

Nijun Yao, Hao Qiu, Jianxin Xia, Jerzy Sobota

Rozkład stężenia objętościowego cząstek stałych w przekroju poprzecznym kwadratowego przewodu podczas hydrotransportu mieszaniny gruboziarnistej

Transport hydrauliczny materiałów stałych w rurociągach jest nieskomplikowany technicznie, racjonalny ekonomicznie i przyjazny środowisku. Z tego względu znajduje on zastosowanie między innymi w transporcie węgla gruboziarnistego, ponieważ taka mieszanina odwadnia się łatwiej niż z udziałem węgla drobnoziarnistego, w procesie pogłębiania torów wodnych lub wydobywania kruszywa z rzek i zbiorników wodnych, a także w górnictwie głębokowodnym przy wydobywaniu koncentracji lub siarczoków. Grube cząstki ziarniste, z uwagi na większą prędkość opadania, zwiększają ryzyko zablokowania przewodu transportującego daną mieszaninę. Stąd też ich rozkład w przekroju poprzecznym przewodu ma istotne znaczenie w aspekcie zapewnienia wydajności tego rodzaju transportu i jego sprawnego działania.

Do opisu rozmieszczenia cząstek stałych w przekroju poprzecznym przewodu transportującego mieszaninę wykorzystuje się teorię mieszania [1, 2], teorię energii [3, 4], teorię grawitacyjną [5], teorię stochastyczną [6] oraz teorię dyfuzji, którą pierwsi zastosowali autorzy prac [7, 8]. Badanie mechanizmów decydujących o rozmieszczeniu ziaren transportowanych w cieczy ma podstawowe znaczenie w zrozumieniu zachowania się tych cząstek w strumieniu. W badaniach opisanych w pracy [9] przeanalizowano rolę dyfuzji turbulentnej i innych sił nośnych i wyprowadzono nową formułę w przypadku pionowego rozkładu stężenia objętościowego fazy stałej. W pracach [10, 11] przedstawiono ograniczenia tradycyjnej teorii dyfuzji cząstek drobnych i zaproponowano nową teorię, zwaną kinetyczną. Na podstawie charakterystyk fluktuacji cząstek i cieczy autorzy prac [12–14] otrzymali równanie rozkładu drobnych cząstek w przekroju poprzecznym przewodu i wzór określający położenie strefy maksymalnego stężenia cząstek przy przepływie mieszaniny o małym stężeniu według teorii kinetycznej. Jednakże teoria ta wywodzi się z opisu ruchu gazu i nie uwzględnia oddziaływania między cząstkami oraz między cząstkami i cieczą. W przypadku cząstek gruboziarnistych ich objętość nie jest pomijalnym czynnikiem w przepływie dwufazowym, a zderzenia między cząstkami są intensywne, czego teoria kinetyczna nie ujmuje w pełni i zatem nie opisuje przepływu dwufazowego medium zawierającego grube cząstki stałe i ciecz.

Inż. N. Yao, mgr inż. H. Qiu, prof. dr J. Xia: Minzu University of China, Department of Environmental Sciences, Beijing 100081, China
jxxia@vip.sina.com

Prof. dr hab. inż. J. Sobota: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Zakład Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław
jerzy.sobota@upwr.edu.pl

W literaturze przedmiotu jest zdecydowanie więcej pozycji dotyczących badań rozkładu w przekroju przewodu zawieszin drobnoziarnistych niż gruboziarnistych, co było jednym z powodów podjęcia badań z udziałem tak zwanych cząstek grubych. Drugim celem podjęcia problematyki profilu stężenia objętościowego cząstek stałych było wykorzystywanie w technologii hydrotransportu przewodów o przekrojach innych niż kołowe. Szerokie badania rozkładu cząstek podczas przepływu różnych mieszanin w rurociągach wykonali członkowie zespołu krakowsko-wrocławskiego, którzy do tego celu zastosowali metodę radiometryczną. Zasady pomiaru tą metodą zostały opisane w pracach [15, 16], natomiast wyniki wieloletnich pomiarów można znaleźć w pracach [17–19]. Przedmiotem badań podjętych przez autorów niniejszej pracy był rozkład cząstek w profilu poprzecznym podczas przepływu mieszaniny w przewodzie o przekroju kwadratowym.

Mechanizm rozkładu stężenia objętościowego cząstek w przekroju poprzecznym przewodu

Niezależnie od przekroju poprzecznego przewodu, w którym płynie mieszanina cieczy i cząstek stałych, mechanizm ich oddziaływania podczas przepływu jest podobny. Większość dotychczasowych badań nad rozkładem cząstek w przekroju poprzecznym strumienia opiera się na dyfuzyjnym równaniu Schmidta-Rouse [16] w postaci:

$$\omega C + \varepsilon_s \frac{dC}{dy} = 0 \quad (1)$$

w której:

ω – prędkość opadania cząstek, m/s

C – stężenie objętościowe cząstek (stosunek objętości cząstek do objętości mieszaniny)

ε_s – współczynnik dyfuzji, m²/s

dC/dy – gradient stężenia, 1/m

Na pionową dyspersję cząstek mają wpływ takie zjawiska, jak efektywna siła grawitacji, dyfuzja turbulentna, siła Magnusa, siła Saffmana oraz zderzenia cząstek, przy czym dyfuzja turbulentna może nie być istotna w przypadku cząstek gruboziarnistych. Efektywna siła grawitacji, która jest wypadkową siły grawitacji i siły wyporu, opisuje opadanie cząstek i może być wyrażona zależnością:

$$W = -\frac{1}{6}\pi d^3(\rho_s - \rho_1)g \quad (2)$$

w której:

d – średnica cząstki, m

ρ_s – gęstość materiału cząstek, kg/m^3

ρ_l – gęstość cieczy, kg/m^3

g – przyspieszenie grawitacyjne, m/s^2

Siła Magnusa i siła Saffmana są uwzględniane w sile nośnej działającej na cząstkę, przy czym siła Magnusa jest wynikiem rotacji cząstek, zaś siła Saffmana wynika ze ścięcia samego płynu. Siły te opisują następujące zależności:

– siła Magnusa (F_M):

$$F_M = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho_l \omega_s (u_1 - u_s) \quad (3)$$

w której:

$\omega_s = \partial u_1 / 2 \partial y$ (y – rzędna pionowa) – prędkość kątowna spinu cząstek, która zależy od gradientu prędkości płynu, rad/s

u_1, u_s – odpowiednio prędkość cieczy i cząstek, m/s

– siła Saffmana (F_S):

$$F_S = 1,62 d^2 \sqrt{\rho_l \mu} (u_1 - u_s) \sqrt{\left| \frac{du_1}{dy} \right|} \quad (4)$$

w której:

μ – dynamiczny współczynnik lepkości, $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$

Zarówno siła Magnusa jak i siła Saffmana zmieniają się w zależności od różnicy między prędkością cząstek a prędkością cieczy, co pokazuje formuła Owena [20]:

$$u_1 - u_s = \varphi u_* \tau_s \frac{du_1}{dy} \quad (5)$$

w której:

u_* – prędkość ścięcia, $1/\text{s}$

φ – współczynnik eksperymentalny, którego wartość zmienia się w przedziale 600÷1000

τ_s – czas relaksacji cząstek, s

W procesie opadania cząstek zdarzają się kolizje (zderzenia) między cząstkami oraz między cząstkami a ścianką w obszarze bliskim dna powodując przeniesienie pędu w górę, skutkiem czego następuje przemieszczanie się cząstek w górę. Pionowa składowa siły zderzenia nazywana jest siłą dyspersyjną i może być obliczana z użyciem modelu Bagnolda [21]:

$$P_{yy} = 0,042 (\lambda d)^2 (du_1/dy)^2 \cos \alpha \quad (6)$$

w którym:

$$\lambda = [(C_o/C_{vf})^{1/3} - 1]^{-1}$$

C_o – maksymalne stężenie objętościowe mieszaniny podczas sedimentacji w warunkach statycznych ($C_o = 0,74$)

C_{vf} – średnie stężenie objętościowe mieszaniny w pętli instalacji eksperymentalnej

α – kąt zderzenia cząstek ($\alpha = 90^\circ$)

W przekroju przewodu transportującego mieszaninę wypadkowa siła pionowa składa się z efektywnej siły grawitacji i kompleksowej siły unoszenia, która obejmuje siłę Magnusa, siłę Saffmana i siłę dyspersyjną:

$$F_L = F_M + F_S + P_{yy} \quad (7)$$

Siła nośna ma znaczny wpływ na cząstki, a tym samym na ich rozkład w przekroju poprzecznym rurociągu, gdyż jeśli jej wartość wypadkowa przekracza efektywną siłę grawitacji, wówczas cząstki mogą poruszać się w górę. W celu uwzględnienia tego zjawiska można wprowadzić parametr $k = F_L/W$, reprezentujący kompleksową siłę działającą na cząstkę, co pozwala zmodyfikować równanie dyspersji (1) do postaci:

$$(1-k)\omega C + \varepsilon_s \frac{dC}{dy} = 0 \quad (8)$$

Jeżeli $k < 1$, wówczas siła unoszenia jest mniejsza niż efektywna siła grawitacji i na skutek opadania cząstek obserwuje się wzrost ich stężenia w kierunku dna przewodu. W przypadku $k > 1$ siła unoszenia jest większa niż efektywna siła grawitacji, na skutek czego cząstka jest unoszona, dlatego maksymalne stężenie cząstek pojawia się w pewnej odległości y od dna przewodu. Gdy $k = 1$, wówczas kompleksowa siła unoszenia jest równoważona przez efektywną siłę grawitacji i uważa się, że stężenie objętościowe cząstek osiąga maksimum w punkcie y_{maks} nad dnem przewodu. W zależności od korelacji między gradientem prędkości cieczy a współrzędną pionową $u_*/ky = du_1/dy$ (stała Karmana $\kappa = 0,4$) i po podstawieniu równań (2)–(7) do równania $k = F_L/W = 1$, położenie punktu maksymalnego stężenia cząstek w osi pionowej przewodu można oszacować z zależności:

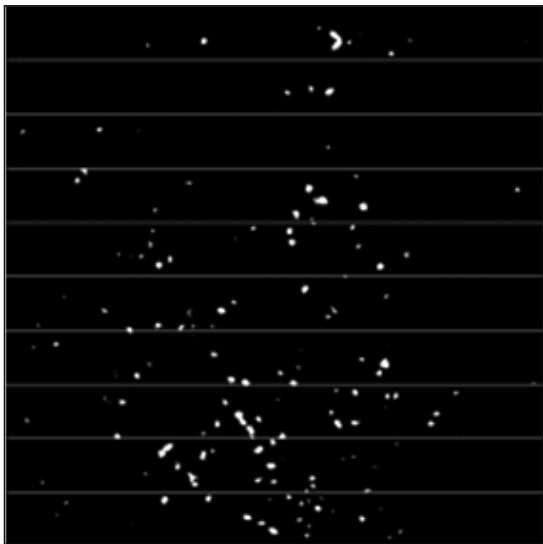
$$y_{maks} \approx \frac{\rho_s u_* C_{vf}}{\rho_l d} \quad (9)$$

Stanowisko eksperymentalne i metody pomiarów

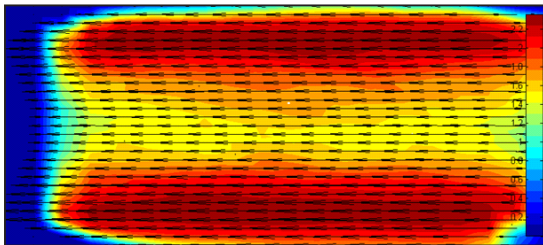
Instalacja badawcza składała się z pętli rurociągu stalowego o średnicy wewnętrznej $D = 50 \text{ mm}$ i długości 20 m oraz wstawki z przezroczystego PVC o przekroju kwadratowym ($50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$) i długości $1,5 \text{ m}$. Zmianę wartości strumienia objętości mieszaniny zapewniała pompa z regulowaną prędkością obrotową silnika. Do pomiaru strumienia objętości mieszaniny zastosowano elektromagnetyczny przepływomierz EMF8301 umieszczony na pionowym odcinku pętli rurociągu. Rozmiar okna do filmowania cząstek wynosił $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. W każdym eksperymencie stosowano cząstki o jednym rozmiarze, którymi były ziarna piasku kwarcowego ($\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$) odsiane na sitach $0,5 \text{ mm}$, 1 mm i 3 mm . Wszystkie eksperymenty przeprowadzono przy stężeniu objętościowym mieszaniny równym 5% i we wszystkich eksperymentach nośnikiem cząstek piasku była woda.

W pomiarach zastosowano optyczną metodę wizualizacji przepływu (particle image velocimetry – PIV). Ciecz wraz z unoszonymi cząstkami była oświetlana wiązką laserową o mocy 10 W (długość fali 532 nm), dzięki czemu cząstki były widoczne. Ruch cząstek rejestrowany był przez urządzenie CCD (charge-couple-device), model MegaSpeed MS55K o prędkości fotografowania 1443 klatki na sekundę. Spośród wszystkich zdjęć wykonanych w ramach danego pomiaru wybierano losowo 100 zdjęć i każde z nich dzielono na 10 poziomych warstw (rys. 1). Następnie zliczano cząstki w każdej warstwie oraz całkowitą liczbę cząstek w każdym obrazie. Liczbę cząstek w każdej warstwie określano jako iloraz średniej liczby cząstek w danej warstwie i średniej liczby cząstek we wszystkich warstwach.

Do określenia prędkości przepływu cząstek w każdej warstwie wykorzystano program komputerowy, natomiast do oceny zmian wartości parametru k określano podczas eksperymentu gradient prędkości cieczy. Do obliczenia prędkości cieczy posłużyły pomiary wykonane z udziałem cząstek piasku o średnicy $0,1 \text{ mm}$, przyjmując że prędkość tych cząstek odpowiada prędkości cieczy. Aby wyznaczyć gradient prędkości cieczy, przekrój sekcji pomiarowej (metoda PIV) podzielono na 20 poziomych warstw, co pozwoliło wyznaczyć 10 średnich wartości gradientu prędkości cieczy jako wartość średnią z różnicy prędkości w górnej i dolnej warstwie. W ten sposób otrzymano pole prędkości cieczy pokazane na rysunku 2.



Rys. 1. Przykładowy widok cząstek mieszaniny w przezroczystej sekcji pomiarowej
Fig. 1. Example view of mixture particles in a transparent measuring section



Rys. 2. Pole prędkości cieczy określone metodą PIV
Fig. 2. The liquid velocity field determined by the PIV method

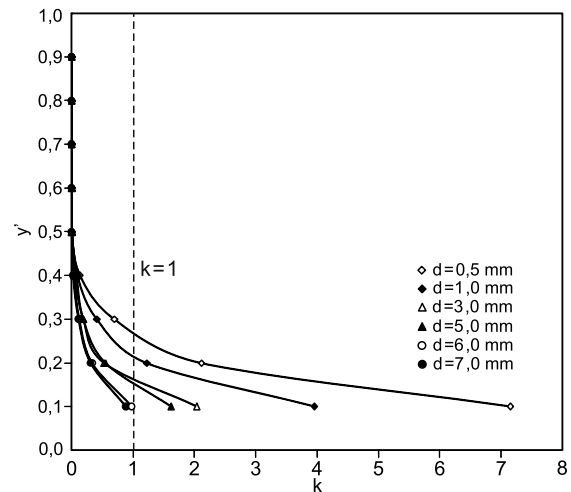
Dyskusja wyników

Parametr k

Wykorzystując wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczono wartości parametru k . Stosowne obliczenia wykonano w przypadku cząstek o średnicy od 0,5 mm do 7,0 mm, zmieniających się co 1,0 mm, przy czym w przypadku cząstek o średnicy większej niż 3,0 mm przyjęto wartości odpowiadające cząstkom o średnicy 3,0 mm. Jak pokazały wyniki przedstawione na rysunku 3, wartości parametru k stopniowo zwiększały się w kierunku dna przewodu i gwałtownie rosły w jego pobliżu. W przypadku cząstek większych niż 6 mm wartość k była zawsze mniejsza od jedności, co oznaczało, że wartość F_L była zawsze mniejsza od wartości W i takie cząstki osadzały się na dnie przewodu.

Profil stężenia objętościowego cząstek

Rezultaty przeprowadzonych eksperymentów w przewodzie o przekroju kwadratowym w postaci rozkładu stężenia objętościowego cząstek w pionowej osi przekroju przewodu przedstawiono na rysunku 4, który obrazuje profile stężenia mieszanin z cząstkami o średnicy 0,5 mm, 1,0 mm i 3,0 mm przy prędkości przepływu 1,5 m/s, 2,0 m/s i 2,5 m/s (parametr C_{vf} oznacza średnie stężenie objętościowe mieszaniny płynącej w pętli instalacji eksperymentalnej, $y' = y/D$ – zredukowaną (względna) współrzędną pionową od dna przewodu, zaś $C(y')$ – stężenie objętościowe mieszaniny na wysokości y').



Rys. 3. Zmienność parametru k wzdłuż osi przewodu w przypadku mieszaniny zawierającej cząstki o średnicy 0,5–7 mm ($v=1,5$ m/s)

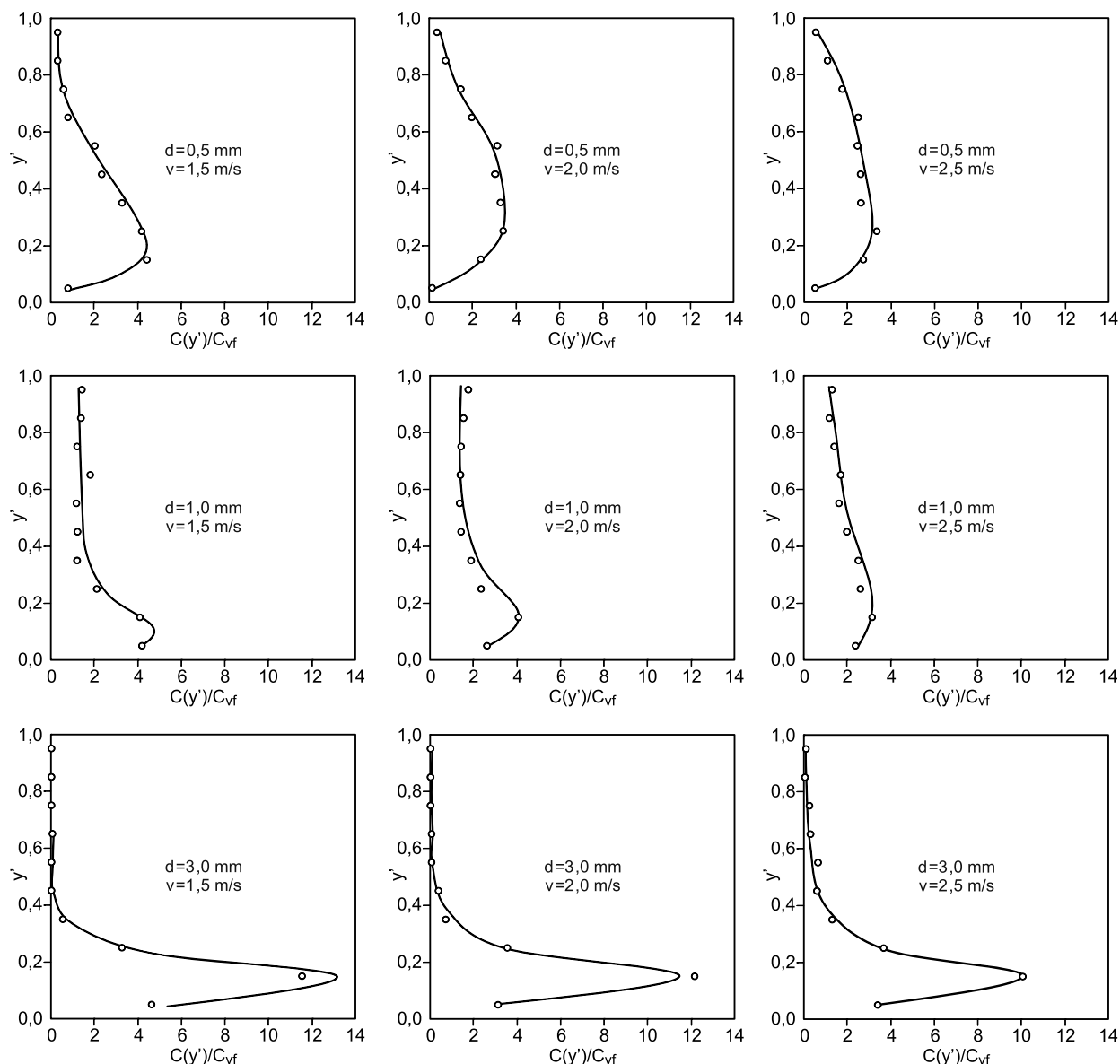
Fig. 3. Variability of the k parameter along vertical axis of conduit for a mixture containing particles of 0.5–7 mm in diameter ($v=1.5$ m/s)

Z wykresów przedstawionych na rysunku 4 wynika, że w żadnym badanym przypadku maksymalne stężenie cząstek nie wystąpiło na dnie przewodu. Przy takim samym rozmiarze cząstek – wraz ze wzrostem prędkości przepływu mieszaniny – wartość ich maksymalnego stężenia malała, a położenie punktu maksymalnego stężenia przesuwało się w górę. Im mniejszy był rozmiar cząstek i większe przesunięcie strefy maksymalnego stężenia w górę, tym wyraźniej było widać tendencję do bardziej równomiernego rozkładu cząstek w pionie przekroju przewodu. Przy tej samej prędkości przepływu mieszaniny było widać również, że im badane cząstki piasku były większe, tym bliżej dna przewodu znajdował się punkt maksymalnego stężenia mieszaniny, a rozkład cząstek był bardziej równomierny.

Formuła na określenie położenia punktu maksymalnego stężenia mieszaniny w pionowej osi przekroju poprzecznego przewodu

Dyskusja wyników eksperymentów wykazała, że na położenie punktu maksymalnego stężenia mieszaniny wpływały takie czynniki, jak rozmiar cząstek i prędkość ich przepływu, co zilustrowano na wykresach zamieszczonych na rysunku 5. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości przepływu mieszaniny zwiększała się odległość położenia punktu jej maksymalnego stężenia od dna, ponieważ większa prędkość przepływu zwiększała turbulencję w strumieniu mieszaniny oraz wartość gradientu prędkości, na skutek czego cząstki piasku przemieszczały się w górę. Na obecnym etapie nie można jeszcze uogólnić związku położenia punktu maksymalnego stężenia transportowanej mieszaniny z wielkością cząstek, ale można przyjąć, że przy mniejszych wartościach prędkości przepływu mieszaniny większe cząstki będą się częściej zderzać niż cząstki drobne przy większej prędkości i dzięki przekazywanej energii podczas ich wzajemnych kolizji będą przesuwać się ku górze, co spowoduje przesunięcie położenia punktu maksymalnego stężenia mieszaniny ku górze przewodu (rys. 5).

Autorka pracy [22] przeprowadziła wiele eksperymentów w szerokim zakresie zmienności stężenia objętościowego mieszaniny niehomogenicznej ($C_{vf}=15\div51\%$), transportowanej rurociągami przemysłowymi. Z wyników badań zobrazowanych na ostatnim wykresie rysunku 5 widać,



Rys. 4. Rozkład stężenia objętościowego cząstek w przekroju kwadratowego przewodu w różnych warunkach przepływu mieszaniny ziarnistej (średnica cząstek – 0,5 mm, 1,0 mm, 3,0 mm; prędkość przepływu – 1,5 m/s, 2,0 m/s, 2,5 m/s)

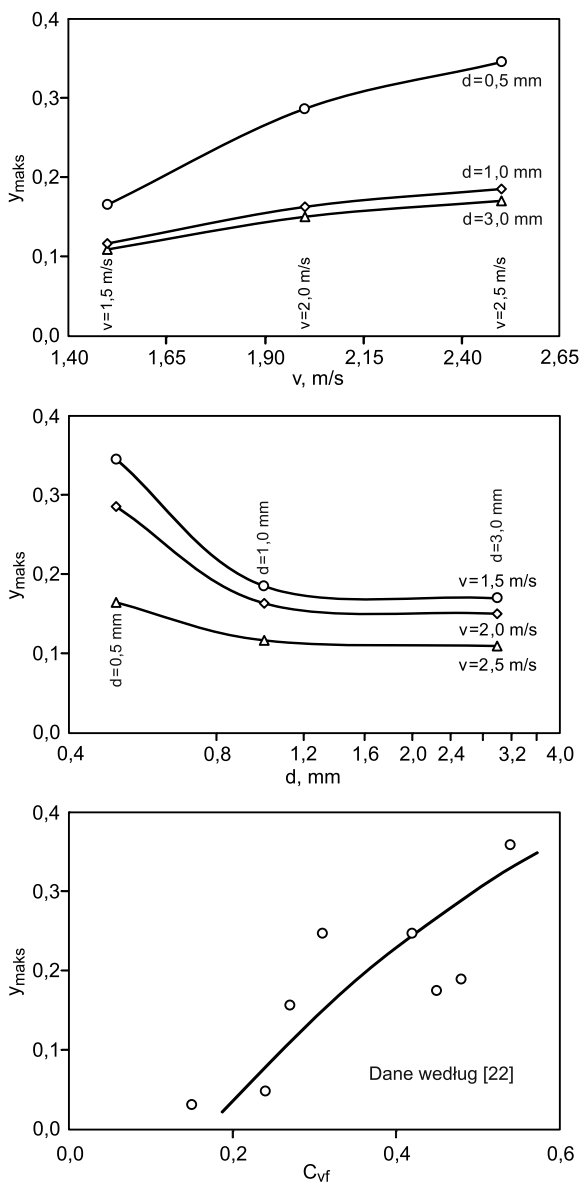
Fig. 4. Profile of solid volume concentration in the cross-section of a square conduit measured under various conditions of a coarse mixture flow (particle diameter: 0.5 mm, 1.0 mm, 3.0 mm; flow velocity: 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s)

że wraz ze wzrostem wartości stężenia C_{vf} wzrastała wartość y_{maks} , ponieważ wówczas zwiększało się prawdopodobieństwo zderzeń cząstka-cząstka i cząstek ze ścianą przewodu oraz zwiększała się siła dyspersyjna cząstek, a w rezultacie położenie punktu maksymalnego stężenia mieszaniny przesunęło się ku górze. Położenie punktu maksymalnego stężenia mieszaniny przesunęło się w górę wraz ze zmniejszaniem się wielkości cząstek, stężeniem objętościowym fazy stałej i zwiększaniem prędkości przepływu mieszaniny, co było zgodne z wcześniejszą analizą mechaniczną badanego zjawiska.

Na podstawie analizy wymiarowej danych pomiarowych sformułowano wzór do obliczania położenia punktu maksymalnego stężenia cząstek podczas transportu hydraulicznego materiału gruboziarnistego w przewodzie o przekroju kwadratowym:

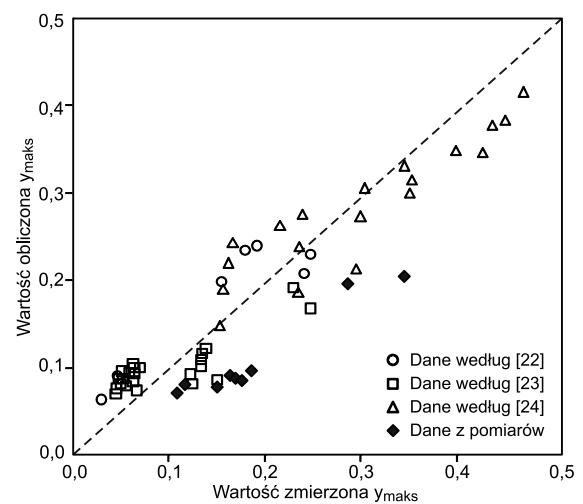
$$y_{maks} = 0,06 C_{vf}^{0,33} \left(\frac{d}{D} \right)^{-0,11} \left(\frac{v}{\sqrt{gD}} \right)^{0,36} \quad (10)$$

Do weryfikacji formuły (10) wykorzystano wyniki badań dotyczących przepływu mieszanin przedstawionych w pracach [22–24]. Doświadczenia opisane w pracy [22] przeprowadzono w rurociągu składającym się z pionowego odcinka o długości 122 m i poziomego rurociągu o długości 1620 m o średnicy $D=210$ mm, a w eksperymencie wykorzystano piasek ($\rho_s=2650$ kg/m³, $d=0,45$ mm, $C_{vf}=0,15 \div 0,54$, $v=4$ m/s). Praca [23] dotyczyła przepływu mieszaniny w przewodzie o przekroju prostokątnym o wymiarach 4 cm \times 6 cm i długości 6,5 m oraz stężenia mieszaniny $C_{vf}=0,01 \div 0,035$. Fazę stałą tej mieszaniny stanowiły cząstki polistyrenu ($\rho_s=1050$ kg/m³, $d=1,8$ mm), żywicy katatonicznej ($\rho_s=1600$ kg/m³, $d=1,4$ mm) i cząstki PVC ($\rho_s=1340$ kg/m³, $d=2,29$ mm). Badania przeprowadzono przy prędkości przepływu $v=1,6$ m/s (polistyren, PVC) oraz $v=1,9$ m/s (żywica). Badania opisane w pracy [24] przeprowadzono w rurociągu (w postaci zamkniętej pętli) o średnicy $D=0,0549$ mm i badano mieszaninę, której fazę stałą stanowiły kulki szklane ($\rho_s=2470$ kg/m³, $d=0,44$ mm, $C_{vf}=0,1 \div 0,4$, $v=1 \div 5$ m/s).



Rys. 5. Wpływ prędkości przepływu, uziarnienia i średniego stężenia objętościowego cząstek w przekroju przewodu na położenie punktu maksymalnego stężenia mieszaniny w pionowej osi przekroju poprzecznego przewodu
Fig. 5. Influence of flow velocity, grain size and average cross-sectional concentration on location of the maximum concentration point of transported mixture on the vertical axis

Do weryfikacji równania (10) wykorzystano 9 profili pomierzonych w badaniach własnych, (rys. 4), 8 profili według pracy [22], 19 profili według pracy [23] oraz 19 profili według pracy [24]. Wyniki ilustrujące porównanie wartości uzyskanych w pomiarach z obliczonymi według równania (10) przedstawiono na rysunku 6. Średni błąd względny wynosił 5%, co wskazuje, że równanie (10), ustalone na podstawie pomiarów wykonanych podczas przepływu mieszanin gruboziarnistych w przewodzie o przekroju kwadratowym, może być stosowane do obliczania położenia maksymalnego stężenia mieszaniny w przewodzie o dowolnym przekroju poprzecznym. Przeprowadzona analiza wpływu różnych sił występujących podczas przepływu mieszaniny w przewodzie, ujęta w zaproponowanym parametrze k pokazała, że wpływ na położenie maksymalnego stężenia mieszaniny w pionie ma stosunek gęstości cząstek stałych do cieczy (9). Badania w przewodzie kwadratowym wykonano tylko z jednym

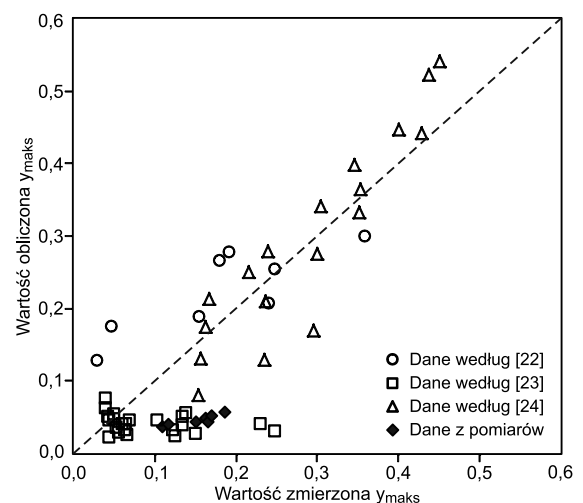


Rys. 6. Porównanie wartości parametru y_{maks} zmierzonych i obliczonych z zależności (10)
Fig. 6. Comparison of y_{maks} values measured and calculated from the equation (10)

materiałem cząstek, co nie pozwoliło określić wpływu gęstości na wartość parametru y_{maks} w równaniu (10). Możliwość taką dały rezultaty badań wykorzystane do weryfikacji równania (10). Na podstawie analizy wymiarowej otrzymano wzór do obliczania położenia maksymalnego stężenia cząstek w przewodzie transportującym mieszaninę ciecz-cząstki stałe, ustalony w stosunkowo szerokim zakresie wartości gęstości cząstek, średnicy cząstek i średniego stężenia objętościowego mieszaniny w przewodzie:

$$y_{maks} = 0,26 C_{vf}^{0,67} \left(\frac{d}{D}\right)^{-0,1} \left(\frac{v}{\sqrt{gD}}\right)^{0,7} \left(\frac{\rho_s}{\rho_l}\right)^{-0,5} \quad (11)$$

Porównanie wartości parametru y_{maks} obliczonych na podstawie równania (11) i pomierzonych przez autorów niniejszej pracy, a także zaczerpniętych z badań opisanych w pracach [22–24], przedstawiono na rysunku 7. Z otrzymanych rezultatów wynika, że takie czynniki, jak stosunek gęstości ciała stałe/ciecz oraz średnica cząstek mają istotny wpływ na profil maksymalnego stężenia cząstek w przekroju poprzecznym przewodu transportującego mieszaninę ciecz-ciała stałe.



Rys. 7. Porównanie wartości parametru y_{maks} zmierzonych i obliczonych z zależności (11)
Fig. 7. Comparison of y_{maks} values measured and calculated from the equation (11)

Wnioski

◆ Do analizy fizycznego mechanizmu opisującego rozkład stężenia objętościowego dużych cząstek w przekroju przewodu transportującego mieszaninę ciecz-cząstki stałe wprowadzono parametr k , który reprezentuje stosunek kompleksowej siły unoszenia (F_L) do efektywnej siły grawitacji (W) w strumieniu płynącej mieszaniny. Określając jego wartość można wstępnie określić charakter krzywej pionowego rozkładu stężenia cząstek stałych.

◆ Metoda PIV (particle image velocimetry) znalazła szerokie zastosowanie w badaniach przepływu mieszanin w przewodach i umożliwia określenie stężenia cząstek stałych w poszczególnych warstwach strumienia mieszaniny oraz pozwala wyznaczyć profile prędkości cieczy i fazy stałej.

◆ Przeprowadzone badania pozwoliły na ustalenie równania (10) określającego położenie maksymalnego stężenia cząstek w przekroju kwadratowego przewodu transportującego mieszaninę gruboziarnistą. Weryfikacja tego równania na podstawie dostępnych w literaturze profilów rozkładu cząstek podczas przepływu mieszanin w rurociągach wykazała, że równanie to można stosować nie tylko w przypadku przewodów o przekroju kwadratowym.

◆ Do określenia położenia w pionie przewodu maksymalnego stężenia cząstek można stosować w stosunkowo szerokim zakresie zmienności parametrów przepływu mieszanin równanie (11).

Badania zostały sfinansowane ze środków The National Natural Science Foundation of China (Grant 51339008, Grant 51434002 i Grant 51209238).

LITERATURA

1. D.F. MCTIGUE: Mixture theory for suspended sediment transport. *Journal of the Hydraulics Division* 1981, Vol. 107, No. 6, pp. 659–673.
2. D.A. DREW: Turbulent sediment transport over a flat bottom using momentum balance. *Journal of Applied Mechanics* 1975, Vol. 42, No. 1, pp. 38–44.
3. R. T. KNAPP: Energy-balance in stream-flows carrying suspended load. *Eos Transactions American Geophysical Union* 1938, Vol. 19, No. 1, pp. 501–505.
4. R. A. BAGNOLD: Auto-suspension of transported sediments; Turbidity currents. *Proceedings of the Royal Society A* 1962, Vol. 265, No. 1322, pp. 315–319.
5. M.A. VELIKANOV: Fluvial Process of Rivers. State Publishing House for Physics and Mathematics Literature, Moscow 1958.
6. R.-M. LI, H.W. SHEN: Solid particle settlement in open-channel flow. *Journal of the Hydraulics Division* 1975, Vol. 101, No. 7, pp. 917–931.
7. M. P. O'BRIEN: Review of the theory of turbulent flow and its relation to sediment-transportation. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 1933, Vol. 14, No.1, pp. 487–491.
8. H. ROUSE: Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. *Angewandte Chemie International Edition* 1937, Vol. 51, No. 9, pp. 2124–2128.
9. J. X. XIA, Z. W. JI: Mechanical interpret for vertical sediment concentration distribution in turbulent flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 2003, Vol. 1, pp. 45–50.
10. J. R. NI, G. Q. WANG: Studies on the two patterns of vertical distributions of particle concentrations and their formation cause. *Journal of Hydraulic Engineering* 1987, Vol. 7, pp. 60–68.
11. J. R. NI, G. Q. WANG, A. G. L. BORTHWICK: Kinetic theory for particles in dilute and dense solid-liquid flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 2000, Vol. 126, No. 12, pp. 893–903.
12. G. Q. WANG, J. R. NI: Kinetic theory for particle concentration distribution in two-phase flow. *Journal of Engineering Mechanics* 1990, Vol. 116, No. 12, pp. 2738–2748.
13. G. Q. WANG, X. D. FU, Y. F. HUANG, G. HUANG: Analysis of suspended sediment transport in open-channel flows: Kinetic-model-based simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 2008, Vol. 134, No. 134, pp. 328–339.
14. J. R. NI, X. J. HUANG, A. G. L. BORTHWICK: Characteristics of hyperconcentrated sediment-laden flows. *Journal of Engineering Mechanics* 2003, Vol. 129, No. 12, pp. 1489–1493.
15. K. PRZEŁOCKI, A. MICHALIK, K. KORBEL, K. WOLSKI, W. PARZONKA, J. SOBOTA, M. PAC-POMARNACKA: A radiometric device for the determination of solids concentration distribution in a pipeline. In: Proc. of 6th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes – HYDROTRANSPORT, 1979, Vol. 6, pp. 219–227.
16. J. SOBOTA: Metoda korelacyjno-skaningowa wyznaczania rozkładu prędkości cząstek stałych w przekroju poprzecznym rurociągu przy przepływie mieszanin. *Archiwum Hydrotechniki* 1982, t. XXIX, z. 4, ss. 531–544.
17. J. SOBOTA, P. JODŁOWSKI: Badania globalnych i lokalnych charakterystyk przepływu mieszaniny popiołowo-wodnej w rurociągu poziomym. *Archiwum Hydrotechniki* 1987, t. XXXIV, z. 3–4.
18. J. SOBOTA, P. JODŁOWSKI: The investigations of the flow characteristics of the coal-water mixture in a horizontal pipeline. *Archive of Mining Sciences* 1988, Vol. 33, No. 2.
19. J. SOBOTA, F. PLEWA: Global and local characteristics of ash mixture flows. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities* 2000, Vol. 3, No. 2.
20. P. R. OWEN: Pneumatic transport. *Journal of Fluid Mechanics* 1969, Vol. 39, No. 2, pp. 407–432.
21. R. A. BAGNOLD: Experiments on the gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society A* 1954, Vol. 225, No. 1160, pp. 49–63.
22. A. MICHALIK: Density patterns of the inhomogeneous liquids in the industrial pipe-lines measured by means of radiometric scanning. *La Houille Blanche* 1973, Vol. 1, pp. 53–57.
23. G. Q. WANG: Theory and Experimental Study on Two-Phase Flow of Liquid-Solid and Grain Flow. Tsinghua University Publisher, Beijing 1989.
24. D. R. KAUSHAL, Y. TOMITA: Solids concentration profiles and pressure drop in pipeline flow of multisized particulate slurries. *International Journal of Multiphase Flow* 2002, Vol. 28, No. 10, pp. 1697–1717.

Yao, N., Qiu, H., Xia, J., Sobota, J. Distribution of Solid Volume Concentration in the Cross-section of a Square Conduit during Hydrotransport of a Coarse Mixture. *Ochrona Środowiska* 2018, Vol. 40, No. 3, pp. 47–52.

Abstract: A formula for calculating the location of maximum solid particle volume concentration zone on the vertical axis of the transverse conduit profile was obtained from analysis of forces acting during the flow of liquid-sand particle mixture as well as by the parameter k introduction. The formula was determined on the basis of flow test results for the 5% coarse

mixture (vol.) containing sand grains of 0.5 mm, 1.0 mm and 3.0 mm in diameter in a 50×50 mm square conduit, at three flow velocities: 1.5 m/s, 2.0 m/s and 2.5 m/s. The transverse concentration profiles were measured using the PIV (particle image velocity) method. Verification of the proposed formula, obtained from the results of the flow tests in the square conductors, showed that with sufficient accuracy it can be applied to the analysis of coarse mixture flows in the pipelines.

Keywords: Hydrotransport, coarse mixtures, particle concentration distributions, square cross-section.