

Grzegorz STROZIK

## KRYTERIA OPTYMALIZACJI PARAMETRÓW INSTALACJI HYDROTRANSPORTU W GÓRNICtwo PODZIEMNYM

**Streszczenie.** Projektowanie układów hydrotransportu mieszanin stosowanych w technologiach górnictwa podziemnego oparte na wynikach badań laboratoryjnych i obliczeniach teoretycznych wymaga określenia zależności strat energetycznych od prędkości przepływu oraz średnicy rurociągu i koncentracji części stałych. Znajomość charakterystyki strat energetycznych pozwala nie tylko na sprawdzenie, czy proponowany układ spełnia podstawowe wymagania danego procesu, ale także pozwala na optymalizację pracy instalacji hydrotransportu i składu mieszaniny. Biorąc pod uwagę różne możliwe priorytety stawiane technologiom górnictw, należy przyjąć najodpowiedniejszą procedurę postępowania, pozwalającą na uzyskanie optymalnych efektów technicznych i ekonomicznych. W artykule scharakteryzowano metody postępowania przy wyznaczaniu i optymalizacji parametrów przepływu mieszanin w instalacjach grawitacyjnych i pompowych.

## OPTIMIZATION CRITERIA OF HYDROTRANSPORTATION FACILITIES IN UNDERGROUND MINING

**Summary.** The design of hydrotransportation systems applied in mining technologies based on laboratory tests results and theoretical calculations requires the relation between head loss and flow velocity as well as pipe diameter and concentration of solids. If these relations are known then it will be possible to optimize the efficiency of fill and composition of a mixture. Taking under consideration different possible preferences, at the phase of design, optimal technical and economical results can be achieved by use of appropriate design method. The paper describes methods for determination and optimization of operation of gravity and pump driven pipe systems.

### 1. Wprowadzenie

Przepływowi mieszaniny ciał stałych i cieczy towarzyszą zawsze straty energii. Wielkość strat energetycznych zależy od wielu parametrów: średnicy rurociągu, prędkości przepływu, lepkości cieczy nośnej, koncentracji, uziarnienia ciał stałych i innych. Podstawowym zatem

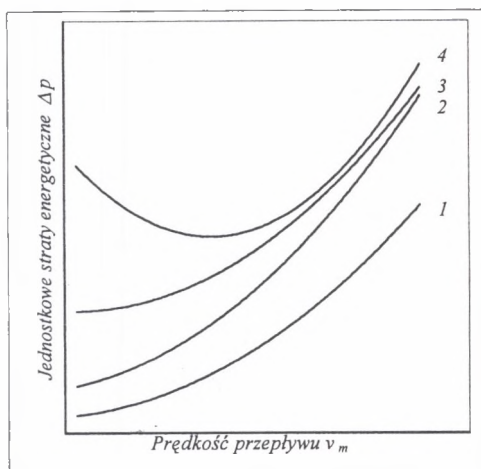
zadaniem przy projektowaniu układu hydrotransportu jest wyznaczenie wielkości jednostkowych strat energetycznych przepływu mieszaniny o zadanym składzie i prędkości ruchu, a następnie sprawdzenie, czy dostępna w układzie energia pozwala na uzyskanie takich parametrów przepływu.

## 2. Wyznaczanie charakterystyk przepływu mieszanin ciecz-ciała stałe

Złożoność czynników decydujących o wielkości jednostkowych strat energetycznych przepływu mieszaniny sprawia, że dotychczas brak jest uniwersalnych równań umożliwiających ich wyznaczenie przy znajomości własności mieszaniny, takich jak gęstość, koncentracja części stałych, uziarnienie, lepkość cieczy nośnej i mieszaniny. Bogata literatura hydrotransportu dostarcza wielu równań i procedur obliczeniowych, które przy próbie adaptacji do odmiennych od wzorcowych rodzajów mieszanin czy warunków przepływu okazują się często mało wartościowe. Nieodzowne jest więc przeprowadzenie badań mieszanin dla ustalenia zmienności jednostkowych strat energetycznych przepływu w możliwie jak najszerszym zakresie prędkości przepływu, koncentracji części stałych i – w przypadku mieszanin wieloskładnikowych - proporcji składników transportowanego materiału. Jak wykazano w dalszej części pracy na przykładzie dwóch rodzajów popiołów lotnych, poszczególne rodzaje materiałów ziarnistych o zbliżonych własnościach fizycznych i chemicznych mogą charakteryzować się istotnie różnymi przebiegami zależności strat energetycznych przepływu od koncentracji.

Na wykresie na rys.1. przedstawiono przykładowe przebiegi zależności jednostkowych strat energetycznych od prędkości przepływu dla wybranych rodzajów mieszanin. Krzywa (1) odnosi się do przepływu wody, krzywa (2) opisuje charakterystykę przepływu mieszaniny drobnofrakcyjnej, która ma własności cieczy o podwyższonej lepkości i gęstości.

Mieszanina (3) charakteryzuje się gęstością zbliżoną do mieszaniny (2), lecz zawiera pewną ilość ziaren frakcji gruboziarnistej. Z kolei krzywa (4) opisuje przepływ mieszaniny zawierającej przeważającą ilość ziaren frakcji gruboziarnistych. Zależności jednostkowych strat energetycznych od prędkości przepływu mieszanin można wyznaczać na podstawie:



Rys. 1. Przykładowe przebiegi zależności strat energetycznych od prędkości przepływu  
Opis mieszanin w tekście

Fig. 1. Examples of head loss/velocity relations. See the text for details

1. Badań w instalacjach laboratoryjnych.
2. Modeli przepływu prognozujących przebieg krzywych płynięcia na podstawie znanych własności mieszanin.
3. Danych z eksploatowanych instalacji przemysłowych.
4. Pomiarów na instalacjach pilotażowych (w skali technicznej).
5. Pomiarów wiskozymetrycznych, w przypadku mieszanin homogenicznych lub pseudohomogenicznych po wyznaczeniu na ich podstawie modelu reologicznego.

### 3. Optymalizacja zużycia energii w hydrotransporcie pompowym

W instalacjach hydrotransportu pompowego optymalne warunki pracy uzyskuje się, gdy ilość energii potrzebnej na przetransportowanie jednostkowej ilości materiału osiąga wartość minimalną. Wyznacza się w tym celu wielkość tzw. jednostkowego zużycia energii. Jednostkowe zużycie energii (SEC – *specific energy consumption*) określa ilość energii niezbędnej do przetransportowania określonej masy materiału na określoną odległość w rurociągu:

$$SEC = \frac{I_m g}{C_v \rho_s} \left[ \frac{Ws}{kgm} \right] \quad \text{lub} \quad (1)$$

$$SEC = 0,2778 \frac{I_m g}{C_v \rho_s} \left[ \frac{kWh}{Mgkm} \right]$$

gdzie:

$I_m$  – jednostkowy spadek hydrauliczny przy przepływie wyrażony w metrach słupa mieszaniny na metr bieżący rurociągu,

$g$  – przyspieszenie ziemskie,  $[m/s^2]$ ,

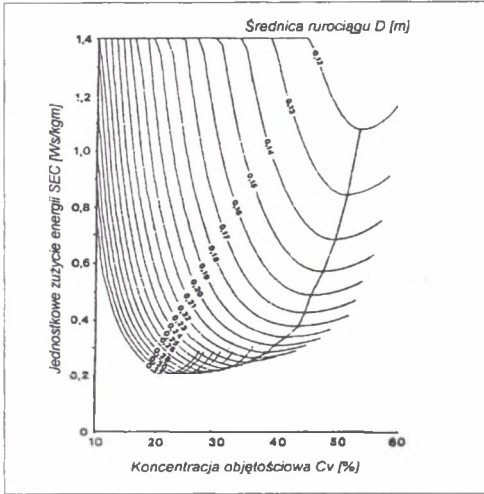
$C_v$  – koncentracja objętościowa mieszaniny,

$\rho_s$  – gęstość właściwa transportowanego materiału.

Przykład przebiegu jednostkowego zużycia energii w zależności od koncentracji objętościowej mieszaniny i średnicy rurociągu przedstawiono na rys. 2 [1]. Dane

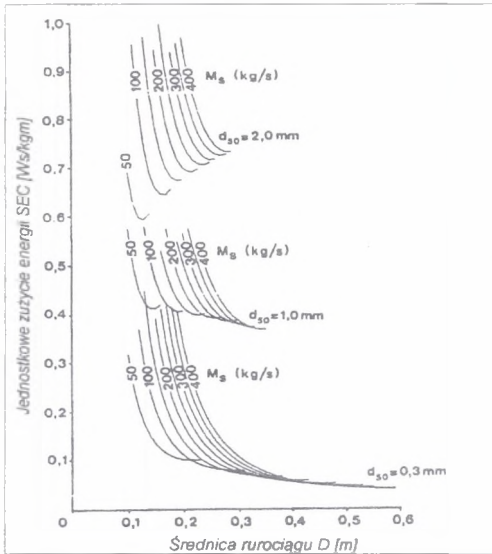
na wykresie odnoszą się do przepływu mieszaniny o średnicy ziaren  $d_{50} = 0,0006$  m ze stałą masową wydajnością transportu  $M_s = 200$  kg/s. Najniższą wartość SEC uzyskano dla przepływu w rurociągu o największej średnicy przy koncentracji miesza-

ny  $C_v = 0,23$ . Należy zwrócić uwagę, że dla spełnienia kryterium stałej wydajności transportu przepływ odbywa się ze zmiącą prędkością, w zależności od koncentracji mieszaniny i średnicy rurociągu. Dotychczasowe wyniki badań wykazują, że z punktu widzenia minimalizacji energochłonności hydrotransportu pompowego korzystnie jest transportować materiał w rurociągu o możliwie dużej średnicy z minimalną dopuszczalną prędkością przepływu.



Rys.2. Jednostkowe zużycie energii w zależności od koncentracji mieszaniny i średnicy rurociągu przy stałej wydajności transportu według Łazarusa [1]

Fig.2. Specific energy consumption in relation to concentration of a slurry and pipe diameter for a constant flow rate, by Lazarus [1].



Rys.3. Jednostkowe zużycie energii w zależności od uziarnienia mieszaniny, średnicy rurociągu i wydajności transportu według Lazarusa [1]

Fig.3. Specific energy consumption in relation to size of grains, pipe diameter and flow rate, by Lazarus [1]

Dla mieszanin sedymentujących prędkość ta powinna być nieznacznie większa od prędkości, przy której następuje osadzanie ziaren materiału w rurociągu [2]. W przypadku zaś mieszanin, które nawet przy niewielkich prędkościach przepływu zachowują pozorną jednorodność, optymalną prędkością przepływu jest minimalna prędkość, przy której przepływ odbywa się jeszcze w sposób turbulentny. Dla obydwu rodzajów mieszanin istotna jest bardzo dokładna znajomość prędkości opadania ziaren w mieszaninach heterogenicznych oraz reologii mieszanin w laminarnej strefie ruchu i w strefie przejściowej [5].

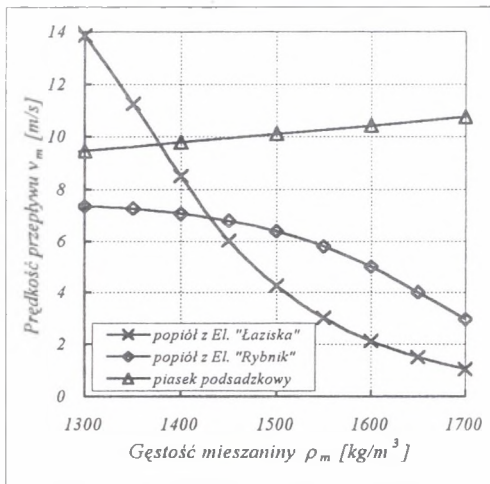
Na rys. 3 przedstawiono przykładowy przebieg wpływu uziarnienia transportowanego materiału na jednostkowe zużycie energii. Jak wynika z przedstawionych danych zużycie energii istotnie wzrasta wraz z uziarnieniem transportowanego materiału, co wynika z konieczności utrzymania prędkości przepływu powyżej prędkości opadania ziaren.

Na uwagę zasługuje także zmienność koncentracji objętościowej, przy której uzyskiwane jest minimum jednostkowego zużycia energii i jej zależność od średnicy rurociągu (rys.2), co zostało wykorzystane przy konstruowaniu wykresu na rys.3, którego punkty odpowiadają optymalnym wartościom koncentracji mieszaniny.

## 1. Optymalizacja prędkości przepływu i gęstości mieszaniny w hydrotransportie grawitacyjnym

W przeciwieństwie do hydrotransportu pompowego w rurociągu grawitacyjnym ilość dostępnej energii do pokonania oporów przepływu jest z góry znana (zależy od gęstości mieszaniny i różnicy wysokości między wlotem i wylotem instalacji). Celem analizy jest więc okre-

ślenie, z jaką prędkością mieszanina o znanych parametrach będzie płynęła w rurociągu i czy prędkość ta zapewni bezpieczne (z punktu widzenia ryzyka zatkania rurociągu) warunki przepływu oraz uzyskanie odpowiedniej wydajności transportu. Wpływ zmiany koncentracji mieszaniny na parametry jej przepływu w rurociągu grawitacyjnym jest dość złożony, gdyż wzrostowi gęstości mieszaniny towarzyszy wzrost oporów przepływu ograniczający prędkość przepływu, jednocześnie zaś rośnie także wielkość ciśnienia rozporządzalnego w instalacji ułatwiającego pokonanie wzmożonych oporów przepływu.



Rys.4. Zależność prędkości przepływu od gęstości mieszaniny i rodzaju materiału dla opisanej w tekście instalacji grawitacyjnej

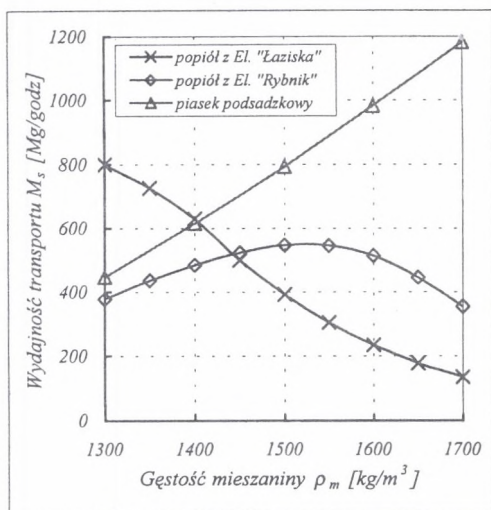
Fig.4. Velocity of flow in dependence to density of a slurry and kind of material for a pipeline described in the text

zależności uzyskane na podstawie badań na instalacjach badawczych [4]. Obliczenia wykonano w zakresie gęstości mieszanin od 1300 do 1700 kg/m<sup>3</sup>. Przebieg zmian prędkości przepływu w zależności od gęstości mieszaniny i rodzaju transportowanego materiału dla opisanej instalacji przedstawiono na wykresie na rys. 4. Jak wynika z przebiegu krzywych na rys.4, zależności prędkości przepływu uzyskiwanej w instalacji grawitacyjnej od koncentracji mieszaniny mogą być bardzo zróżnicowane. Interesujące wyniki uzyskamy wyznaczając dla tych samych danych (jak na rys.4.) wartości masowego natężenia przepływu części stałych (wydajności transportu), co zostało przedstawione na kolejnym wykresie - rys.5. Analizując przebieg krzywych dla piasku podsadzkowego stwierdzić można, że w zakresie gęstości od 1300 do 1700 kg/m<sup>3</sup> prędkość przepływu nieznacznie zwiększa się, w zakresie od 9,5 do 10,7 m/s,

Dla zilustrowania występujących zależności wyznaczono parametry przepływu mieszanin trzech rodzajów materiałów w instalacji grawitacyjnej o długości  $L = 1000$  m, różnicy wysokości  $H = 300$  m i średnicy  $D = 0,185$  m. Transportowanymi materiałami są piasek podsadzkowy, popiół lotny z El. „Łaziska” z procesu półsuchego odsiarczania spalin i popiół lotny z El. „Rybnik” bez odsiarczania spalin. Do obliczeń przepływu mieszaniny piaskowo-wodnej wykorzystano metodę obliczania parametrów podsadzki hydraulicznej [3], zaś do obliczeń parametrów przepływu mieszanin popiołowo-wodnych wykorzystano



zapewniając w miarę wzrostu gęstości coraz lepsze parametry wydajnościowe. Korzystne parametry geometryczne instalacji nie pozwalają na uwidocznienie wpływu kryteriów ograniczających zakres gęstości mieszaniny wodno-piaskowej. W rozpatrywanym przykładzie instalacji, w zakresie gęstości od 1300 do 1700 kg/m<sup>3</sup>, gęstość mieszaniny nie jest limitowana z dołu – warunkiem utrzymania prędkości przepływu większej od granicznej ani z góry – warunkiem zachowania prędkości przepływu nie przekraczającej wartości krytycznej z punktu widzenia ścieralności rurociągu podsadzkowego.



Rys.5. Zależność wydajności transportu od gęstości mieszaniny i rodzaju materiału dla opisanej w tekście instalacji grawitacyjnej

Fig.5. Efficiency of flow in dependence to density of a slurry and kind of material for a pipeline described in the text

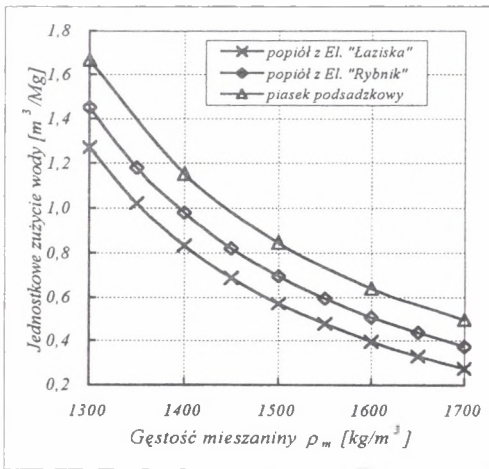
mieszaniny przy zmianie koncentracji, co powoduje, że z punktu widzenia wydajności transportu mieszanina z jego udziałem charakteryzuje się istnieniem pewnej wartości optymalnej, rys.5., tj. zapewniającej maksymalną wydajność transportu.

W przypadku mieszaniny popiołowo-wodnej z udziałem popiołów lotnych z El. „Łaziska” obserwuje się gwałtowne zmniejszanie się prędkości przepływu wraz ze wzrostem gęstości mieszaniny. Świadczy to o bardzo silnym wpływie koncentracji na własności reologiczne mieszaniny. Pod względem wydajnościowym należy stwierdzić, że ten rodzaj popiołu lotnego powinien być transportowany w mieszaninie o możliwie niewielkiej koncentracji.

Nieco odmienną charakterystykę wpływu gęstości mieszaniny na prędkość przepływu wykazuje popiół lotny z El. „Rybnik” - rys.4. Popiół ten zapewnia bardziej stabilne własności reologiczne

## 5. Optymalizacja składu mieszaniny w hydrotransportie kopalnianym

W podsadzce hydraulicznej po przetransportowaniu mieszaniny materiał zostaje oddzielony od wody, która jest następnie w miarę konieczności klarowana i następnie przepompowywana do powtórnego użycia. Realizacja tego wymaga odpowiednich urządzeń (osadniki, pompy) i nakładów (koszty energii, oczyszczanie i utylizacja szlamów osadnikowych). Stąd też ilość wody biorącej udział w hydrotransportie może stanowić istotne kryterium optymalizacji procesu hydrotransportu.



Rys.6. Zależność jednostkowego zużycia wody od gęstości mieszaniny i rodzaju materiału dla opisanej w tekście instalacji grawitacyjnej

Fig.6. Specific water consumption in relation to density of a slurry and kind of material for a pipeline described in the text

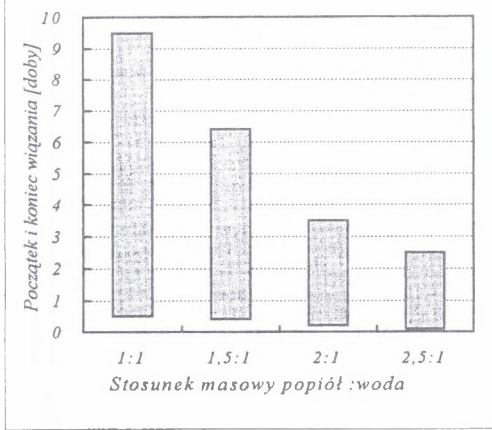
do przetransportowania jednostki masy części stałych jest funkcją koncentracji objętościowej mieszaniny i gęstości właściwej transportowanego materiału. Wykres zmienności jednostkowego zużycia wody dla wyżej rozpatrywanych mieszanin przedstawiono na rys. 6. Jak można zaobserwować, na przedstawionym wykresie zwiększając gęstość mieszaniny z 1300 do 1700 kg/m<sup>3</sup> wielkość jednostkowego zużycia wody zmniejsza się około 3,8 razy. Relacja ta jest niezależna od tego, czy instalacja jest zasilana pompami, czy grawitacyjnie. W przypadku instalacji pompowych należy jednakże sprawdzić, czy zyski z tytułu zmniejszenia udziału

W przypadku technologii górniczego wykorzystania odpadów o bardzo drobnym uziarnieniu, zwłaszcza popiołów lotnych, mieszanina po wprowadzeniu do miejsc lokowania nie jest odwadniana. Woda powinna ulec związaniu przez popioły lotne lub dodane środki wiążące, a jej ewentualny nadmiar wchłaniają skały otaczające. Ponadto mieszaniny popiołowo-wodne wprowadzone do wyrobisk górniczych powinny po upływie określonego czasu charakteryzować się określonym stopniem zwięzłości i wykazywać własności podpornościowe.

Zakładając, że hydrotransport odbywa się bez poślizgu faz, ilość wody potrzebna

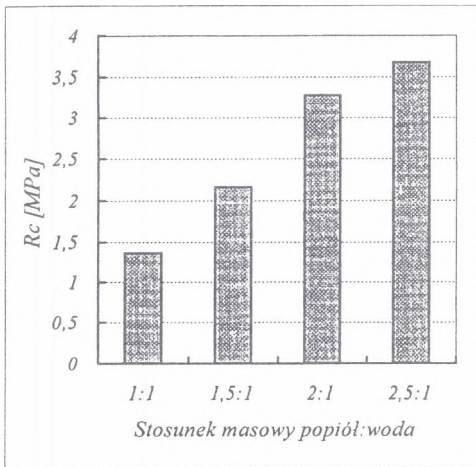


wody w mieszaninie nie będą mniejsze od dodatkowych kosztów wynikających z tłoczenia mieszaniny o większej gęstości.



Rys.7. Wpływ udziału wody w mieszaninie na czas procesu wiązania (mieszanka i warunki sezonowania opisane w tekście)

Fig.7. The influence of water contents on the binding process (mixture and condition of seasoning as described in the text)



Rys.8 Wpływ udziału wody w mieszaninie na wytrzymałość na ściskanie po 28 dobach (mieszanka i warunki sezonowania opisane w tekście)

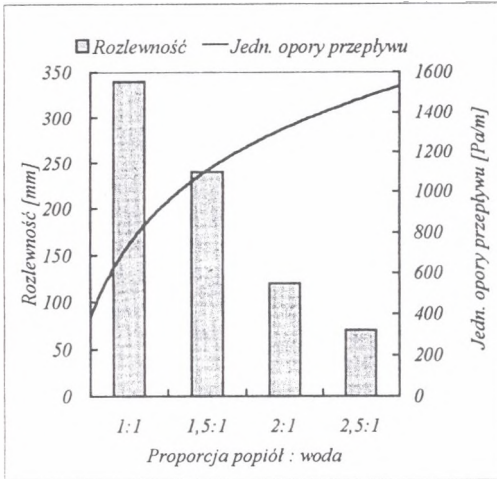
Fig.8. The influence of water in slurry on compressive strength after 28 days (slurry and conditions of seasoning as described in the text)

pociąga za sobą wzrost gęstości i lepkości, a w konsekwencji także oporów przepływu, co ilustruje wykres na rys. 9. Na wykresie tym zestawiono wartości jednostkowych strat energetycznych uzyskanych przy przepływie mieszanin o wybranych proporcjach w rurociągu

Z punktu widzenia wyżej wspomnianego wykorzystywania mieszanin o własnościach wiążących w górnictwie podziemnym istotny jest wpływ koncentracji mieszaniny na parametry procesu wiązania mieszaniny w wypełnionej przestrzeni i końcowe własności wytrzymałościowe [6]. Na wykresie na rys.7. przedstawiono czasy początku i zakończenia procesu wiązania mieszanin popiołowodnych sporządzonych z popiołu lotnego po suchym odsiarczeniu spalin z Elektrowni „Rybnik” w zależności od wielkości stosunku masowego popiołu do wody.

Kolejny wykres, rys.8., przedstawia wartości wytrzymałości na ściskanie materiału uzyskanego poprzez zestalanie wyżej opisanych mieszanin przez okres 28 dni. Próbkę mieszanin przechowywano w warunkach temperatury i wilgotności zbliżonych do panujących w warunkach dołowych. Przedstawione zależności wykazują, że dla uzyskania lepszych własności mechanicznych materiału wypełniającego pustki poeksploatacyjne bądź likwidowane wyrobisko należy stosować mieszaniny o znacznie większej koncentracji. Zwiększenie koncentracji mieszaniny

o średnicy 0,185 m z prędkością 3,5 m/s z wartościami rozlewności mierzonymi z użyciem kubka Forda.



Rys.9. Przykład relacji między rozlewnością a jednostkowymi oporami przepływu i koncentracją mieszanin (szczegóły w tekście)

Fig.9. Relation between spill radius and head loss and concentration of a slurry (see text for details)

O ile w instalacjach hydrotransportu pompowego istnieje możliwość doboru odpowiednich pomp do wymaganej wydajności przepływu mieszaniny (co jednak może okazać się wysoce nieopłacalne z uwagi na koszty urządzeń i energii), o tyle w instalacji grawitacyjnej prędkość przepływu jest wynikiem osiągnięcia stanu równowagi między ciśnieniem rozporządzalnym a całkowitymi stratami energetycznymi przepływu. Zmiana gęstości mieszaniny powoduje osiągnięcie innego stanu równowagi charakteryzującego się odpowiednią prędkością przepływu i wydajnością transportu.

W konsekwencji może okazać się, że nie jest możliwe transportowanie w określonej instalacji mieszaniny o zadanej koncentracji z zakładaną wydajnością. Problem optymalizacji parametrów hydrotransportu sprowadza się wtedy do poszukiwania rozwiązania kompromisowego, w którym konieczne jest zaakceptowanie ograniczenia części wymagań przy zachowaniu innych. Sposób postępowania będzie zależał od szczegółów analizowanego przypadku. Przykładowo, przy doszczelnianiu starych zrobów wykonywanym jako sposób utylizacji odpadów, priorytetem może być uzyskanie maksymalnej wydajności transportu części stałych. Z kolei przy wykonywaniu podsadzki samozestalającej pod obiektem wymagającym szczególnej ochrony najważniejsze będzie utrzymanie optymalnych parametrów wytrzymałościowych kosztem np. wydłużenia czasu trwania wypełniania zrobów.

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

W podsumowaniu przedstawionych rozważań wskazać można następujące wnioski końcowe:

1. Prawidłowy dobór parametrów pracy instalacji hydrotransportu wymaga przeprowadzenia każdorazowo szczegółowych analiz własności przepływowych rozpatrywanych mieszanin. Przedmiotem dokładnych badań powinny być w szczególności jednostkowe opory przepływu mieszaniny w rurociągu o danej średnicy w zależności od prędkości przepływu, koncentracji objętościowej i proporcji składników stałych mieszaniny.
2. W instalacjach hydrotransportu zasilanych pompami poszukiwanie optymalnych warunków pracy sprowadzić można do znalezienia parametrów przepływu, przy których uzyskuje się najmniejszą wartość jednostkowego zużycia energii.
3. W instalacjach grawitacyjnych celem obliczeń optymalizacyjnych jest znalezienie parametrów przepływu, przy których uzyskuje się maksymalną wydajność transportu lub maksymalnej koncentracji, przy której możliwy jest bezpieczny przepływ.
4. W technologiach górnictwa podziemnego transportowana mieszanina powinna spełniać określone wymagania dotyczące własności fizycznych uzyskiwanych przez nią po wprowadzeniu do wypełnianego wyrobiska. Jak wykazano na przykładzie wybranych mieszanin popiołowo-wodnych, dla uzyskania materiału wypełniającego o wysokich własnościach wytrzymałościowych mieszanina musi charakteryzować się znaczną koncentracją części stałych, co powoduje istotne pogorszenie własności przepływowych i wzrost jednostkowych oporów przepływu.

## LITERATURA

1. Lazarus J.H.: Optimum Specific Power Consumption for Transporting Settling Slurries in Pipelines, 8<sup>th</sup> International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Johannesburg, South Africa, Aug. 25-27.09, 1982.
2. Matoušek V.: Sheet Flow in Slurry Pipelines, 9<sup>th</sup> International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Kraków, 2-5.09, 1997.

3. Palarski J.: Design and use of Backfill for Support in Polish Coal Mines, Sixth Int. Symposium on Mining with Backfill 7, Brisbane, Australia, 14 – 16.04, 1998.
4. Plewa F., Sobota J., Strozik G.: Influence of Coarse Particles on Rheology of Fly Ash Slurry, International Conference on Problems in Fluid Mechanics and Rheology, Prague, Czech Rep., June 23-26, 1999.
5. Slatter P.T.: The Laminar/Turbulent Transition Prediction for Non-Newtonian Slurries, International Conference on Problems in Fluid Mechanics and Rheology, Prague, Czech Rep., June 23-26, 1999.
6. Strozik G.: Optymalizacja parametrów przepływu i składu mieszanin do likwidacji wyrobisk górniczych, dysertacja doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Sobota, prof. AR we Wrocławiu

## Abstract

Flow of slurries of a fluid and solid grains in a pipeline is described by a relation of head loss and mean velocity in certain conditions (density of mixture, concentration, grain size distribution, pipe diameter etc. The general task by design of a hydrotransportation system is to determine the specific energy consumption and then, to check whether available energy is enough to sustain the operation at required conditions. The behaviour of energetic losses of flowing mixture is very complex (see Fig.1), so a theoretical approach to the problem will give very rough or even wrong estimations and each case must be analyzed with application of laboratory measurements. In case of pump systems, by calculation of specific energy consumption (Eq. 1) an optimisation of mixture and pipe diamteres could be made from the point of energy use (see Fig. 2 and 3). Underground mines are mostly equipped with gravitational backfill pipeline systems that can be controlled only by modifications of mixture compositions (Fig. 4 and 5). From the other hand changes in mixture composition influence the physics of material deposited in mine voids in long time periods (Fig. 6 ÷ 9). An optimal and safe operation of hydrotransportation systems is possible when flow properties of mixture are good known and properly modeled as well the long term behavior of fill is precisely determined.