

Wpływ zawartości flokulantu Magnaflog 336 na przebieg filtracji ciśnieniowej kopalnianej zawiesiny zrzutowej po wirówkach BIRD'a

*Michał Palica, Gracjan Kocy, Łukasz Kurowski, Anna Pławecka
Politechnika Śląska, Gliwice*

1. Wprowadzenie

Przedstawione w publikacjach [1] i [2] wyniki badań filtracji ciśnieniowej i periodycznej filtracji wirowej zawiesiny zrzutowej po przeróbce mechanicznej (wzbogacaniu) węgla, oparte o rezultaty prac [3÷5], pozwoliły ustalić, że separacja fazowa zachodzi zgodnie z modelem filtracji osadowej i tworzeniem placka ściśliwego [6]. Rezultaty te dotyczyły zawiesin bez i z dodatkiem flokulantów Magnaflog 156, 333, 336 i 919, a zostały uzyskane dla szeregu tkanin krajowych i importowanych. Najkorzystniejsze rezultaty filtracji ze względu na klarowność filtratu, opory hydrauliczne i łatwość zdejmowania osadu z tkaniny uzyskano dla tkaniny fińskiej 71-2183. Tkanina ta ma jednak wyższy koszt jednostkowy od krajowych tkanin PT-912 i PT-2038 s, dlatego w badaniach nad wpływem ilości flokulantu na filtrowalność zawiesiny zrzutowej stosowano wymienione tkaniny krajowe, które mają niewiele wyższe opory od R_p tkaniny 71-2183 ([1], tab. 6). Drugim założeniem przyjętym w niniejszych badaniach było użycie flokulantu Magnaflog 336, który dla zawiesiny zrzutowej został przetestowany i dobrany ilościowo przez wyspecjalizowaną firmę [7]. Dane z prac [1÷5] wskazują, że rezultaty testów filtracji ciśnieniowej dla flokulantów Magnaflog 156, 333, 336 i 919 przy użyciu tej samej dawki niewiele się różnią, co wskazywało, by w badaniach wpływu ilości flokulantu na filtrowalność zawiesiny zrzutowej użyć zalecanego flokulantu Magnaflog 336. Stąd można było ograniczyć badania dla spotykanych w praktyce ciśnień filtracji w testach filtracji ciśnieniowej i liczby obrotów oraz czasów wirowania w testach periodycznej filtracji wirowej dla używanych podczas separacji tkanin

(PT-912 i PT-2038 s) i flokulantu Magnaflog 336w zakresie zbliżonym do zaleceń producenta. Podał on dla zawiesiny zrzutowej flotokonzentratu wskaźnik równy 0,07 kg flokulantu na 1000 kg ciała stałego, przy czym flokulant winien być dodawany w formie żelu o stężeniu 0,1%. Biorąc pod uwagę, że zawartość ciała stałego w zawieszynie zrzutowej poddanej rozdzielności waha się wokół $u_{Az} \approx 0,045$ [kg c.st/kg zaw.], można określić dawkę flokulantu w przeliczeniu na suchą substancję, zalecaną przez producenta w następujący sposób:

$$\frac{0,07 \text{ [kg such. flok.]} }{1000 \text{ [kg c. st.]}} \cdot \frac{0,045 \text{ [kg c. st.]}}{1 \text{ [kg zaw.]}} \cdot \frac{1010 \text{ [kg zaw.]}}{1 \text{ [m}^3 \text{ zaw.]}} =$$
$$= 0,00318 \left[\frac{\text{kg such. flok.}}{\text{m}^3 \text{ zaw.}} \right] = 3,2 \left[\frac{\text{g such. flok.}}{\text{m}^3 \text{ zaw.}} \right]$$

przy czym przyjęto tu średnią gęstość zawiesiny $\rho_z = 1010$ [kg/m³], (w [1] podano omyłkowo wartość dawki o rząd niższą).

W badaniach dodawano żel 0,1% do wypełnionego mieszalnika o pojemności 4 dm³, zatem ilość flokulantu zalecana przez producenta wymagała dodania do zbiornika ok. 12,8 mg suchego flokulantu. Wartość tą uzyskano z proporcji:

$$\begin{array}{rcl} 3,2 \text{ g such. flok.} & - & 1000 \text{ dm}^3 \text{ zaw.} \\ x & - & 4 \text{ dm}^3 \text{ zaw.} \end{array}$$

Przyjmując gęstość żelu niewiele różniącą się od gęstości wody, 1 ml 0,1% roztworu zawierał 1 mg suchego flokulantu, stąd zalecana dawka dodawana do mieszalnika w formie żelu 0,1% wynosi 12,8 ml. Po przeprowadzeniu wstępnych testów filtracji ciśnieniowej w badaniach własnych ograniczono się do niższych dawek – w zakresie 2÷6 ml/4 dm³ zawiesiny (co odpowiada ok. 2÷6 [mg/4 dm³]), a wynikało to z faktu, że producent dobrał dawkę dla znacząco niższych udziałów masowych ciała stałego w zawieszynie zrzutowej ($u_z = 0,03$ [kg c. st./kg zaw.]).

2. Cel i zakres badań

Zasadniczym celem badań było:

- stwierdzenie przydatności tkanin PT-912 lub PT-2038 s w procesie rozdzielności, prowadzonym poprzez filtrację ciśnieniową,
- określenie wpływu ilości flokulantu na stałe K' równania filtracji, tzn. na filtrowalność zawiesiny zrzutowej,
- ocena zgodności danych eksperymentalnych dot. zachowania się oporów tkaniny ze wzrostem ciśnienia filtracji z teorią filtracji,
- wyznaczenie parametrów filtracyjnych zawiesin zawierających flokulant w ilości 2÷6 [mg/4 dm³ zaw.],

- sprawdzenie przydatności uzyskanych danych w modelu Sørensen ([8, 9]),
- wyznaczenie liczbowych wartości stałych i wykładników (w tym współczynników ściśliwości osadu określonych zależnością Sperry'ego) równań na wilgotność osadu uwzględniających zawartość rozpuszczonych soli w filtracie, równań na opory osadu i porowatość.

3. Wyniki badań

Zestawienie rezultatów testów prowadzonych na filtrze laboratoryjnym opisanym w [9] zamieszczono w tabeli 1.

Wartości K oznaczane z testów jako tangens nachylenia prostoliniowych odcinków charakterystyk filtracji przeliczano na K' zależnością

$$K' = K \cdot u_z \cdot \rho_z \quad (1)$$

Wilgotności osadów pofiltracyjnych (po strefie kompresji) określano metodą ważenia i suszenia [1], a następnie uwzględniano w filtracie zawartość soli u_s (którą wyznaczano odrębnie), zaś wilgotność z poprawką na zawartość soli liczone zależnością:

$$w_{pl}^* = \frac{w_{pl}}{1 - w_{pl} \frac{u_s}{1 - u_s}} \quad (2)$$

Współczynnik ściśliwości osadu s_s wg Sperry'ego znajdowano z wyrównywania danych eksperymentalnych w układzie

$$\ln K' = \ln A + (1 - s_s) \cdot \ln \Delta P \quad (3)$$

Na rys. 1 pokazano przebieg takich zależności dla zawiesiny bez dodatku flokulantu (dla tkanin PT-912 i PT-2038 s) oraz dla zawiesin, do których dodano ok. 2, 4 i 6 [mg flokulantu/4 dm³ zaw.] (danych dla 3 i 5 mg/4 dm³ zaw. nie zamieszczono na wykresie, by był on bardziej czytelny). Jak wspomniano, wszystkie dane odnoszące się do zawiesiny zawierającej flokulant dotyczą tkaniny PT-912. W tabeli 2 podano A i s_s (wg Sperry'ego) oraz współczynnik R^2 określający zgodność danych pomiarowych z obliczonymi dla n testów. Jak widać, zgodność ta jest bardzo dobra. Wartość s_s wyznaczoną z wyrównywania (3) różni się od wyliczonej zależnością Tillera – Leu [10], a którą otrzymuje się jako wykładnik równania (4) na opór właściwy przepływu przez osad pofiltracyjny (tabela 3), a wyjaśnienie tych różnic znajduje się m.in. w [9].

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 + \frac{\Delta P}{P_a} \right)^{s_{T-L}}, \quad P_a = 0,005 \text{ [MPa]}, \quad \Delta P \text{ [MPa]} \quad (4)$$

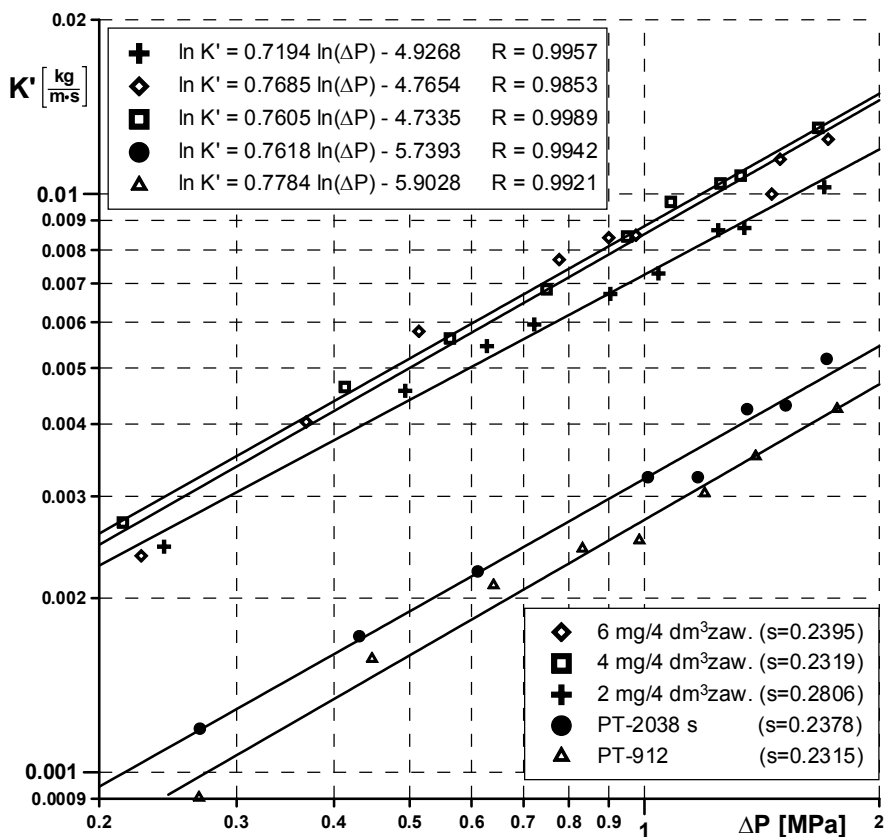
Tabela 1. Wybrane dane z wszystkich testów filtracji ciśnieniowej

Table 1. Selected data from all tests of pressure filtration

Parametry zawiesiny	ΔP [MPa]	K' [kg/(m's)]	C [m ³ /m ³]	W_{pl}^*	s_s wg Spery'ego
1	2	3	4	5	6
Zawartość flokulantu: 2 mg/4 dm ³ zaw. $\rho_z = 1010,3 \text{ kg/m}^3$ $u_s = 0,00361$ $u_z = 0,0445$	0,2422 0,4935 0,6282 0,7224 0,9042 1,0421 1,2431 1,3429 1,7001	0,002455 0,004565 0,005455 0,005947 0,006715 0,007289 0,008651 0,008731 0,010267	0,01608 0,01207 0,01158 0,01698 0,01662 0,01692 0,01539 0,01756 0,00876	0,4203 0,3911 0,3842 0,3808 0,3762 0,3738 0,3113 0,3704 0,3680	0,2806
Zawartość flokulantu: 3 mg/4 dm ³ zaw. $\rho_z = 1015,5 \text{ kg/m}^3$ $u_s = 0,00412$ $u_z = 0,0445$	0,4389 0,6826 0,8071 0,9550 1,1456 1,3758 1,4936 1,6860	0,003872 0,006039 0,007684 0,008611 0,012010 0,010046 0,011531 0,015460	0,00823 0,01019 0,01256 0,01402 0,01377 0,01193 0,01177 0,01347	0,4243 0,4050 0,3947 0,3875 0,3783 0,3710 0,3683 0,3633	0,2224
Zawartość flokulantu: 4 mg/4 dm ³ zaw. $\rho_z = 1008,3 \text{ kg/m}^3$ $u_s = 0,00410$ $u_z = 0,0469$	0,2264 0,3684 0,5139 0,7776 0,9000 0,9749 1,4561 1,4923 1,7197	0,002367 0,004033 0,005785 0,007697 0,008396 0,008481 0,009992 0,014477 0,012426	0,01832 0,01386 0,02548 0,02050 0,02162 0,02472 0,01121 0,02170 0,01500	0,4118 0,3977 0,3888 0,3788 0,3740 0,3701 0,3637 0,3622 0,3604	0,2319
Zawartość flokulantu: 5 mg/4 dm ³ zaw. $\rho_z = 1011,5 \text{ kg/m}^3$ $u_s = 0,00370$ $u_z = 0,0472$	0,4264 0,6366 0,8358 1,0604 1,2540 1,4336 1,6109 1,7152	0,005051 0,007406 0,009546 0,011444 0,011679 0,013339 0,013588 0,015999	0,01232 0,01374 0,01628 0,01786 0,01888 0,01795 0,01881 0,02608	0,4019 0,3898 0,3791 0,3733 0,3682 0,3626 0,3602 0,3570	0,2384

Tabela 1. cd
Table 1. cont.

Parametry zawiesiny	ΔP [MPa]	K' [kg/(m's)]	C [m ³ /m ³]	W_{pl}^*	S_s wg Spery'ego
1	2	3	4	5	6
Zawartość flokulantu: 6 mg/4 dm ³ zaw. $\rho_z = 1011,6 \text{ kg/m}^3$ $u_s = 0,00410$ $u_z = 0,0473$	0,4129	0,004635	0,01477	0,4018	0,2395
	0,5632	0,005623	0,01329	0,3961	
	0,7487	0,006338	0,01236	0,3874	
	0,9500	0,008436	0,01201	0,3846	
	1,0806	0,009687	0,02244	0,3804	
	1,2514	0,010421	0,01455	0,3741	
	1,3282	0,010749	0,01355	0,3699	
	1,6700	0,013003	0,01714	0,3621	
Tkanina PT-2038 s, zawiesina bez floku- lantu $\rho_z = 1013,7 \text{ kg/m}^3$ $u_s = 0,00390$ $u_z = 0,0436$	0,2692	0,001190	0,04047	0,4327	0,2378
	0,4309	0,001719	0,03433	0,4077	
	0,6112	0,002225	0,03868	0,4044	
	1,0101	0,003237	0,03152	0,3878	
	1,1703	0,003247	0,03464	0,3804	
	1,3535	0,004245	0,04012	0,3807	
	1,5169	0,009309	0,05301	0,3720	
	1,7122	0,005185	0,05260	0,3680	
Tkanina PT-912, zawiesina bez floku- lantu $\rho_z = 1013,7 \text{ kg/m}^3$ $u_s = 0,00390$ $u_z = 0,0436$	0,2685	0,000904	0,02192	0,4127	0,2215
	0,4474	0,001571	0,02421	0,4030	
	0,6404	0,002106	0,02515	0,3938	
	0,8327	0,002437	0,01603	0,3847	
	0,9848	0,002518	0,02900	0,3806	
	1,1947	0,003036	0,02079	0,3770	
	1,3886	0,003519	0,02215	0,3763	
	1,7660	0,004250	0,02028	0,3639	



Rys. 1. Zależność $K' = f(\Delta P)$

Fig. 1. Function $K' = f(\Delta P)$

Tabela 2. Stała A i wykładnik s_s zależności (3) dla części testów

Table 2. Constant A and exponent s_s in eq. (3) for part of tests

Zawiesina zawierająca Magnaflog w ilości	A	s_s	R^2	n
2 mg/4 dm ³ zaw.	0,007250	0,2806	0,9915	9
4 mg/4 dm ³ zaw.	0,008519	0,2319	0,9709	9
6 mg/4 dm ³ zaw.	0,008796	0,2395	0,9980	9
Zaw. bez flokulantu, tkanina PT-2038 s	0,003217	0,2378	0,9985	8
Zaw. bez flokulantu, tkanina PT-912	0,002732	0,2215	0,9842	8

Tabela 3. Opór właściwy osadu wyznaczony zależnością (4) $P_k = \Delta P$ [MPa],

$$P_a = 0,0005 \text{ [MPa]}$$

Table 3. Specific resistance of sediment calculated using eq. (4) $P_k = \Delta P$ [MPa],

$$P_a = 0.0005 \text{ [MPa]}$$

Zawiesina zawierająca Magnaflog w ilości	α_0 [1/m ²]	S_{T-L}	R^2	n
2 mg/4 dm ³ zaw.	$1,5099 \cdot 10^{15}$	0,4810	0,9347	9
3 mg/4 dm ³ zaw.	$3,1682 \cdot 10^{15}$	0,3022	0,7721	8
4 mg/4 dm ³ zaw.	$1,0869 \cdot 10^{15}$	0,5443	0,8464	9
5 mg/4 dm ³ zaw.	$0,8778 \cdot 10^{15}$	0,5468	0,9170	8
6 mg/4 dm ³ zaw.	$1,4052 \cdot 10^{15}$	0,4903	0,9801	9
Zaw. bez flokulantu, tkanina PT-2038 s	$3,8050 \cdot 10^{15}$	0,4639	0,9742	8
Zaw. bez flokulantu, tkanina PT-912	$4,9159 \cdot 10^{15}$	0,4507	0,9187	8

Kolejnymi danymi, niezbędnymi do modelowania przebiegu filtracji z towarzyszącą kompresją osadu jest porowatość graniczna ε_0 i współczynnik β określający podatność porowatości na ciśnienie procesowe. Dane te wyznacza się na drodze wyrównywania pomiarowych wartości ε (na podstawie oznaczeń udziału masowego ciała stałego w osadzie u_{pl}) w funkcji ciśnienia procesowego

$$\varepsilon = \frac{1 - u_{pl}}{\frac{\rho_f}{1 - u_{pl}} + \frac{u_{pl}}{\rho_s}} = f(\Delta P) \quad (5)$$

Charakterystyczny przebieg funkcji $\varepsilon = f(\Delta P)$ upoważnia do stosowania zależności Tillera-Leu [10]

$$(1 - \varepsilon) = (1 - \varepsilon_0) \left(1 + \frac{\Delta P}{P_a} \right)^\beta \quad (6)$$

gdzie ΔP i P_a są takie same, jak w (4).

Zestawienie ε_0 i β uzyskanych po wyrównywaniu danych doświadczalnych zamieszczono w tabeli 4. Jak widać, zgodność doświadczeń i obliczeń, wyrażona przez R^2 jest również w tym przypadku dobra.

Tabela 4. Zestawienie ε_0 i β uzyskanych po wyrównywaniu danych doświadczalnych

$$\text{zależnością (6)} \quad (1 - \varepsilon) = (1 - \varepsilon_0) \left(1 + \frac{\Delta P}{P_a} \right)^\beta \quad (\Delta P \text{ [MPa]}, P_a = 0,0005 \text{ [MPa]})$$

Table 4. List of ε_0 and β gained after equalization of experimental data with eq. (6)

$$(1 - \varepsilon) = (1 - \varepsilon_0) \left(1 + \frac{\Delta P}{P_a} \right)^\beta \quad (\Delta P \text{ [MPa]}, P_a = 0.0005 \text{ [MPa]})$$

Zawiesina zawierająca Magnaflog w ilości	ε_0	β	R^2	N
2 mg/4 dm ³ zaw.	0,5718	0,0405	0,9694	9
3 mg/4 dm ³ zaw.	0,6040	0,0584	0,9829	8
4 mg/4 dm ³ zaw.	0,6023	0,0630	0,9616	9
5 mg/4 dm ³ zaw.	0,6464	0,0841	0,9914	8
6 mg/4 dm ³ zaw.	0,5800	0,0569	0,9789	9
bez flokulantu tkanina PT-2038 s	0,6184	0,0646	0,9537	8
bez flokulantu tkanina PT-912	0,6147	0,0656	0,9420	8

W kolejnej tabeli 5 podano stałe i wykładniki równania opisującego wilgotność placka po kompresji, skorygowaną o zawartość soli. W tabeli tej nie ma danych dla zawiesiny bez flokulantu, jako że podczas odwodnienia flokulant jest w procesie dodawany.

Równanie to ma postać:

$$w_{pl}^* = \exp(A \cdot \Delta P^B) + C \quad \Delta P \text{ [MPa]} \quad (7)$$

Tabela 5. Stałe i wykładniki równania (7)

Table 5. Constants and exponents of eq. (7)

Zawiesina zawierająca Magnaflog w ilości	A	B	C	R^2	n
2 mg/4 dm ³ zaw.	- 0,0455	0,4083	- 0,5793	0,9657	9
3 mg/4 dm ³ zaw.	- 1,9561	0,1627	+ 0,2493	0,9962	8
4 mg/4 dm ³ zaw.	- 2,7792	0,1345	+ 0,3088	0,9902	9
5 mg/4 dm ³ zaw.	- 1,3304	0,0905	+ 0,1095	0,9946	8
6 mg/4 dm ³ zaw.	- 0,0985	0,3378	- 0,5269	0,9864	9

Wreszcie w tabelach 6÷9 zamieszczono wybrane dane dotyczące oporu tkanin, uzyskane z danych pomiarowych na podstawie przeliczenia

$$R_p = C\Delta P / (K \cdot \eta) \quad (8)$$

(Wartość η przyjęto jak dla wody w temp. 20°C $\eta = 0,001$ [kg/(m · s)])

Dane te posłużyły do sporządzenia rysunku 2.

Tabela 6. Zestawienie obliczonych wartości R_p dla 3 mg flokulantu/4 dm³ zawiesiny

Table 6. List of calculated R_p values for 3 mg of flocculent per 4 dm³ of suspension

ΔP [MPa]	R_p [1/m]
0,4389	$0,4215 \cdot 10^{12}$
0,6826	$0,5204 \cdot 10^{12}$
0,8071	$0,5961 \cdot 10^{12}$
0,9550	$0,6201 \cdot 10^{12}$
1,1456	$0,7314 \cdot 10^{12}$
1,3758	$0,4215 \cdot 10^{12}$
1,4936	$0,8648 \cdot 10^{12}$
1,6860	$1,0061 \cdot 10^{12}$

Tabela 7. Zestawienie obliczonych wartości R_p dla 5 mg flokulantu/4 dm³ zawiesiny

Table 7. List of calculated R_p values for 5 mg of flocculent per 4 dm³ of suspension

ΔP [MPa]	R_p [1/m]
0,4264	$0,4965 \cdot 10^{12}$
0,6366	$0,5638 \cdot 10^{12}$
0,8358	$0,6805 \cdot 10^{12}$
1,0604	$0,9551 \cdot 10^{12}$
1,2540	$0,9677 \cdot 10^{12}$
1,4336	$0,9209 \cdot 10^{12}$
1,6109	$1,0646 \cdot 10^{12}$
1,7152	$1,3348 \cdot 10^{12}$

Tabela 8. Zestawienie obliczonych wartości R_p dla tkaniny PT-2038 s (zawiesina bez flokulantu)

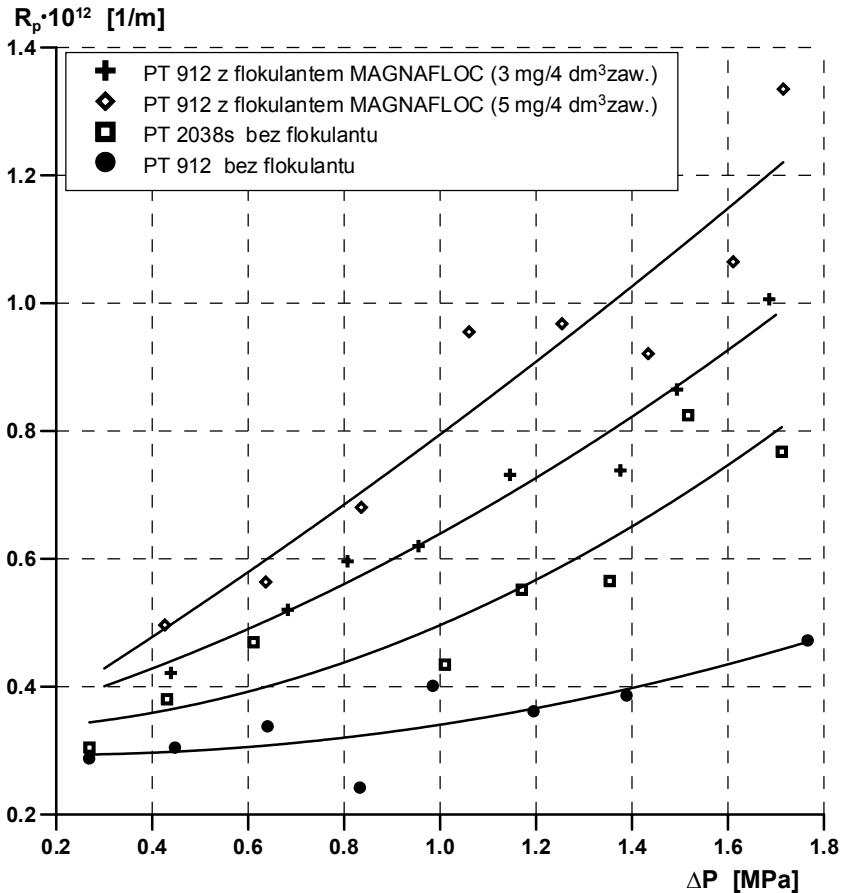
Table 8. List of calculated R_p values for filter cloth PT-2038 s (suspension without flocculent)

ΔP [MPa]	R_p [1/m]
0,2692	$0,3047 \cdot 10^{12}$
0,4309	$0,3804 \cdot 10^{12}$
0,6112	$0,4696 \cdot 10^{12}$
1,0101	$0,4346 \cdot 10^{12}$
1,1703	$0,5518 \cdot 10^{12}$
1,3535	$0,5654 \cdot 10^{12}$
1,5169	$0,8246 \cdot 10^{12}$
1,7122	$0,7676 \cdot 10^{12}$

Tabela 9. Zestawienie obliczonych wartości R_p dla tkaniny PT-912 (zawiesina bez flokulantu)

Table 9. List of calculated R_p values for filter cloth PT-912 (suspension without flocculent)

ΔP [MPa]	R_p [1/m]
0,2685	$0,2878 \cdot 10^{12}$
0,4474	$0,3047 \cdot 10^{12}$
0,6404	$0,3379 \cdot 10^{12}$
0,8327	$0,3478 \cdot 10^{12}$
0,9848	$0,4013 \cdot 10^{12}$
1,1947	$0,3616 \cdot 10^{12}$
1,3886	$0,3862 \cdot 10^{12}$
1,7660	$0,4721 \cdot 10^{12}$



Rys. 2. Opór właściwy przegród R_p dla zawiesin bez i z dodatkiem flokulantu Magnaflog 336 w funkcji ciśnienia filtracji

Fig. 2. Specific resistance of barriers R_p for suspensions with and without addition of Magnaflog 336 flocculent in function of filtration pressure

Stałe C i K poszczególnych charakterystyk były określone doświadczalnie w testach, a dotyczą one prostoliniowych odcinków tych charakterystyk w postaci

$$\frac{V}{F} = K \frac{\tau}{V/F} + C \quad (9)$$

Wartości K znajdują się w [11] i [12], ale można je wyliczyć również z tabeli 1 na podstawie zależności (1). Dane dla zawartości flokulantu 2, 4 i 6

[mg/4 dm³ zaw.] wskazują na podobną tendencję wzrostową R_p wraz ze wzrostem ΔP, ale rozrzut punktów jest nieco większy, stąd nie zamieszczono ich na wykresie, by jego czytelność była zachowana.

W kolejnej tabeli 10 podano wybrane parametry filtracyjne dla badanej zawiesiny bezi z dodatkiem flokulantu Magnaflog 336 dla ciśnień 0,2, 0,8 i 1,6 MPa. Dane te pozwalają obrazowo ocenić, jak dodatek flokulantu i ciśnienie filtracji wpływają na te parametry.

Tabela 10. Wybrane parametry filtracyjne dla ciśnień 0,2, 0,8 i 1,6 MPa

Table 10. Selected filtration parameters for pressures 0.2, 0.8 and 1.6 MPa

Parametr		Zawiesina zawierająca flokulant w ilości			Zawiesina bez flokulantu przy użyciu tkanin		
		2 mg/4 dm ³ zaw.	4 mg/4 dm ³ zaw.	6 mg/4 dm ³ zaw.	PT-2038 s	PT-912	
W _{pl} *	ΔP [MPa]	0,2	0,3974	0,4154	0,4175	0,4198 ^{*)}	0,4224 ^{*)}
		0,8	0,3800	0,3762	0,3858	0,3870 ^{*)}	0,3931 ^{*)}
		1,6	0,3671	0,3606	0,3640	0,3670 ^{*)}	0,3702 ^{*)}
ε	ΔP [MPa]	0,2	0,5023	0,4975	0,4812	0,5137	0,5084
		0,8	0,4740	0,4522	0,4392	0,4701	0,4623
		1,6	0,4590	0,4279	0,4028	0,4460	0,4374
α [1/m ²]	ΔP [MPa]	0,2	9,0090 · 10 ¹⁵	8,2040 · 10 ¹⁵	8,6790 · 10 ¹⁵	21,307 · 10 ¹⁵	26,211 · 10 ¹⁵
		0,8	17,395 · 10 ¹⁵	18,173 · 10 ¹⁵	16,972 · 10 ¹⁵	40,188 · 10 ¹⁵	48,689 · 10 ¹⁵
		1,6	24,279 · 10 ¹⁵	25,147 · 10 ¹⁵	25,500 · 10 ¹⁵	55,351 · 10 ¹⁵	66,265 · 10 ¹⁵
K' [kg/ms]	ΔP [MPa]	0,2	0,002278	0,002473	0,002586	0,000944	0,000780
		0,8	0,006174	0,007177	0,007423	0,002714	0,002296
		1,6	0,010166	0,012226	0,012575	0,004602	0,003939

) Wartości w_{pl}^{} zostały obliczone jako wartości orientacyjne (bez wyrównywania danych)

4. Analiza rezultatów badań

Jak wspomniano, pierwszym etapem badań było stwierdzenie przydatności wybranych tkanin do filtracji ciśnieniowej. Testom poddano kilka tkanin uzyskanych z firmy TOTALTEX Sp. z o. o., w tym PT-2038 s/K2, SPS-77, SP-16, PT-911, PT-912 i PT-1950. Zanieczyszczony filtrat uzyskano dla tkanin typu SP. Spośród pozostałych tkanin relatywnie niskimi oporami właściwymi i łatwością zdejmowania z nich osadu charakteryzowały się tkaniny PT-2038 s i PT-912, przy czym ta ostatnia używana jest w kopalni węgla kamiennego, z której pochodzi badana zawiesina. Dane rysunku 2 wskazują, że tkanina PT-912 bez dodatku flokulantu ma niższe opory właściwe od PT-2038 s, stąd użycie jej w praktyce jest w pełni uzasadnione. Rysunek ten wskazuje ponadto, że dodatek flokulantu zwiększa opory właściwe tkaniny, co można wyjaśnić czę-

ściowym blokowaniem porów tkaniny przez flokulant. Przebieg krzywych na rys. 2 wskazuje ponadto, że tkaniny PT-912 (bez i z dodatkiem flokulantu) oraz PT-2038 s zachowują się zgodnie z założeniami teorii filtracji, która przewiduje, że zastępcze obłożenie tkaniny powinno podlegać tym samym zasadom, co osad, tzn. ze wzrostem ciśnienia opór tkaniny powinien wzrastać. Stanowi to argument, że odwodnienie zawiesiny odpowiada filtracji osadowej z tworzeniem placka ściśliwego.

Drugi z celów badań, dotyczący określenia wpływu ilości flokulantu na stałe zmodyfikowane K' stanowił istotę pracy. Otóż flokulanty dodaje się do zawiesin w celu zwiększenia stałej stanowiącej o szybkości filtracji. Zgodnie z równaniem (9) im wyższa jest wartość K , tym szybciej zachodzi proces filtracji, a ponieważ wartości K' są proporcjonalne do K zgodnie z (1), zatem stwierdzenie, że dodatek flokulantu podwyższa K' jest równoznaczny z konkluzją, że przyspiesza on rozdział. Ponieważ przy sporządzaniu charakterystyk filtracji ciśnienia dobierano w zakresie $0,23 \div 1,77$ MPa w sposób przypadkowy, należało dla każdej grupy doświadczeń znaleźć w pierwszej kolejności równanie

$$K' = f(\Delta P) = A \cdot \Delta P^{1-s_s} \quad (10)$$

na bazie uzyskanych K dla poszczególnych grup doświadczeń, tzn. dla tkanin PT-912i PT-2038 s bez flokulantu, a następnie dla PT-912 z dodatkiem różnych ilości flokulantu. Ponieważ chodziło przy tym o ustalenie pewnych tendencji zmian K' wraz ze wzrostem ΔP , dlatego dokonano odpowiednich przeliczeń dla 3 dodatków flokulantu Magnaflog 336. Dane te pozwoliły ponadto wyznaczyć współczynnik ściśliwości s_s dla każdego typu zawiesinyi tkaniny. Przeliczeń porównawczych dokonano dla trzech wybranych ciśnień procesowych $\Delta P = 0,2, 0,8$ i $1,6$ MPa, a dane z przeliczeń zamieszczono w tabeli 10. Stwierdzono przede wszystkim, że stałe te dla zawiesin nie zawierających flokulantu są zdecydowanie niższe, niż dla zawiesin zawierających flokulant w ilości $2 \div 6$ [mg/4 dm³ zaw.] ($2,4 \div 3,3$ razy dla ciśnienia $0,2$ MPa i $2,2 \div 3,2$ razy dla $\Delta P = 1,6$ MPa). Z kolei dodatek flokulantu w ilości 2 [mg/4 dm³ zaw.] powodował ok. 2,9-krotne przyspieszenie filtracji przy $\Delta P = 0,2$ MPa, 2,7-krotne dla $\Delta P = 0,8$ MPa i ok. 2,6-krotne dla $\Delta P = 1,6$ MPa. Wskazuje to na fakt, że dodatek flokulantu przewyższający znacząco dawkę 6 [mg/4 dm³ zaw.] w niewielkim tylko stopniu przyspiesza filtrację i prawdopodobnie dawka równa $12,8$ [mg/4 dm³ zaw.] jest za duża. Zatem zakres dodatku flokulantu Magnaflog 336 w badaniach własnych został dobrany poprawnie – do rozdziału zawiesinyi zrzutowej wskazany jest dodatek w ilości $7 \div 8$ [mg/4 dm³ zaw.], a wynika to głównie z bardzo zbliżonego przebiegu linii $K' = f(\Delta P)$ dla dodatków 4 i 6 [mg/4 dm³ zaw.] i niewielkich różnic w położeniu tych linii w stosunku do dodatku 2 [mg/4 dm³ zaw.].

Rezultaty przeliczeń pozwoliły wyznaczyć też liczbowe wartości współczynników wykładników potęgowych zależności (4) i (6), niezbędnych w modelowaniu przebiegu filtracji z towarzyszącą strefą kompresji sposobem opisanym w [8] i rozwiniętym w [9]. W rezultacie takiego modelowania uzyskano w [11] bardzo dobrą zgodność charakterystyk obliczeniowych i doświadczalnych w układzie $V/F = f(\tau)$ dla najniższych i najwyższych ciśnień filtracji stosowanych w badaniach oraz dla zawiesiny bez i z dodatkiem flokulantu. Dane te porównano ponadto z rezultatami [1], uzyskując dość dobrą zgodność dla zawiesin nie zawierających flokulantu i tkaniny PT-912 oraz zawierającej Magnaflog 336 w ilości ok. 4 [mg/4 dm³ zaw.]. Jedynie (niewielkie) różnice zaobserwowano dla wilgotności osadu, które były nieco niższe, niż w prezentowanych w niniejszej pracy badaniach, ale wynikało to głównie z nieco wyższych wartości ΔP uwzględnianych w [1].

Natomiast wartości ε_0 , β , α , s_{T-L} wg Tillera i Leu oraz s_S wg Sperry'ego były zbliżone. Warta podkreślenia jest też bardzo dobra zgodność danych zmierzonych i obliczonych odpowiednimi korelacjami, co świadczy o poprawnie przyjętym modelu opisu procesu.

Wiele badań procesu filtracji prowadził Piecuch T. i współpracownicy m.in. [13÷26]. Badania te prowadził Piecuch i inni (m.in. praca doktorska A.M. Anielak, Pol. Śląska 1983) na zawiesinach po przeróbce nie tylko węgla ale także poflotacyjnych odpadów rud cynku, ołowiu i miedzi. Wyniki badań przedstawiono na wykresach a następnie aproksymowano dobraną funkcją tworząc modele analityczno-empiryczne tych procesów. Było więc to inne podejście do analizy procesu, pod kątem aplikacyjnym.

5. Wnioski

1. Wyniki zaprezentowanych tu badań wskazują, że użycie flokulantu Magnaflog 336 jest ze wszech miar wskazane, jako że znacząco przyspiesza proces rozdziału. Zalecana dawka winna wynosić 7÷8 [mg/4 dm³ zaw.] suchego flokulantu dla zawiesiny, w której udział masowy wynosi ok. 4,5% ciała stałego, a taką zawiesinę poddano badaniom.
2. Zamiast zalecanej w [1] importowanej tkaniny o symbolu 71-2183 można z powodzeniem użyć krajowej tkaniny PT-912 firmy TOTALTEX Sp. z o. o., gwarantującej mimo drobnego uziarnienia ciała stałego klarowny prześwyt.
3. Wnioski dotyczące zagospodarowania ciała stałego (zawierającego ok. 81,6 [1]÷82,4% [11], [12] węgla po wyprażeniu) i możliwości jego energetycznego wykorzystania są podobne jak w [1].

4. Parametry filtracyjne, wyznaczone eksperymentalnie, pozwalają ponadto modelować przebieg procesu rozdziału, dla którego obowiązuje tworzenie osadu ściśliwego.
5. Można oczekiwać, że po filtracji ciśnieniowej zawiesiny zawierającej zalecaną ilość flokulantu Magnaflog 336 uzyska się osad o wilgotności ok. 36,5÷37,0% przy ciśnieniu ok. 1,6 MPa i wilgotności ok. 40,0÷41,0% przy ciśnieniu ok. 0,2 MPa. Osad taki, przed przekazaniem go odbiorcom, winien być dosuszany.

Spis symboli i oznaczeń

- A, B, C – stałe równań (3) lub (7)
– constants in Eq. (3) or (7)
- C – stała filtracji w równaniu (9), [m]
– filtration constant in Eq. (9), [m]
- F – powierzchnia filtracyjna, [m²]
– filtration area, [m²]
- K – stała filtracji w równaniu (9), [m²/s]
– filtration constant in Eq. (9), [m²/s]
- K' – zmodyfikowana stała filtracji, [kg/(m · s)]
– modified filtration constant, [kg/(m · s)]
- P_a – współczynnik skali, [MPa]
– scale factor, [MPa]
- P_k = ΔP – różnica ciśnień, [MPa]
– pressure difference, [MPa]
- R_p – opór przegrody filtracyjnej, [1/m]
– resistance of the filter medium, [1/m]
- V – objętość filtratu, [m³]
– filtrate volume, [m³]
- n – ilość testów
– number of testes
- s_s – współczynnik ściśliwości osadu wg Sperry'ego
– cake compressibility coefficient according to Sperry
- s_{T-L} – współczynnik ściśliwości osadu wg Tillera i Leu
– cake compressibility coefficient according to Tiller and Leu
- u_{pl} – udział masowy ciała stałego w placku, [kg/kg]
– mass concentration of liquid phase in cake, [kg/kg]
- u_s – udział masowy soli w filtracie, [kg/kg]
– salt mass concentration in filtrate, [kg/kg]
- u_z – udział masowy ciała stałego w zawieszynie, [kg/kg]
– solid phase mass concentration in suspension, [kg/kg]
- w_{pl} – wilgotność placka, [kg/kg]
– cake moisture content, [kg/kg]

w_{pl}^*	– wilgotność placka zmodyfikowana, [kg/kg] – modified cake moisture, [kg/kg]
α	– objętościowy opór właściwy osadu wg Tillera i Leu, [$1/m^2$] – volumetric specific resistance of the cake according to Tiller and Leu, [$1/m^2$]
α_0	– współczynnik proporcjonalności w zależności (4), [$1/m^2$] – proportionality coefficient in Eq. (4), [$1/m^2$]
β	– współczynnik podatności porowatości na ciśnienie – coefficient of susceptibility of cake porosity to overpressure
ε	– porowatość osadu, [m^3/m^3] – cake porosity, [m^3/m^3]
η	– dynamiczny współczynnik lepkości, [$kg/(m \cdot s)$] – dynamic viscosity coefficient, [$kg/(m \cdot s)$]
ρ_f	– gęstość filtratu, [kg/m^3] – filtrate density, [kg/m^3]
ρ_s	– gęstość ciała stałego, [kg/m^3] – liquid phase density, [kg/m^3]
ρ_z	– gęstość zawiesiny, [kg/m^3] – suspension density, [kg/m^3]
τ	– czas filtracji, [s] – time of filtration, [s]

Indeksy

- a – dotyczy współczynnika skali / refers to scale coefficient
- f – odnosi się do filtratu / refers to filtrate
- o – odnosi się do wartości granicznej / refers to limiting value
- pl – dotyczy placka / refers to filtration cake
- s – dotyczy soli lub ciała stałego / refers to salt or solid phase
- z – dotyczy zawiesiny / refers to suspension

Literatura

1. **Palica M., Grotek A., Gruca M., Niemirowski J.:** *Opis odwadniania zawiesiny zrzutowej po wirówce filtracyjno-sedymentacyjnej BIRD'a modelem Sørensen'a*. Rocznik Ochrony Środowiska Tom 9, 133, 2007.
2. **Palica M., Korcz Ł., Niemirowski J., Szeja W.:** *Filtracja wirowa zawiesiny zrzutowej po odwadnianiu flotokonzentratu na wirówkach BIRD'a*. Karbo – Energochemia – Ekologia, 1, 57, 2007.
3. **Grotek A.:** praca dyplomowa magisterska wykonana pod kierunkiem M. Palicy (do użytku wewnętrznego), Gliwice 2006.
4. **Gruca M.:** praca dyplomowa magisterska wykonana pod kierunkiem M. Palicy (do użytku wewnętrznego), Gliwice 2006.
5. **Korcz Ł.:** praca dyplomowa magisterska wykonana pod kierunkiem M. Palicy (do użytku wewnętrznego), Gliwice 2006.

6. **Żużikow W. A.:** *Filtracja. Teoria i praktyka rozdzielania zawiesin.* (tłum. z j. ros.), WNT, Warszawa 1985.
7. **Niemirowski J.:** *Informacja technologiczna*
8. **Sørensen P. B., Moldrup P., Hansen J.:** Chem. Eng. Sci. , 51, 967, 1996.
9. **Palica M., Kocurek J.:** *Wybrane zagadnienia teorii filtracji i kompresji osadów.* Wyd. Pol. Śl., Gliwice, 2001.
10. **Tiller F. M., Leu W. F.:** J. Chinese Ins. Chem. Eng. , 11, 61, 1980.
11. **Plawecka A.:** praca dyplomowa magisterska wykonana pod kierunkiem M. Palicy (do użytku wewnętrznego), Gliwice 2007.
12. **Kocy G.:** praca dyplomowa magisterska wykonana pod kierunkiem M. Palicy (do użytku wewnętrznego), Gliwice 2007.
13. **Piecuch T.:** *Badania efektywności procesu filtracji mulów węgla surowych w świetle doświadczeń.* Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska Gliwice, 1972.
14. **Piecuch T.:** *Analityczno-empiryczny model procesu filtracji próżniowej zawiesin mulów węglowych.* (praca habilitacyjna), Zeszyty naukowe Pol. Śląskiej Nr 434, seria Górnictwo 65a, 132, 1976.
15. **Piecuch T.:** *Analiza teoretyczna przepływu medium przez modelowe wirówki sitowe.* Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Nauk o Ziemi, 100, 1984.
16. **Piecuch T., Sztaba K.:** *Metoda obliczania oporu filtracji próżniowej zawiesin mulów węglowych.* Kwartalnik Górnictwa PAN Rok 2. Zeszyt 3, 231-242, 1978.
17. **Piecuch T., Anielak A.M.:** *Analityczno-empiryczne kryterium filtracji ciśnieniowej i odśrodkowej zawiesiny poflotacyjnych odpadów cynku i ołowiu.* Zeszyty Naukowe Archiwum Górnictwa PAN, Tom 29, z. 3, 405-422, 1984.
18. **Piecuch T.:** *Równanie czasu przepływu rotacyjnego ścieku przez wirówkę filtracyjną.* Zeszyty Naukowe Archiwum Ochrony Środowiska PAN, z. 3-4, 27-45, 1985.
19. **Piecuch T., Anielak A.M.:** *Vergleich der Entwässerung bei Druck und Zentrifugaľfiltration mit Statistischen Modellen.* Chemische Technik 3, 101-103, Leipzig, 1987.
20. **Piecuch T., Piekarski J.:** *Badanie procesu filtracji ciśnieniowej zawiesiny poprodukcyjnej z zakładu przetwórstwa drewna Polspan-Kronospan.* Monografia Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Vol. 11, 2003.
21. **Piecuch T.:** *Ciśnieniowa filtracja koncentratów zawiesinowych flotacyjnych miedzi.* Rudy i Metale Nieżelazne 10, 485-492, 1978.
22. **Piecuch T.:** *Ciśnieniowa filtracja poflotacyjnych zawiesin odpadów miedzi.* Rudy i Metale Nieżelazne 12, 639-644, 1978.
23. **Piecuch T., Anielak A.M.:** *Analityczno-empiryczne kryterium filtracji ciśnieniowej i odśrodkowej zawiesiny poflotacyjnych odpadów rud miedzi.* Rudy i Metale Nieżelazne 3, 111-117, 1984.
24. **Anielak A.M., Folwarczny A., Jasicki W., Piecuch T.:** *Badania filtracji ciśnieniowej poflotacyjnych zawiesin rud cynkowo-olowiowych pod kątem symulacji prasy typu R.O.W.* XIII Krakowska Konferencja Przeróbki Kopalni, Zeszyt Naukowy AGH – Materiały konferencyjne , Kraków, 1979.
25. **Piecuch T., Opielka A.:** *Technologiczne badania prasy filtracyjnej typu ROW.* Zeszyty Naukowe AGH – IX Krakowska Konferencja Przeróbki Kopalni, 1976.
26. **Piecuch T.:** *Technika wodno-mulowa – urządzenia i procesy.* Podręcznik, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2007.

Influence of Magnaflog 336 Flocculent Content on the Pressure Filtration of Mine Dump Suspension after BIRD Centrifuge

Abstract

Recovery of solid phase containing about 82% of coal in dry matter from mine dump suspension after the BIRD centrifuge and filtrate recirculation is important from the environmental point of view. Such phase separation is very difficult in the existing system due to the increase of concentration of the smallest solid phase fractions in liquid during a course of the process finally resulting in periodical exchange of circulating liquid. Among possible methods facilitating the separation, pressure filtration of settled in a clarifier sludge formed during sedimentation of dump suspension containing appropriate amount of Magnaflog 336 flocculant seems to be the promising one. In presented research, the usefulness of PT-912 filter cloth in the separation process (pressure and centrifugal filtration) was proved. The main goal of the investigations was the determination of optimal dosage of Magnaflog 336 flocculant in dump suspension and comparison of this value with the ones currently used in industrial practice. Tests were also performed to confirm that the separation process proceeded in agreement with the compressible cake formation model, and PT-912 filter cloth behaved according to the filtration theory. Filtration parameters measured or calculated on the base of experiments allowed one to compare experimental results with the Sørensen model (i.e. the of model of sediment filtration accompanied by filter cake compression). A full compatibility between the model and experimental results for dump suspension with and without addition of Magnaflog 336 flocculant was proved. It was stated that the dry flocculant dosage used in industrial practice equal to $3.2 \text{ g/m}^3 \text{ susp.}$ (this value corresponded to $12.8 \text{ mg/4 dm}^3 \text{ susp.}$ in the laboratory mixer) was overestimated with respect to the data in Fig.1. Flocculation occurred for the 40% smaller dosage than abovementioned, i.e. equal to about $1.9 \text{ g/m}^3 \text{ susp.}$ The analysis of constants K' in Fig.1 proved that the addition of flocculant was necessary. Namely, flocculant dosage equal to $1.9 \text{ g/m}^3 \text{ susp.}$ increased the decisive rate constant K' 2.2-3.3-folded. Flocculant addition did not change significantly moisture content in sediment after pressure filtration. For the pressure equal to about 0.2 MPa one can expect a value of the cake moisture content in the range 40.0-41.0%, while for the pressure about 1.6 MPa – 36.5-37.0%. Regardless the amount of flocculant (in the range $0.5\text{-}1.5 \text{ g/m}^3 \text{ susp.}$, i.e. $2\text{-}6 \text{ g/m}^3 \text{ susp.}$) one obtained (except for one experimental result) similar values of the sediment compressibility coefficient according to Sperry ($s = 0.222\text{-}0.239$) or Tiller and Leu ($s = 0.45\text{-}0.55$). In the tests performed the limiting porosity was $\varepsilon_0 = 0.57\text{-}0.64$, while the porosity coefficient of susceptibility to pressure was in the range $\beta = 0.041\text{-}0.084$. It was proved that the resistance of the filter medium R_k increased with the increase of flocculant amount, what was in agreement with the filtration theory. Presented in this work experimental results were compared with the earlier ones dealing with dewatering of sediment after the BIRD centrifuge. The good agreement was achieved for suspension without flocculant and with the addition of Magnaflog 336 flocculant of concentration $1 \text{ g/m}^3 \text{ susp.}$

Therefore it was proved that separation of dump suspension using pressure filtration is technically possible. Post-filtration cake (after drying up) can be used for energetic purposes, filtrate (characterized by very good clarity) can be turned back to circulation, while the flocculant dosage may be decreased from about 3.2 to $2 \text{ g/m}^3 \text{ susp.}$