząstki, której iloczyn i liczby cząstek dają objętość całkowitą zasypu
- $d_r$  - średnia średnica harmoniczna ziarn, m
- F - przekrój poprzeczny strugi, powierzchnia zwilżalna przewodu,  $a^2$
- g - przyspieszenie ziemskie,  $m \cdot s^{-2}$
- h - dynamiczna wysokość warstwy we fluidyzatorze, m
- $h_o$  - wysokość spoczynkowa warstwy we fluidyzatorze, a
- $h_{sr}$  - średnia dynamiczna wysokość strugi efluidyzowanego złoża, m
- $\Delta p_w$  - spadek ciśnienia na wkładce porowatej,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
- $\Delta p_z$  - spadek ciśnienia na złożu,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
- $\dot{Q}, Q$  - masowe natężenie przepływu piasku,  $kg/s$
- $S_t$  - teoretyczna powierzchnia ziaren,  $m^2 \cdot kg^{-1}$
- $S_w$  - powierzchnia właściwa ziaren,  $m^2 \cdot kg^{-1}$



- $U$  - obwód zwilżony, m  
 $v$  - średnia prędkość przepływu cieczy (powietrza),  $m \cdot s^{-1}$   
 $v_m$  - średnia prędkość przepływu materiału,  $m \cdot s^{-1}$   
 $\alpha$  - kąt pochylenia rynny fluidyzacyjnej,  $rad(^{\circ})$   
 $\beta$  - kąt naturalnego usypu,  $rad$   
 $\epsilon_k$  - porowatość złoża w punkcie krytycznym fluidyzacji  
 $\eta_f$  - dynamiczny współczynnik lepkości złoża,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$   
 $\lambda_f$  - współczynnik oporu przepływu przez rury prostokątne  
 $\rho_f$  - gęstość sfluidyzowanego złoża,  $kg \cdot m^{-3}$   
 $\rho_w$  - gęstość właściwa materiału sypkiego,  $kg \cdot m^{-3}$   
 $\varphi_f$  - współczynnik sferyczności,  
 $Re_f$  - liczba Reynoldsa dla przepływu sfluidyzowanej strugi materiału sypkiego

## LITERATURA

- [1] Troskoleński A.T.: Hydromechanika. WNT, Warszawa 1969.  
 [2] Pohorecki R., Wroński St.: Kinetyka i termodynamika procesów inżynierii chemicznej. WNT, Warszawa 1979.  
 [3] Wysocki J.: Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1967.  
 [4] Nikuradse J.: Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen. VDI Forsch. Heft 281 Berlin, VDI-Verlag 1926  
 [5] Olejniczak H.: Wpływ parametrów geometrycznych przenośnika aeracyjnego na dynamikę przepływu piasek kwarcowych. Praca doktorska, Gliwice 1975.  
 [6] Wetz Z., Lewandowski L.: Badania materiałów formierskich. WNT, Warszawa 1962.  
 [7] Ciborowski J.: Fluidyzacja. PWT, Warszawa 1957.  
 [8] Kaunacka K.: Transport fluidyzacyjny materiałów drobnoziarnistych VDI Verlag, Düsseldorf 1956.

 КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОТОКА ФЛУИДИЗОВАННОЙ СТРУИ  
 КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

## Резюме

В работе представлены некоторые теоретические соображения касающиеся сопротивления потока жидкости в открытых канавах а также результаты исследований и расчётов коэффициента сопротивления потока флуидизованной струи кварцевого песка в флуидизованном лотке.

## RESISTANCE OF FLOW OF FLUIDIZED HIGH - SILICA SAND STREAM

## S u m m a r y

Some theoretical consideration on resistance of flow in open channels are given. Moreover results of tests and computations for resistance of flow coefficient of fluidized high - silica sand stream in fluidization trough are presented.