

Jerzy SOBOTA

Zakład Hydrauliki i Hydrotransportu
Instytut Budownictwa Wodnego i Ziarnego
Akademii Rolniczej we Wrocławiu

MODEL POŚLIZG-CIECZ NOŚNA DLA OBLICZANIA SPADKU CIŚNIENIA PRZY PRZEPŁYWIE
DWUFAZOWEJ MIESZANINY CIECZ-CZĄSTKI STAŁE W POZIOMYM RUROCIĄGU

Streszczenie: Nowa propozycja obliczania spadku ciśnienia przy przepływie mieszanin w rurociągach zakłada, że głównym elementem decydującym o stratach energetycznych jest poślizg międzyfazowy. Cząstki stałe transportowane strumieniem cieczy dzieli się na dwie kategorie. Pierwsza z nich - to cząstki grube przemieszczające się w rurociągu z prędkością mniejszą niż ciecz. Druga kategoria cząstek - to cząstki drobne przemieszczające się z tą samą prędkością co ciecz (poślizg równy zero). Tworzą one wspólnie z cieczą nowe medium będące nośnikiem dla cząstek grubych. Straty energetyczne są sumą strat obliczanych oddzielnie dla cieczy nośnej (ciecz + drobne cząstki) oraz dla cząstek grubych. Straty dla cieczy nośnej oblicza się z klasycznego wzoru Darcy-Weisbacha, przy czym współczynnik oporu λ ze wzoru Colebrook'a-White'a z uwzględnieniem lepkości i gęstości cieczy nośnej. Straty energetyczne wynikające z obecności cząstek grubych w strumieniu są zależne od wielkości poślizgu międzyfazowego i oblicza się je wykorzystując nomogram Molerusa-Wellmanna. Powyższy model obliczania spadku hydraulicznego zweryfikowano wynikami własnych badań eksperymentalnych obejmujących 16 różnych rodzajów cząstek stałych. Weryfikację rozszerzono także na badania innych autorów. Wyniki weryfikacji należy uznać za zadowalające.

Fizyczny mechanizm przepływu w rurociągu wielofrakcyjnej mieszaniny należy do bardzo złożonych, a sposób przemieszczania cząstek stałych takiej mieszaniny jest wynikiem zespolonego oddziaływania sił ciężkości i wyporu hydrostatycznego, sił parcia hydrodynamicznego i oporów, sił pochodzących od pulsacji prędkości i ciśnienia, sił towarzyszących uderzeniom cząstek o ściankę rurociągu i zderzeń między samymi cząstkami. Ten kompleks złożonych oddziaływań spowodował, że na dzień dzisiejszy brak jest uniwersalnych zależności opisujących mechanizm przepływu w rurociągu mieszaniny ciecz - cząstki stałe.

Jednym z elementów tego mechanizmu jest poślizg międzyfazowy. Na podstawie fenomenologii zjawiska przepływu mieszaniny ciecz - cząstki stałe postawiono hipotezę [1], że poślizg międzyfazowy odgrywa istotną rolę w wielkości strat energetycznych występujących przy przepływie mieszaniny w rurociągu. Na tej podstawie zbudowano model pozwalający wyznaczyć spadek ciśnienia dla przepływu mieszaniny zawierającej materiał wielofrakcyjny. Transportowane przez strumień cieczy cząstki stałe, zgodnie z założeniami modelu, dzieli się na dwie kategorie. Pierwsza z nich - to cząstki grube przemieszczające się z opóźnieniem w stosunku do transpor-

tującej je cieczy. Schematyczny wykres spadku ciśnienia dla mieszaniny zawierającej wyłącznie cząstki grube, w zakresie praktycznie stosowanych prędkości, zamieszczony jest na rys. 1a. Wzrost prędkości przepływu mieszaniny zawierającej ziarna grube powoduje zmniejszenie poślizgu, co z kolei prowadzi do zmniejszenia się dodatkowego spadku ciśnienia wynikającego z obecności ziarn grubych w strumieniu transportującej je cieczy.

Dla takiej mieszaniny spadek ciśnienia jest równy

$$\Delta p_m = \Delta p_w + \Delta p_p \quad (1)$$

gdzie: Δp_m - spadek ciśnienia dla mieszaniny,

Δp_w - spadek ciśnienia dla cieczy,

Δp_p - dodatkowy spadek ciśnienia wynikający z obecności ziarn grubych w strumieniu cieczy.

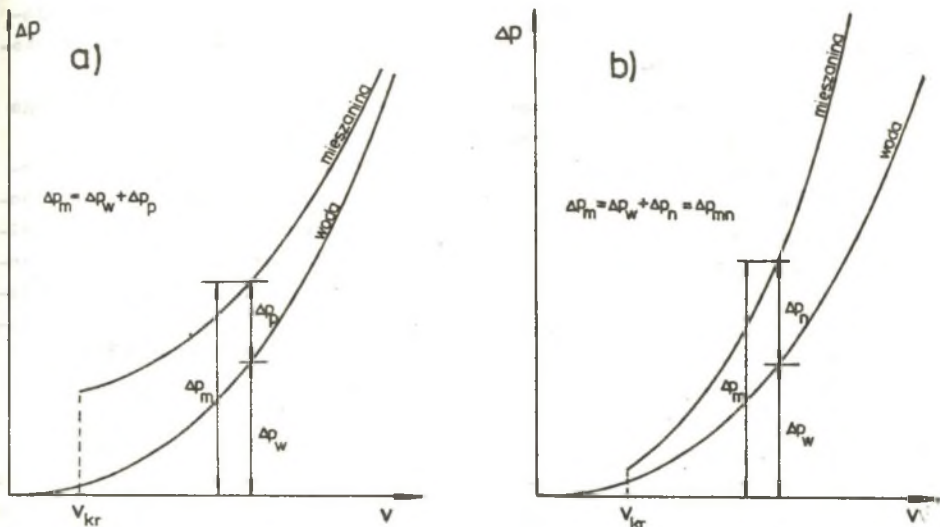
Wielkość dodatkowego spadku ciśnienia Δp_p można wyznaczyć wykorzystując nomogram podany przez Molerusa i Wellmanna [2, 3], zbudowany w oparciu o założenie, że czynnikiem determinującym wielkość Δp_p jest poślizg międzyfazowy.

Druga kategoria cząstek - to ziarna drobne, które przemieszczają się w rurociągu z tą samą prędkością, co i transportująca je ciecz (poślizg równy zero). Mieszanina zawierająca tylko takie ziarna stanowi pseudojednorodne medium, które można scharakteryzować lepkością i gęstością. Przepływ takiej mieszaniny w rurociągu sprowadza się zatem do przypadku przepływu cieczy o odmiennych własnościach niż ciecz stanowiąca bazę mieszaniny (np. czysta woda). Schematyczny wykres spadku ciśnienia dla mieszaniny zawierającej wyłącznie ziarna drobne przedstawiony jest na rys. 1b, a wielkość tego spadku można zapisać w formie

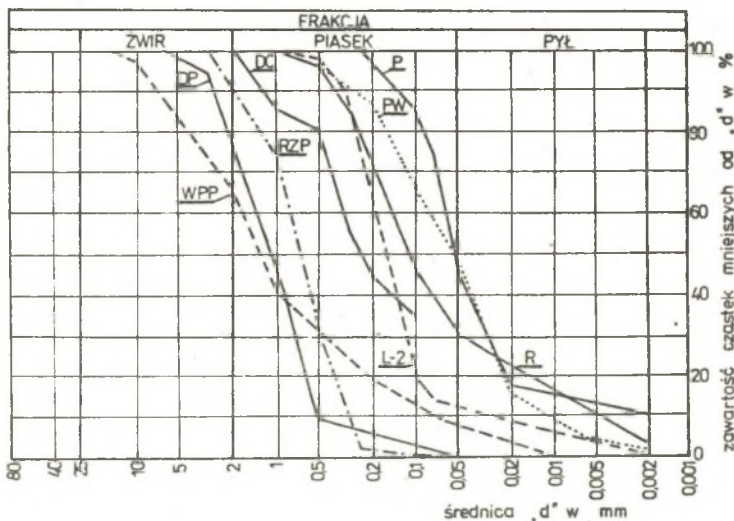
$$\Delta p_m = \Delta p_w + \Delta p_n = \Delta p_{mn} \quad (2)$$

gdzie Δp_n jest dodatkowym spadkiem ciśnienia wynikającym z obecności ziarn drobnych w strumieniu cieczy (wody). Wielkość Δp_n rośnie ze wzrostem prędkości przepływu, co jest wynikiem większej gęstości i lepkości mieszaniny niż cieczy stanowiącej bazę mieszaniny. Wielkość spadku ciśnienia Δp_{mn} przy przepływie mieszaniny cieczy i ziarn drobnych (ciecz nośna) oblicza się z klasycznych równań Darcy-Weisbacha i Collebrook'a - White'a z uwzględnieniem lepkości i gęstości cieczy nośnej.

W rozważanych dwóch przypadkach przepływu mieszanin zawierających cząstki stałe o zdecydowanie różnych wymiarach wpływ na przebieg zależności $\Delta p_m = f(v_m)$ mają dwa różne elementy. Dla mieszaniny zawierającej duże cząstki stałe elementem tym jest poślizg międzyfazowy, a dla mieszaniny zawierającej drobne cząstki, elementem tym jest gęstość i lepkość nowej pseudojednorodnej cieczy. W strefie praktycznie stosowanych prędkości przepływu elementy te w odmienny sposób wpływają na przebieg krzywej strat ciśnienia odniesiony do krzywej spadku ciśnienia dla samej cieczy będącej bazą mieszaniny. Przy przepływie strumienia zawiera-



Rys. 1. Schematyczna zależność spadku ciśnienia od prędkości przepływu mieszaniny
 a - ziarna grube
 b - ziarna drobne



Rys. 2. Uziarnienie badanych materiałów L-2, P, R - odpady poflotacyjne rudy miedzi, DP - piasek gruby, DO - odpady poflotacyjne rudy żelaza, WPP - węgiel, RZP - piasek rzeczny, PW - popiół

jącego cząstki grube dodatkowy spadek ciśnienia maleje z prędkością przepływu mieszaniny. Natomiast przy przepływie strumienia cieczy zawierającego cząstki drobne dodatkowy spadek ciśnienia rośnie ze wzrostem prędkości przepływu mieszaniny.

Rozważane dwa przypadki stanowią krańcowe przykłady składu ziarnowego mieszanin. W przypadkach praktycznych, mieszanina składa się z cząstek stałych o różnych średnicach i różnych proporcjach ziarn drobnych i grubych. O warunkach przepływu mieszanin polifrakcyjnych będą jednak decydowały te same elementy. Ich wpływ na straty ciśnienia będzie proporcjonalny do ilości cząstek grubych i drobnych transportowanych strumieniem cieczy. Cząstki drobne wspólnie z cieczą utworzą nową ciecz przenoszącą cząstki grube. Ta pseudojednorodna ciecz będzie zatem nośnikiem cząstek grubych i może nosić nazwę cieczy nośnej charakteryzowanej określonymi własnościami fizycznymi. Spadek hydrauliczny przy przepływie w rurociągu mieszanin wielofrakcyjnych będzie więc wypadkową wpływu cząstek grubych i drobnych. Wypadkowa tych wpływów da w rezultacie różne krzywe spadku ciśnienia i różne kształty tych krzywych, obserwowane wielokrotnie podczas pomiarów. Zgodnie z proponowanym modelem spadek ciśnienia przy przepływie mieszaniny w rurociągu opisuje poniższa zależność:

$$\Delta p_m = \Delta p_w + \Delta p_n + \Delta p_p = \Delta p_{mn} + \Delta p_p \quad (3)$$

Powyższy sposób wyznaczania spadku ciśnienia przy przepływie mieszanin w rurociągach został zweryfikowany rezultatami badań eksperymentalnych wykonanych dla szesnastu różnych materiałów. Na rys. 2 i 3 zestawiono krzywe uziarnienia badanych materiałów.

Badania przeprowadzono na rurociągach o średnicach: 25 mm, 40 mm, 51.6 mm, 100 mm, 150 mm i 207 mm. Zakres koncentracji objętościowych był zmienny dla poszczególnych materiałów i mieścił się w przedziale $c = 0.02-0.44$. Szczegółowy zakres badań wraz z metodyką przedstawiony jest w pracy [1].

Podstawowym problemem prezentowanego modelu jest granica podziału cząstek stałych mieszaniny na dwie kategorie: ziarna drobne i grube. Aktualne rozpoznanie zjawiska poślizgu międzyfazowego nie daje żadnych podstaw do określenia tej granicy. Wyrażane w przedmiotowej literaturze poglądy na temat cieczy nośnej, aczkolwiek różnie definioowanej, sprowadzają się do wniosku, że granica podziału na ziarna tworzące ciecz nośną, zawarta jest między $d = 0.05$ mm a $d = 0.1$ mm. Wniosek ten oparty jest o stanowisko Smoldyriewa [4], Vocadlo i Charlesa [5], Hisamitsu i in. [6], Karasika [7], Pokrowskiej [8], Silina i in. [9], Woleńskiego [10]. W prezentowanej weryfikacji przyjęto, że granica podziałowa na ziarna grube i drobne wynosi $d = 0.075$ mm. W obliczeniach weryfikacyjnych lepkość cieczy nośnej wyznaczano ze wzoru Thomasa D.G. [11]:

$$\mu_n = \mu_w (1 + 2.5 c + 10.05 c^2 + 0.00273 \exp 16.6 c) \quad (4)$$

Procedura weryfikacyjnych obliczeń dla określonej mieszaniny była na-

stępująca:

1. uziarnienie cząstek stałych mieszaniny dzielono na dwie kategorie według średnicy ziarna podziałowego $d = 0.075$ mm,
2. określano koncentrację objętościową ziarna grubych i drobnych w mieszaninie:

$$c_g = c p_g$$

$$c_n = c p_n$$

gdzie p_g i p_n jest względnym udziałem ziarn grubych i drobnych w składzie granulometrycznym,

3. wyznaczono średnicę ziarn grubych d_g jako wartość średnioważoną frakcji grubych,
4. obliczano prędkość swobodnego opadania W_o odpowiadającą średnicy d_g wykorzystując związek funkcyjny między liczbą Archimedeasa i liczbą Reynoldsa podany przez Razenbauma Todesa [12]:

$$Re_d = \frac{Ar}{18 + 0.61 \sqrt{Ar}} \quad (5)$$

5. obliczano wartość parametru

$$Fr^{\pi 2} = \frac{W_o^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g D} \quad (6)$$

6. obliczano wartości parametru Fr_p dla różnych prędkości przepływu v_m , które typowano na podstawie eksperymentalnych wykresów $I_m = f(v_m)$ uwzględniając ich charakterystyczne przebiegi

$$Fr_p = \frac{v_m}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) d_g g}} \quad (7)$$

7. z nomogramu Molerusa-Wellmanna (rys. 4) odczytujemy wartość stosunku (v_{Δ} / v_m)

8. obliczano wartość parametru X

- dla $c_g \leq 0.25$

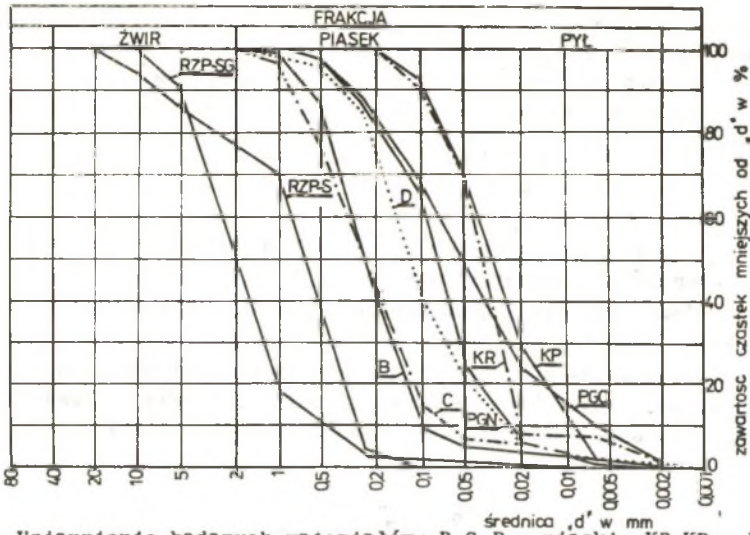
$$X = X_o = \frac{(v_{\Delta} / v_m)^2}{1 - (v_{\Delta} / v_m)} \quad (8)$$

- dla $c_g > 0.25$

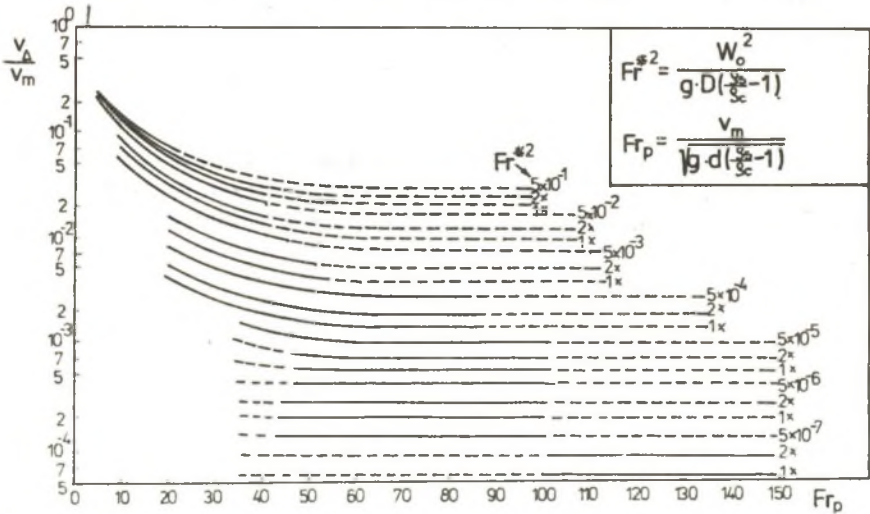
$$X = X_o + 0.1 Fr^{\pi 2} (c_g - 0.25) \quad (9)$$

9. obliczano wielkość dodatkowego spadku ciśnienia Δp_p

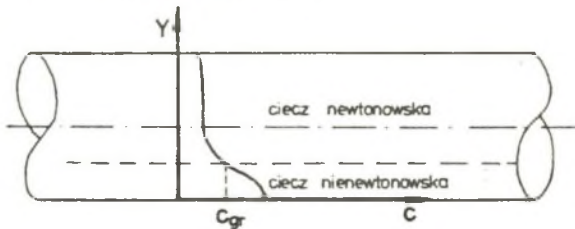
$$\frac{\Delta p_p}{L} = X c_g (\rho_s - \rho_w) g \left(\frac{v_m}{W_o}\right)^2 \quad (10)$$



Rys. 3. Uziarnienie badanych materiałów: B, C, D - piaski, KR, KP - koncentrat miedzi, PGO, PGN - popiół, RZP-S - piasek rzeczny sortowany, RZP-SG - piasek rzeczny sortowany z glina



Rys. 4. Nomogram Molerusa-Wellmanna



Rys. 5. Schemat przepływu mieszaniny z warstwą nienewtonowską

10. określano chropowatość rurociągu, w którym wykonano badania eksperymentalne na podstawie wielkości pomierzonych spadków dla przepływu cieczy (wody),
11. ze wzoru Collebrook'a-White'a obliczano współczynnik oporu λ_n dla przepływu mieszaniny cieczy i ziarn drobnych cieczy nośnej, przy czym lepkość cieczy nośnej obliczano ze wzoru (4)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re_n \sqrt{\lambda_n}} + \frac{k}{3.71 D} \right) \quad (11)$$

12. wielkość spadku ciśnienia dla przepływu cieczy nośnej wyznaczano ze wzoru Darcy-Weisbacha

$$\frac{\Delta p_{mn}}{L} = \lambda_n \frac{1}{D} \frac{v_m^2}{2g} \gamma_n \quad (12)$$

13. obliczano całkowity spadek ciśnienia przy przepływie danej mieszaniny

$$\frac{\Delta p_m}{L} = \frac{\Delta p_{mn}}{L} + \frac{\Delta p_p}{L} \quad (13)$$

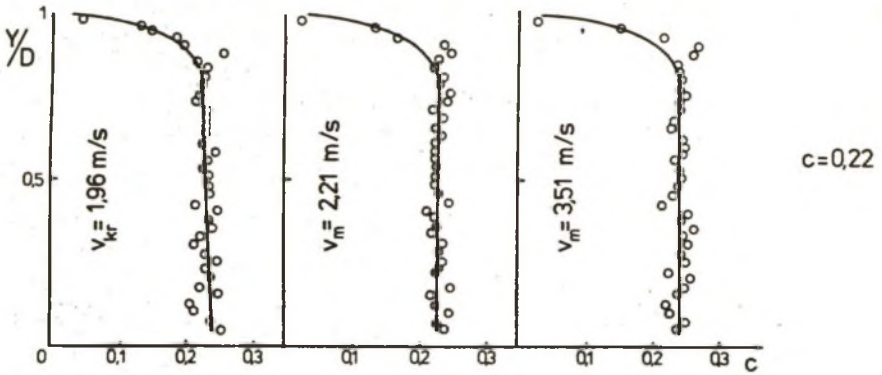
14. określano wielkość odchyłki między pomierzonym i obliczonym według modelu spadkiem hydraulicznym w metrach słupa wody

$$QT = \frac{I_{m\text{obl}} - I_{m\text{pom}}}{I_{m\text{pom}}} \quad (14)$$

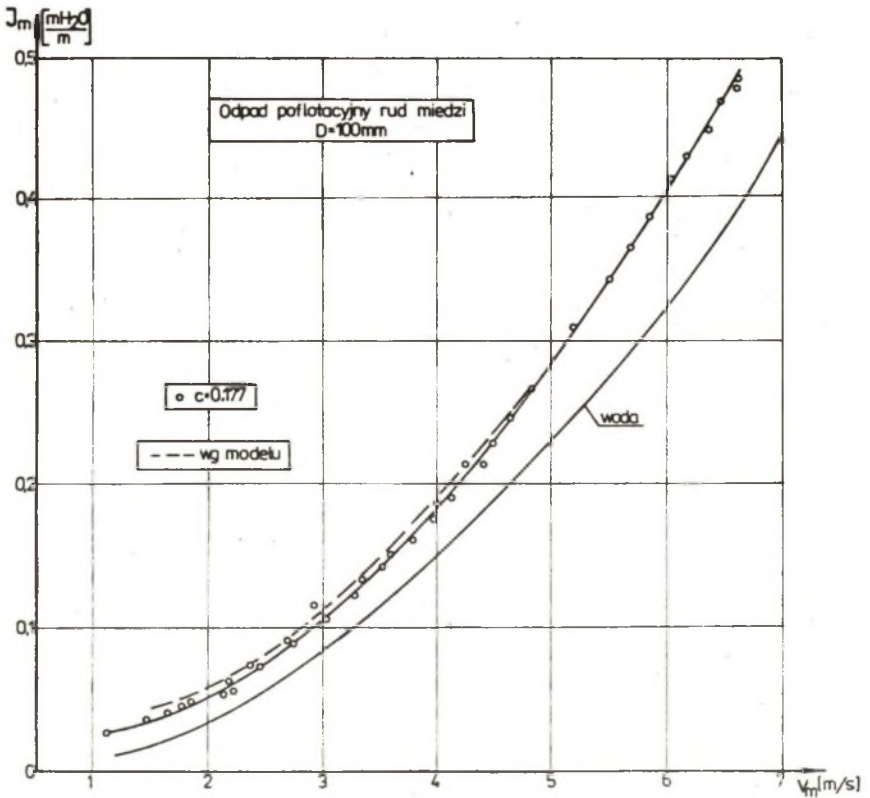
Rezultaty przeprowadzonej weryfikacji modelu dla 16 różnych materiałów wykazały, że rozbieżności między spadkiem hydraulicznym obliczonym zgodnie z modelem a spadkiem hydraulicznym pomierzonym waha się od kilkunastu procent, z wyjątkiem kilku przypadków. Przypadki te dotyczą przepływu mieszanin o wysokich koncentracjach z małymi prędkościami, bliskimi prędkości krytycznej v_{kr} .

Zestawienie parametrów tych przypadków, dla których wartość QT przekroczyła $\pm 20\%$ (dotyczy 7 materiałów) prowadzi do interesujących wniosków. Otóż wartość QT ma znak minus dla materiałów o przewodzie ziarn drobnych. Znak minus przy QT, to większa wartość spadku pomierzonego niż obliczonego. Tę rozbieżność można wyjaśnić następująco. Przy dużych koncentracjach średnich wystąpiło w strefie przydennej przekroczenie koncentracji granicznej i pewna warstwa płynącego strumienia mieszaniny zachowuje się jak ciecz nienewtonowska. Przepływ w tych warunkach charakteryzuje schemat na rys. 5. Określenie strat energetycznych strumienia o tak złożonych własnościach pozostaje aktualnie problemem otwartym.

Znacznie trudniej rezszyfrować mechanizm towarzyszący przepływowi miesza-



Rys. 6. Rozkład koncentracji w osi pionowej rurociągu - odpad po flotacyjnej rudy miedzi L-2



Rys. 7. Zależność spadku hydraulicznego od prędkości przepływu mieszaniny L-2

nin o dominującej zawartości ziarn grubych w warunkach małej prędkości i dużej koncentracji, powodujący mniejszą dyspację energii niż przewidywane to proponowany model. Mechanizm ten powinien powodować zmniejszanie się poślizgu. Pewne wskazówki odnośnie tego mechanizmu daje analiza przepływu materiału L-2. Dla tego materiału profile gęstości przy koncentracji około 20% nie zmieniają się w zasadzie z prędkością przepływu (rys. 6), a skład ziarnowy charakteryzuje się równomiernymi proporcjami między poszczególnymi frakcjami ziarnowymi. W tych warunkach szczególną rolę należałoby przypisać dużej koncentracji, która wymusza skrępowane ruchy ziarn. Nie pozwala to określonym frakcjom na przyspieszenie, jak ma to miejsce przy mniejszych koncentracjach. Następuje wyrównanie się prędkości ziarn o różnych średnicach, a konsekwencją tego jest zmniejszenie się poślizgu. Analogiczny proces ma miejsce podczas sedymentacji materiału wielofrakcyjnego, gdzie następuje zrównanie się prędkości opadania ziarn dużych i małych. Taki pogląd wyrazili m.in. w uogólnionej teorii sedymentacji Maude i Witmore [13]. Niezależnie od przedstawionych powyżej poglądów należy pamiętać, że wpływ na wielkość różnicy między spadkiem pomierzonym a obliczonym mają następujące uwarunkowania:

- uproszczenia poczynione przez Molerusa i Wellmanna przy opracowywaniu nomogramu,
- dokładność odczytu z nomogramu,
- dokładność wykonywania pomiarów i sposób wyrównania wykresów $I_m = f(v_m)$,
- założenia poczynione w obliczeniach weryfikacyjnych (ziarno podziałowe, lepkość cieczy nośnej).

Kilka przykładowych wykresów $I_m = f(v_m)$ pomierzonych i wyznaczonych na podstawie modelu przedstawiono na rys. 7, 8 i 9.

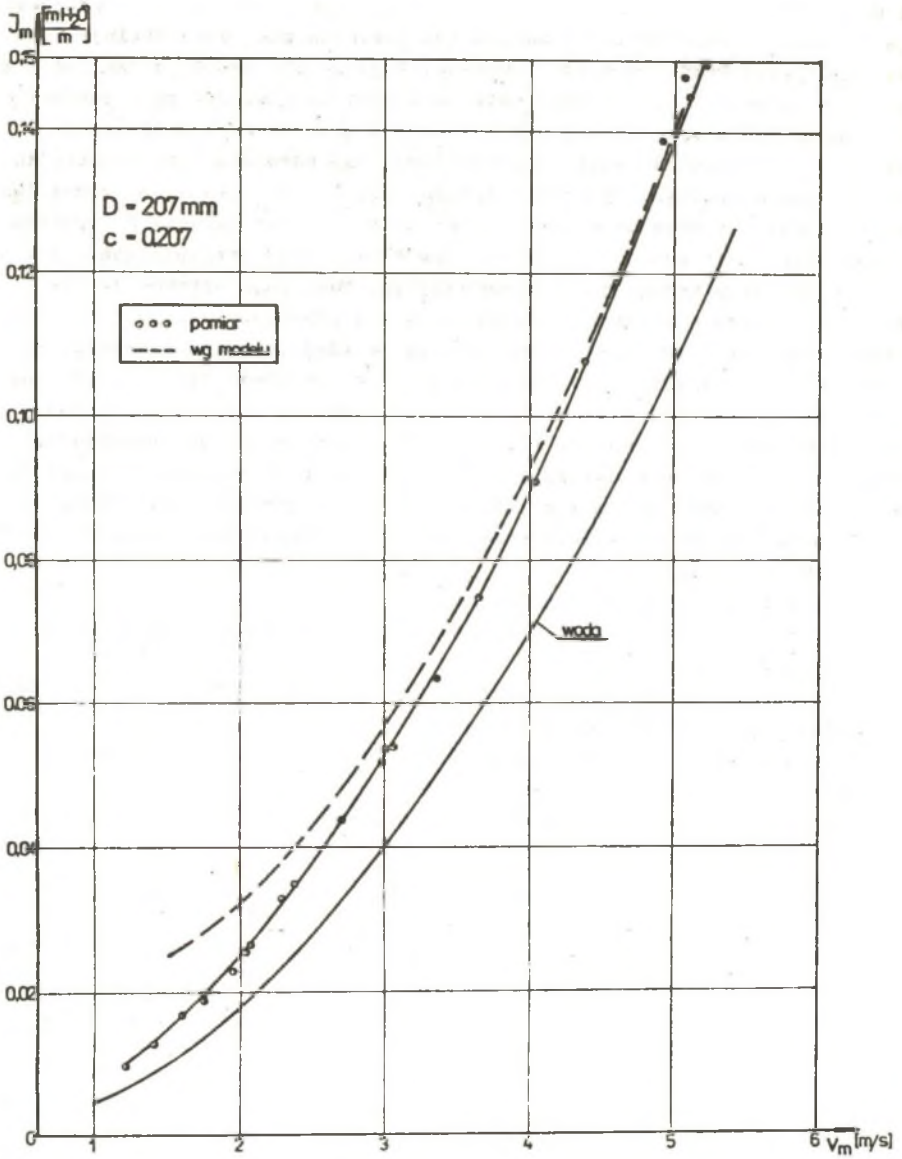
Specjalnego komentarza wymaga wielkość poślizgu, którą można wyznaczyć za pomocą nomogramu przedstawionego na rys. 4. Poślizg definiowany jest następująco:

$$v_{\Delta} = v_m - v_s \quad (15)$$

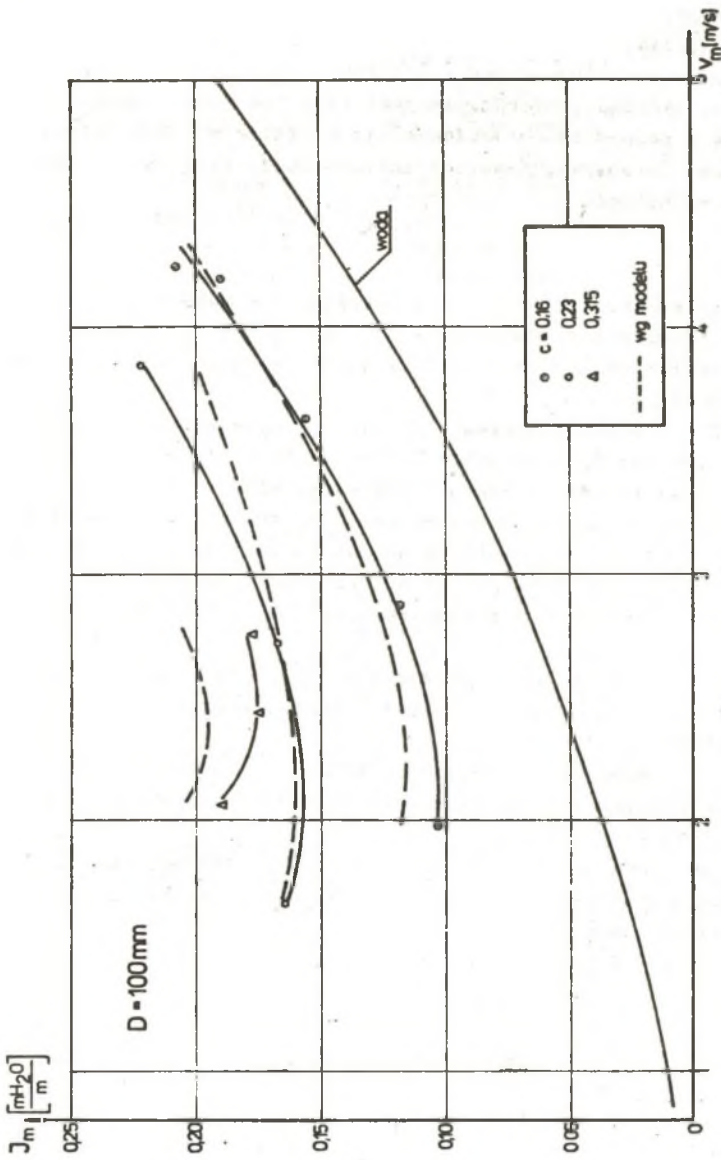
Molerus i Wellmann w pracy [3] wyraźnie zaznaczają, że wielkość v_{Δ} wyznaczana na podstawie ich metodyki jest fizyczną interpretacją wyników pomiaru spadku ciśnienia, na podstawie których zbudowano nomogram.

W dyskusji toczonej na ten temat między Molerusem i Wellmannem [14] oraz Chhabrą i Richardsonem [15] przytoczone są wartości v_{Δ} pomierzone i wyznaczone z nomogramu, które raz różnią się między sobą a raz są prawie takie same.

W przedmiotowej literaturze brak jest szerszej informacji o wartościach pomierzonych bezpośrednio prędkości fazy stałej i cieczy. Głównym powodem tego jest złożoność takiego pomiaru, który dla naturalnych mieszanin można wykonać jedynie przy zastosowaniu techniki radioizotopowej. Dlatego też trudno jest aktualnie ocenić różnice między poślizgiem rzeczywistym a poślizgiem wyznaczonym z nomogramu. Z tych to względów rozpoczęto aktualnie realizację programu badawczego, którego głównym celem



Kys. 8. Zależność spadku hydraulicznego od prędkości przepływu mieszaniny L-2



Rys. 9. Zależność spadku hydraulicznego od prędkości przepływu mieszaniny RZP

jest określenie zależności poślizgu od warunków przepływu i wielkości ziarn tworzących mieszaninę. Program ten obejmuje także pomiar pozostałych elementów modelu. Ukierunkowanie dalszych prac badawczych z zakresu przepływu mieszanin w rurociągach na dokładne ustalenie wielkości tych elementów i współzależności między nimi, winno być kolejnym krokiem do opisu praw rządzących przepływem mieszaniny.

Podstawą do takiego stwierdzenia jest fakt, że model poślizg - ciecz nośna pozwala z zadowalającą dokładnością określić wielkość strat energetycznych przy przepływie dowolnej newtonowskiej mieszaniny ciecz - cząstki stałe w rurociągu.

Literatura

- [1] Sobota J.: Fenomenologiczny model zależności spadku hydraulicznego od prędkości przepływu mieszaniny ciecz - cząstki stałe w rurociągu poziomym, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Rozprawy, 1986 w druku
- [2] Wellmann P.: Ein neues Konzept für die Vorausberechnung des Druckverlustes bei der hydraulischen Förderung im horizontalen Rohr, dissertation Universität Erlangen - Nürnberg, 1980
- [3] Molerus O., Wellmann P.: A new concept for the calculation of pressure drop with hydraulic transport of solids in horizontal pipes, Chemical Engineering Science, vol. 36, no 10, 1981, ss. 1623 - 1632
- [4] Smoldyriew A.E.: Gidro- i pneмотransport. Wyd. "Metallurgija" Moskwa 1975
- [5] Vocadlo J.J., Charles M.E.: Prediction of pressure gradient for the horizontal turbulent flow of slurries, Hydrotransport 2, paper C1, Warwick, 1972
- [6] Hisamitsu N., Shodji Y., Kosugi S.: Effect of added fine particles on flow properties of setting slurries. Hydrotransport 5, paper D3, Hannover 1978
- [7] Karasik W.M., Asaulenko I.A., Witoszkin J.K.: Intensyfikacja gidrotransporta produktów i odpadów obogaszczczenia gornoobogatitielnych kombinatów, Naukowa Dumka, Kiev, 1976
- [8] Pokrowska W.N.: Puti powyzhenija effektivnosti gidrotransporta, Niedra, 1972
- [9] Silin i in.: Gidrotransport, Naukowa Dumka, Kiev, 1971
- [10] Wolański Z.: Badanie rozkładu koncentracji i uziarnienia cząstek stałych przy hydrotransportie odpadów flotacji rud miedzi w poziomych rurociągach tłocznych, rozprawa doktorska, AR Wrocław, 1972
- [11] Thomas D.G.: Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles, Journal of Colloid Sc., vol. 20, 1965
- [12] Rozenbaum R.B., Todes O.M.: Stiesniennoje padenije šara w cilindričeskoj trubkie, Doklady Akademii Nauk ZSRR, tom 115, nr 3, 1957
- [13] Maude A.D., Withmore R.L.: A generalized theory of sedimentation,

British J. of Applied Phys., vol. 9, december 1958

- [14] Molerus O., Welmann P.: Autor's reply on comments on "A new concept for the calculation...", Chemical Engineering Science, vol. 37, nr 10, 1982
- [15] Chhabra R.P., Richardson J.F.: Comments on "A new concept for the calculation...", Chemical Engineering Science, vol. 37, nr 10, 1982.

Zestawienie oznaczeń

- Ar - liczba Archimedeasa
- c - koncentracja objętościowa
- c_g - koncentracja objętościowa ziarn grubych
- c_n - koncentracja objętościowa ziarn drobnych
- d - średnica cząstki stałej
- d_g - średnioważona średnica ziarn grubych
- D - średnica rurociągu
- g - przyspieszenie ziemskie
- $I_{m_{obl}}$ - spadek hydrauliczny obliczony według modelu
- $I_{m_{pom}}$ - spadek hydrauliczny pomierzony
- k - chropowatość rurociągu
- L - długość rurociągu
- Δp_m - spadek ciśnienia przy przepływie mieszaniny
- Δp_w - spadek hydrauliczny przy przepływie cieczy (wody)
- Δp_{mn} - spadek hydrauliczny przy przepływie cieczy nośnej
- Δp_p - dodatkowy spadek ciśnienia wynikający z obecności ziarn grubych w strumieniu cieczy (wody)
- Δp_n - dodatkowy spadek ciśnienia wynikający z obecności ziarn drobnych w strumieniu cieczy (wody)
- Re_n - liczba Reynoldsa dla przepływu w rurociągu cieczy nośnej
- Re_d - liczba Reynoldsa dla opadania cząstki stałej
- v_m - prędkość przepływu mieszaniny
- v_s - prędkość przemieszczenia się w rurociągu cząstek stałych
- v_Δ - poślizg międzyfazowy definiowany równaniem (15)
- W_o - prędkość swobodnego opadania cząstki stałej
- μ_m - lepkość mieszaniny
- μ_w - lepkość cieczy (wody)
- ρ_s - gęstość cząstek stałych
- ρ_w - gęstość cieczy
- γ_n - ciężar właściwy cieczy nośnej
- λ_n - współczynnik oporu przy przepływie w rurociągu cieczy nośnej.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Maciej ZARZYCKI

Wpłynęło do Redakcji 1987.04.09

МОДЕЛЬ СКОЛЬЖЕНИЕ-НЕСУЩАЯ ЖИДКОСТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ НАПОРА
ПРИ ТЕЧЕНИИ СМЕСИ ЖИДКОСТЬ-ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Р е з ю м е

Новая модель для определения гидравлического уклона при течении в трубопроводах предполагает, что главным элементом решающим о величине энергетических затрат есть межфазовое скольжение. Твердые частицы транспортируемые потоком жидкости разделяются на две категории. Первая категория - это крупные частицы, которых скорость меньше чем скорость жидкости. Вторая категория - это мелкие частицы, которые перемещаются в трубопроводе с такой же скоростью как и жидкость (скольжение равное нулю). Эти частицы образуют вместе с жидкостью новую смесь, которая является несущей средой для крупных частиц. Энергетические затраты это сумма затрат рассчитываемых отдельно для несущей жидкости (мелкие частицы и вода) и крупных частиц. Для несущей жидкости потери напора вычисляются по формулам Дарси-Вайсбаха и Колебрука-Уайта, при чем коэффициент λ вычисляется по формуле Колебрука-Уайта, учитывая плотность и вязкость несущей жидкости. Потери напора, вытекающие с присутствия крупных частиц в потоке пульпы, зависят от величины скольжения и при их расчёте используется номограмма Молеруса-Веллманна. Предложенная модель расчёта потерь напора была проверена результатами собственных исследований для 16 разных твердых частиц и результатами других авторов. Итоги проверки модели удовлетворительные.

SLIP-CARRIER LIQUID MODEL FOR THE PREDICTION OF PRESSURE DROP
DURING SOLIDS-LIQUID MIXTURE FLOW IN HORIZONTAL PIPELINES

S u m m a r y

New model determining pressure drop for solids-liquid mixture flow in pipelines has been suggested. The slip between solids and liquid velocities is the main element of the model. Solids conveyed by liquid are divided into two categories. The first category includes coarse solids transported with the slip. Fine solids conveyed at the same velocity as liquid belong to the second category. The fine solids and liquid composed the carrier for coarse solids. Losses of energy is the sum of all the losses calculated separately for both categories of solids. Losses for carrier liquid (fine particles + water) are calculated from Darcy-Weisbach and Colebrook-White equations. The coefficient in Colebrook-White equation depends on density and viscosity of carrier liquid. Losses of energy resulted from the presence of coarse solids in mixture stream depend on slip velocity. The Molerus-Wellmann nomogram is applied in the calculation of the losses. The suggested model has been verified by experimental studies for sixteen different materials. The other authors studies have been verified as well. The results of the verification have been found satisfactory.