

Jan Pawelek

WYBRANE ZAGADNIENIA HYDROTRANSPORTU ZIARNISTEGO WĘGLA AKTYWNEGO

W technologii uzdatniania i odnowy wody stosowany jest węgiel aktywny w postaci pylistej lub granulowanej. Stosowanie węgla w formie pylistej jest mało efektywne i drogie, natomiast zadowalające efekty uzyskuje się stosując filtrację przez kolumny wypełnione ziarnistym węglem aktywnym [1]. Przy stosowaniu filtrów węglowych zachodzi potrzeba okresowego wypełniania i opróżniania komór filtracyjnych. W procesie tym korzystne jest zastosowanie hydrotransportu, który ma wiele zalet w porównaniu do tradycyjnych form transportu [2]. Stosowanie hydrotransportu jest tym bardziej korzystne im w większym zakładzie jest on stosowany. W projektowanym zakładzie wodociągowym „Dzieńkowice” o wydajności około $10 \text{ m}^3/\text{s}$ przewiduje się, iż rocznie będzie trzeba wymienić w komorach filtracyjnych od 3700 do 5500 m^3 węgla. Należy więc przetransportować od 7400 do 11000 m^3 węgla w ciągu roku [3].

Zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie instalacji do hydrotransportu, spełniającej warunków dużej niezawodności działania, zmusza do rozwiązania wielu problemów, do których należą np. parametry przepływu hydromieszaniny w rurociągu. Obecny stan wiedzy teoretycznej i uzyskiwane wyniki pracujących instalacji przemysłowych nie dają jeszcze pod-

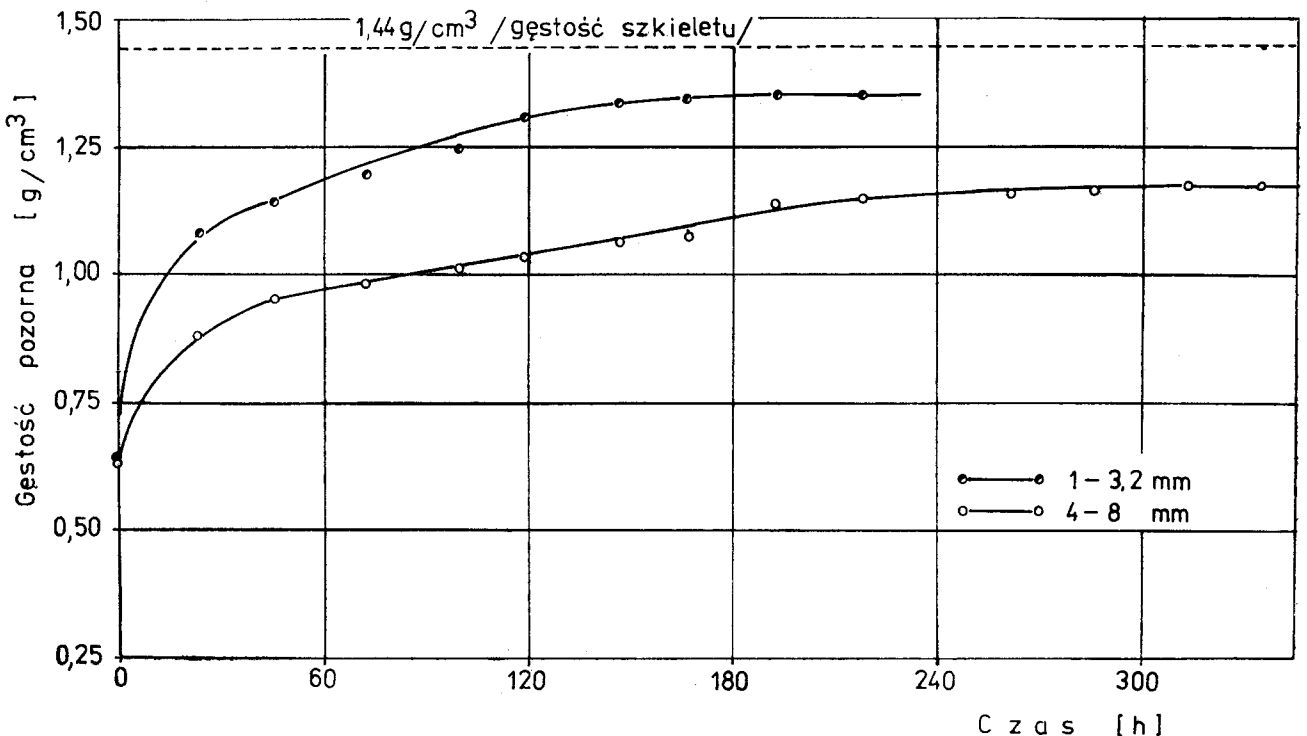
staw do projektowania pozbawionego ryzyka [4, 5].

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z hydrotransportem węgla aktywnego, obejmujące straty energetyczne przepływu oraz średnią prędkość hydromieszaniny, poniżej której następuje wypadanie ziarn i tworzenie osadu na dnie rurociągu.

Metodyka badań

Badano hydrotransport węgla aktywnego Carbolpol Z-4 o uziarnieniu 1—3,2 mm i 4—8 mm, produkowanego przez Zakłady Elektrod Węglowych w Raciborzu. Przed przystąpieniem do badań pomierzono następujące właściwości fizyczne węgla, mające wpływ na przebieg hydrotransportu:

- Skład granulometryczny węgla; wartość ważonej średnicy ziarn obliczonej na podstawie analizy sitowej wynosiła 1,52 mm i 0,26 mm, odpowiednio dla węgla 1—3,2 mm i 4—8 mm.
- Wilgotność węgla suchego atmosferycznie, która wynosiła dla węgla 1—3,2 mm 10,16%, a dla węgla 4—8 mm — 9,99%.
- Gęstość nasypowa, która dla węgla 1—3,2 mm wynosiła $0,283 \text{ g/cm}^3$, a dla węgla 4—8 mm — $0,263 \text{ g/cm}^3$.
- Gęstość szkieletu równą $1,443 \text{ g/cm}^3$.



— Gęstość pozorna w zależności od czasu moczenia w wodzie, rozumiana jako stosunek masy ziarna do sumy ich objętości i porów nie wypełnionych wodą (rys. 1).

Ziarnisty węgiel aktywny Carbolpol Z-4 charakteryzuje się dużą chłonnością wody, która występuje przez kilkanaście dni od momentu kontaktu węgla z wodą. Badania hydrotransportu prowadzono na węglu, który był mocno-ny conajmniej przez 14 dni. Szczegółowy sposób oznaczenia wyżej wymienionych właściwości węgla przedstawiono w pracy [2]. Badania prowadzono w trzech układach pomiarowych wykonanych z rur stalowych ocynkowanych. Układy te wykonano z rur o średnicach wewnętrznych ϕ 21,2 mm, ϕ 35,2 mm i ϕ 52,5 mm. Na każdym z obiegów wyznaczono odcinki pomiarowe o długości 100-krotnej średnicy wewnętrznej rury. Dokładny opis modelu i urządzeń pomiarowych wchodzących w jego skład przedstawiono w pracy [2]. Przeprowadzono badania porównawcze liniowych strat energii w przepływie hydromieszanin i strat w przepływie czystej wody. Szlifowanie prowadzono dotąd, dopóki nie stwierdzono, iż kolejny pomiar dla wody nie wykazuje już większych zmian. Moment ten uznano za właściwy dla rozpoczęcia pomiarów hydrotransportu. W tym celu przygotowano mieszaninę węgla i wody o założonej koncentracji składnika stałego. Dla każdego cyklu pomiarowego przygotowano nową hydromieszaninę. Jeden cykl obejmował badania dla jednej średnicy rury i jednej koncentracji węgla. Badania prowadzono w przedziale prędkości maksymalnych, możliwych do osiągnięcia na modelu badawczym (2,74–3,36 m/s) i minimalnych (0,36–1,24 m/s), odpowiadających prędkościom granicznym lub zjawisku zatykania się przewodów poprzez tworzenie się korków na zaworze regulacyjnym lub załamaniach przewodu. Górne zakresy koncentracji składnika stałego uzależnione były od średnicy rurociągu i gatunku węgla. Próby pompowania hydromieszanin o wyższych koncentracjach nie dawały możliwości prowadzenia pomiarów, gdyż po uruchomieniu pompy następowało zatykanie rurociągu.

Straty energetyczne

Wyniki badań laboratoryjnych dotyczące strat energetycznych opracowano w formie zależności jednostkowych strat energii od średniej prędkości $I=f(V)$ i aproksymowano parabolą o równaniu ogólnym:

$$I = b \cdot V^n \quad (1)$$

Wyrównanie przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów na EMC dla 30 cykli pomiarowych o łącznej ilości 983 pomiarów. 21 cykli dotyczyło hydromieszaniny (684 pomiary) i 9 cykli dla samej wody (299 pomiarów). Obliczony współczynnik korelacji między stratami energii I_m a średnią prędkością hydromieszaniny V_m , dla wszystkich serii pomiarowych przyjął 14 razy wartości większe od 0,99, 6 razy w przedziale 0,98–0,99 oraz jeden raz w przedziale 0,97–0,91. Jest on we wszystkich

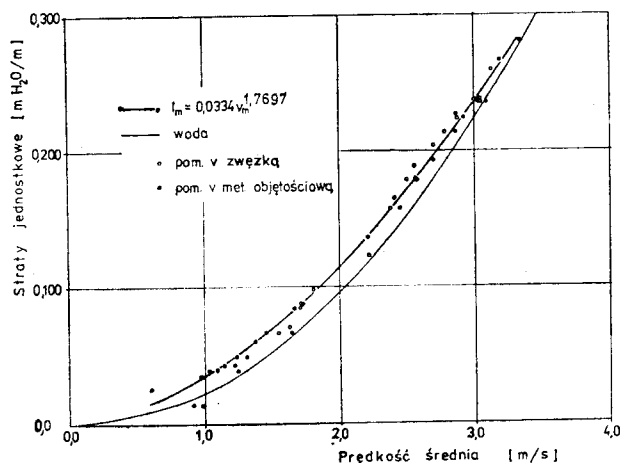
przypadkach statystycznie istotny dla poziomu istotności $\alpha=0,01$ i liczbie stopni swobody zależnej od ilości obserwacji dla poszczególnych serii pomiarowych. Obliczone w wyniku wyrównania współczynniki (b) i (n) zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1
WSPÓLCZYNNIKI KIERUNKOWE DO RÓWNIANIA $I=b \cdot V^n$

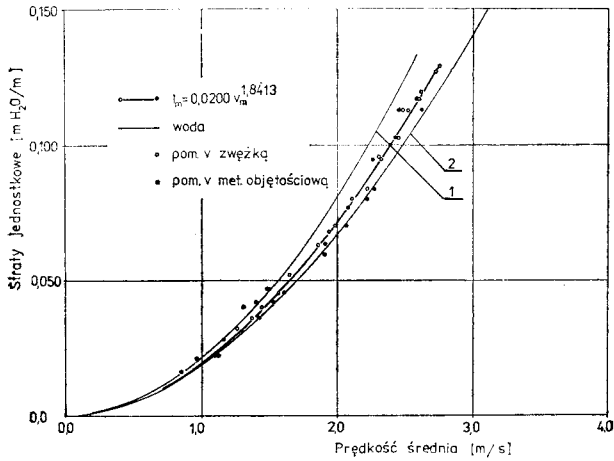
Granulacja węgla (mm)	Koncepcja objętościowa C_v (%)	Współczynniki kierunkowe					
		Rurociąg 21 mm		Rurociąg 35 mm		Rurociąg 52 mm	
		b	n	b	n	b	n
—	0,0	0,1376	2,0072	0,0682	1,8384	0,0200	1,9754
—	0,0	0,0569	1,8096	0,0226	2,0706	0,0178	1,9183
1 — 3,2	6,2	0,0561	1,8535	0,0260	1,9848	0,0180	1,9062
1 — 3,2	12,4	0,0641	1,7727	0,0296	1,8871	0,0198	1,8151
1 — 3,2	18,6	0,0584	1,8509	0,0274	1,9304	—	—
1 — 3,2	24,8	0,0697	1,6311	0,0294	1,8760	0,0201	1,7827
1 — 3,2	30,9	0,0896	1,4266	0,0301	1,8491	—	—
1 — 3,2	37,1	—	—	0,0334	1,7697	0,0200	1,8413
—	0,0	0,0594	1,7842	0,0249	1,9968	0,0190	1,8148
4 — 8	6,1	—	—	0,0267	1,613	0,0206	1,7466
4 — 8	12,1	—	—	0,0289	1,9073	0,0183	1,8762
4 — 8	24,3	—	—	—	—	0,0204	1,7982
4 — 8	36,4	—	—	—	—	0,0218	1,7521

Z analizy tego zestawienia wynika, że współczynnik (b) wykazuje tendencję wzrostową w miarę wzrostu koncentracji węgla w hydromieszanie, natomiast wykładnik (n) maleje wraz ze wzrostem koncentracji. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przykładowy przebieg funkcji $I=f(V)$ dla rurociągów o średnicach 35 i 52 mm, mający miejsce przy przepływie hydromieszaniny węgla o uziarnieniu 1—3,2 mm.

Rysunki te przedstawiają również przebieg podobnych zależności dla wody. Przedstawiona na rysunku 3 w pozycji (1) funkcja $I_w=f(V_w)$ obrazuje straty energii w przepływie wody dla rurociągu nowego, natomiast w pozycji (2) dla rurociągu, którego ściany wewnętrzne zostały wyszlifowane hydromieszaniną. Proces szlifowania po pewnym czasie eksploatacji prawie całkowicie ustaje i dla określonych warunków przepływu straty energii ustalają się. Bazując na otrzymanych wyni-



Rys. 2 Zależność $I_m=f(V_m)$ dla przepływu hydromieszaniny węgla aktywnego 1—3,2 mm przy koncentracji $C_v=0,371$ w poziomym rurociągu o średnicy ϕ 35 mm



Rys. 3 Zależność $I_m=f(V_m)$ dla przepływu hydromieszanki węgla aktywnego 1—3,2 mm przy koncentracji $C_V=0,371$ w poziomym rurociągu o średnicy Φ 52 mm

kach badań opracowano empiryczną formułę na straty energii w ogólnej postaci:

$$I_m = I_w + \Delta I \quad (2)$$

Przeprowadzone rozważania wykazały, że wielkość straty uzupełniającej ΔI zależy w największym stopniu od prędkości hydromieszanki V_m , koncentracji węgla C_V , średnicy rurociągu D i granulacji węgla d_s . Otrzymane wyniki aproksymowano następującą zależnością:

$$I_m = \frac{A V_m^{n1}}{2g D^{n2}} + B V_m^{n3} \left(\frac{d_s C_V}{D} \right)^{n4} \quad (3)$$

gdzie

- A, B — współczynniki liczbowe
- g — przyspieszenie ziemskie
- $n1, n2, n3, n4$ — wykładniki potęgowe.

Obliczenia przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów. W pierwszej kolejności wykonano obliczenia dla pierwszego składnika sumy, bazując na wynikach badań dla wody:

$$I_w = \frac{A V_w^{n1}}{2g D^{n2}} \quad (4)$$

Współczynniki drugiego składnika obliczono uwzględniając wykonane wcześniej obliczenia dla wody. W wyniku dokonanych obliczeń otrzymano następujące wartości współczynników: $A=0,00981$, $B=0,00838$, $n1=1,888$, $n2=1,204$, $n3=1,144$, $n4=0,197$. Ostateczna postać wzoru na spadek dopełniający ΔI przedstawia się następująco:

$$I = 0,00838 V_m^{1,144} \left(\frac{d_s \cdot C_V}{D} \right)^{0,197} \quad (5)$$

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że spadek dopełniający ΔI przyjmuje wartości maksymalne do około 20% wartości strat w przepływie wody. Celem oceny dopasowania otrzymanej formuły zastosowano charakterystykę uwzględniającą współczynniki korelacji między jednostkowymi wartościami strat energii pomierzonymi i obliczonymi według modelu. Obliczony współczynnik korelacji wskazuje, iż model ten można uznać dla 14 serii pomiarowych jako znakomity ($r>0,99$) i dla 7 serii jako bardzo dobry ($r=0,95, -0,99$). Uznano

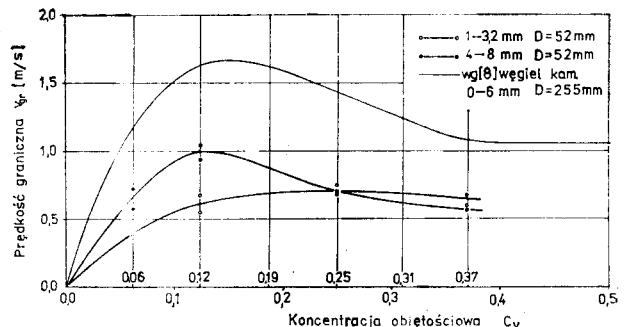
więc, że dopasowanie funkcji dla poszczególnych przypadków jest zadowalające. Najmniejszą dokładność stwierdzono dla rurociągu 21 mm i koncentracji węgla 30,9%, w zakresie mniejszych prędkości przepływu.

Prędkości graniczne

Prędkości graniczne definiowane są jako prędkości, przy których powstaje stały osad w dolnej części rurociągu transportującego. Przy tych prędkościach występują minimalne straty energii. W przypadku ruchu z osadem stałym na dnie rurociągu dochodzą dodatkowo czynniki wpływające na opory przepływu, a zatem i na straty energii. Są to: grubość osadu i charakter jego powierzchni [5, 6]. Ruch tego typu jest mniej interesujący z punktu widzenia hydrotransportu, gdyż może prowadzić do zakorkowania rurociągu. Zagadnienie prędkości granicznych i wpływu na nie parametrów hydromieszanki i rurociągu był przedmiotem wielu prac [4, 5, 7—13].

Jednym z warunków zapewniających niezawodność działania instalacji hydrotransportu jest, aby przepływ odbywał się w reżimie ponad granicznym, tzn. aby występował margines między prędkością graniczną, a prędkością roboczą hydromieszanki. W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych określono prędkości graniczne dla węgla transportowanych rurociągami Φ 52 mm. Dla rurociągu Φ 21 mm i Φ 35 mm prędkości tych nie ustalono, gdyż w miarę zmniejszania prędkości przepływu hydromieszanki, wcześniej następowało zatykanie przewodów w punktach o większych stratach miejscowych. Otrzymane wyniki dla rurociągu Φ 52 mm przedstawiono w postaci zależności prędkości granicznej od koncentracji węgla w hydromieszance $V_{gr} = f(C_V)$ (rys. 4). Dla porównania, na rysunku tym naniesiono wyniki badań uzyskane dla hydromieszanki węgla kamiennego o uziarnieniu 0—6 mm, przepływającej w rurociągu Φ 255 mm [8].

Graniczna prędkość przepływu jest funkcją wielu parametrów. Oprócz koncentracji składnika stałego, zależy ona między innymi od średnicy rurociągu, wielkości ziarn, zawartości cząstek drobnodispersyjnych oraz gęstości składnika stałego [4, 7, 14]. Prędkość ta rośnie wraz ze wzrostem średnicy rurociągu. Rośnie ona również dla danego rurociągu w miarę



Rys. 4 Zależność $V_{gr}=f(C_V)$ dla przepływu hydromieszanki węgla aktywnego w rurociągu o średnicy Φ 52 mm

wzrostu koncentracji, stabilizując się po przekroczeniu pewnej wartości. Wzrost prędkości granicznej w miarę wzrostu koncentracji węgla spowodowany jest nasyceniem przydennnej części strumienia [15, 16]. W strefie wyższych koncentracji, np. piasku >15%, prędkość graniczna przyjmuje wartość niezależną od koncentracji, a największe nasycenie składnikiem stałym wody ma miejsce w wyższych warstwach strumienia [15].

Otrzymane wyniki badań wskazują, że stabilizacja prędkości granicznej dla badanych węgli aktywnych następuje przy koncentracjach większych od 25%. Prędkość ta ma wartość 0,6—0,7 m/s. Przy koncentracjach mniejszych od 25% prędkości graniczne badanych węgli różnią się od siebie. Krzywa dla węgla 4—8 mm położona jest znacznie wyżej od krzywej dla węgla 1—3,2 mm.

Otrzymane funkcje mogą być podstawą do ustalenia zalecanych koncentracji węgla w hydromieszaniu. Koncentracje te winny być w strefie ustabilizowanych prędkości granicznych i przy minimalnym zużyciu energii potrzebnej do przetransportowania jednostki masy materiału stałego. Wykazano, że optymalną prędkością mieszania, niezależnie od średnicy rurociągu, jest prędkość większa od granicznej o 26% ($V_m = 1,26V_{gr}$), a spadkiem optymalnym jest spadek większy o 19% od spadku granicznego ($I_m = 1,10 I_{gr}$), [10]. W zależności od rodzaju hydromieszania, zaleca się następujące prędkości robocze [4]:

— hydromieszania grubodispersyjne:

$$V_m = (1,10—1,15) V_{gr}$$

— hydromieszania drobnodispersyjne:

$$V_m = (1,05—1,11) V_{gr}$$

— hydromieszania polidispersyjne:

$$V_m = (1,15—1,20) V_{gr}$$

— niejednorodne systemy dyspersyjne:

$$V_m = (1,20—1,25) V_{gr}$$

Otrzymane wyniki badań własnych, przy uwzględnieniu doniesień literaturowych pozwalają na stwierdzenie, że właściwą koncentracją dla rurociągu ϕ 52 mm jest koncentracja $C_v = 0,25$ (około 100 g węgla suchego atmosferycznie w 1 dm³ hydromieszania), a prędkością optymalną jest prędkość równa 0,9 m/s. Stwierdzenie to dotyczy węgla Carbol Z-4. W przypadku np. węgla Calgon [17] o uziarnieniu 0,4—1,7 mm, zalecana prędkość transportowa hydromieszania wynosi 1,0—1,5 m/s, natomiast minimalna prędkość — 0,75 m/s. Zalecenia te dotyczą rurociągów ϕ 25 i 50 mm.

Wnioski

1. Jednostkowe straty energii dla potrzeb praktyki inżynierskiej można obliczać ze wzoru, w którym straty dla hydromieszania są równe

sumie strat wody i strat uzupełniających. Straty uzupełniające ΔI należy obliczać według wzoru (5). Gwarancją otrzymania właściwych wyników jest stosowanie wzoru w przedziale prędkości od 0,8 m/s do 3,0—3,5 m/s.

2. Analiza wyników badań prędkości granicznych przeprowadzona dla rurociągu ϕ 52 mm wskazuje, że właściwą koncentracją dla tego rurociągu jest koncentracja objętościowa 0,25 (około 100 g/dm³), a prędkość optymalna wynosi 0,9 m/s.

LITERATURA

1. Z. ŁEPKOWSKI: Filtry węglowe w technologii uzdatniania wody. Mat. III Symp. „Węgiel aktywny — Problemy badawcze i wdrożeniowe w gospodarce wodnej”. Pol. Krak., Kraków 1987.
2. J. PAWEŁEK: Straty energii w poziomych rurociągach tłocznych przy hydrotransportie ziarnistego węgla aktywnego stosowanego w oczyszczaniu wody i ścieków. Praca doktorska. AR Kraków 1984.
3. R. GOLENIOWSKI: Zastosowanie filtrów z węglem aktywnym w stacji uzdatniania wody w Dzieńkowicach. Mat. III Symp. „Węgiel aktywny — Problemy badawcze i wdrożeniowe w gospodarce wodnej”. Pol. Krak., Kraków 1987.
4. J. PALARSKI: Podstawy teoretyczne i uwagi praktyczne zastosowania hydrotransportu w górnictwie. Projekty — Problemy, Budownictwo Węglowe, 1978, 2.
5. J. PALARSKI: Hydrotransport. WNT, Warszawa 1982.
6. H. GŁADKI: Formy kształtowania się dna piaszczystego i ich wpływ na wielkość oporów przepływów. Zeszyty Naukowe WSR, Kraków 1970, 152.
7. W. PARZONKA: Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin. Skrypt nr 159, AR Wrocław, 1977.
8. N. A. SILIN, J. K. WITOSZKIN: Gidrotransport ugla po trubom i metody jego rozczeta. Izdatelstwo Akademii Nauk USSR, 1964.
9. K. KORBEL: Kryteria optymalizacji transportu rurowego hydromieszania. Raport nr 736, AGH, 1970.
10. K. KORBEL: O pewnej postaci uogólnionego równania oporów przepływów hydromieszania. Raport nr 739, AGH, 1970.
11. A. G. BAIN, S. T. BONNINGTON: The Hydraulic Transport of solids by Pipeline, 1970.
12. Transport i sedimentacja cząstek stałych. Raport INT nr 128, 1978.
13. Transport i sedimentacja cząstek stałych. Mat. IV Sem. Wrocław — Trzebiezowice, Tom I, 1980.
14. W. PARZONKA, Z. WOLAŃSKI, A. PAC-PO-MARNACKA, S. CZABAN: Hydrauliczne podstawy optymalizacji hydrotransportu odpadów flotacji rud miedzi w poziomych rurociągach tłocznych. Archiwum Hydrotechniki, 1976, 1.
15. A. MICHALIK: Badania rozkładu koncentracji fazy stałej hydromieszania wielofrakcyjnych w przekroju poprzecznym strumienia przy użyciu metody radiometrycznej. Praca doktorska, AGH, 1973.
16. N. A. SILIN i in.: Gidrotransport. Izdatelstwo Naukowa Dumka, Kijew, 1971.
17. Process Design Manual for Adsorption, Environmental Protection Agency, Washington, October, 1973.

J. Pawełek

SOME MAJOR PROBLEMS DEALT WITH IN THE HYDROTRANSPORT OF GAC

Experiments were run for three pipe diameters (21, 35 and 52 mm), two grain sizes (1 to 3.2 and 4 to

8 mm) and six GAC concentrations in the hydro-mixture. An empirical formula was derived, which makes it possible to relate the hydraulic losses to the diameter of the pipes, to the velocity of the hydro-mixture, as well as to the grain size and concentration of GAC.