

Opis odwadniania zawiesiny zrzutowej po wirówce filtracyjno-sedymentacyjnej BIRDa modelem SØRENSENA

*Michał Palica, Aneta Grotek,
Magdalena Gruca, Jan Niemirowski
Politechnika Śląska, Gliwice*

1. Wstęp

Nowoczesne technologie odzysku węgla z flotokonzentratów opierają się zwykle na intensywnych metodach separacji fazowej, zwłaszcza na dekantacji lub filtracji wirowej, ewentualnie filtracji ciśnieniowej z pominięciem lub znaczącym ograniczeniem węzła suszenia. Ze względu na duże strumienie mediów ma to decydujące znaczenie w rachunku kosztów. Niestety po wirówkach filtracyjnych lub dekantacyjnych generowana jest zawiesina zrzutowa, zawierająca najmniejsze frakcje ciała stałego (węgla), które nie są zatrzymywane w trakcie separacji. Ponieważ koncentracja tych frakcji rośnie z czasem, a do niektórych operacji czy procesów wymagana jest faza ciekła o określonej (bardzo niskiej) zawartości fazy stałej, taka zawiesinę należy traktować jako uciążliwy odpad i cyklicznie odprowadzać z produkcji. W ten sposób nie tylko muszą być ponoszone koszty uzupełniania wody obiegowej, ale ciało stałe, zawierające ponad 80% węgla, które mogłoby być użyte jako paliwo, jest bezpowrotnie tracone. Dodatkowym problemem, związanym z ekologią, jest konieczność deponowania takich zrzutów.

W wypadku filtrowania flotokonzentratów na filtrach próżniowych lub na prasach filtracyjnych uzyskany filtrat jest zwykle na tyle klarowny, że może być zwracany do obiegu, natomiast przy dużych strumieniach flotokonzentratów użycie metod o stosunkowo małych modułach napędowych procesu (czyli niskich ΔP) staje się nieracjonalne ze względu na konieczność użycia dużej ilości takich urządzeń. Zdecydowaną przewagę ma wówczas metoda filtracji lub dekantacji wirowej, jednak o jej użyciu decyduje rachunek kosztów (głównie

koszty inwestycyjne urządzeń odwadniających, a więc dekantera czy wirówki filtracyjnej). Jak podano w [1], prócz użycia intensywnych metod odwadniania istnieje jeszcze możliwość przyspieszenia rozdziału poprzez modyfikację składu ziarnowego zawiesiny np. poprzez użycie flokulantów, przez co separacja staje się łatwiejsza. Ponieważ strumienie poddawane przeróbce są bardzo duże (odpowiadają one strumieniom flotokonzentratu pomniejszonym o ilość odzyskanego po wirówce wilgotnego ciała stałego), a koncentracje ciała stałego relatywnie niskie (rzędu kilku procent) pojawia się jeszcze jedna możliwość zmniejszenia kosztów wężła odzysku ciała stałego z zawiesiny zrzutowej, poprzez zmniejszenie ilości zawiesiny zrzutowej do urządzeń separujących fazy mechanicznie. Można to zrealizować poprzez skierowanie strumienia zrzutu do odstojnika i poddawanie separacji (np. na drodze filtracji ciśnieniowej czy wirowej) szlamu lub zawiesiny zagęszczonej i powtórny użyciu cieczy klarownej w obiegu technologicznym. Wreszcie można metody te skojarzyć, np. kierować do odstojnika zawiesinę zrzutową, do której dodawany byłby flokulant i filtrować szlam po odstojniku. W każdym wypadku należy wcześniej zebrać dane, które pozwolą ocenić możliwości techniczne zmiany technologii. Do danych tych należą m.in.:

- właściwości fizyczne zawiesiny zrzutowej, czyli gęstość zawiesiny, filtratu, ciała stałego, koncentracja fazy stałej, zawartość soli w odzyskanej fazie stałej i w filtracie, klarowność filtratu przy różnych sposobach rozdziału fazowego, pH zawiesiny;
- własności sedymentacyjne i skład ziarnowy, w tym czas krytyczny sedymentacji, średnia średnica arytmetyczna, kształt ziaren;
- własności filtracyjne, w tym stała filtracji klasycznej przy różnych różnicach ciśnień, porowatość graniczna, współczynnik podatności porowatości na ciśnienie procesowe, współczynnik ściśliwości, opór właściwy i wilgotność osadu po długim czasie kompresji itp.

Podstawową kwestią w badaniach jest stwierdzenia, czy proces separacji odpowiada tzw. filtracji osadowej, czy też występuje jakiś inny mechanizm rozdziału [2],[3] oraz wyznaczenie tzw. parametrów filtracyjnych, niezbędnych w modelowaniu procesu i przenoszeniu skali. Modelowanie pozwala określić ilość filtratu i powstałego osadu dla zadanego ciśnienia i czasu rozdziału, zarówno w trakcie filtracji, jak i w strefie kompresji osadu podczas periodycznej filtracji ciśnieniowej. Ponieważ dotyczy ono wyłącznie określonej zawiesiny, wymaga to przeprowadzenia odrębnych badań dla każdej z analizowanych zawiesin, zarówno pierwotnych, jak i z dodatkiem flokulantu. Niezależnie od tego trzeba wiedzieć, w jakiej fazie procesu pobierano zawiesinę do badań, jako że inne właściwości ma zawiesina bezpośrednio po wymianie wody obiegowej, a inne w momencie, gdy ilość ciała stałego w zasadzie uniemożliwia jej dalsze

użycie. W niniejszej pracy zebrano dane pozwalające na modelowanie procesu dla dwu dostaw zawiesiny zrzutowej bez dodatku flokulantu (nazwanych jako „Dostawa I” i „Dostawa II”) oraz dla dostawy I i II z dodatkiem flokulantów Magnaflog 336, Magnaflog 333, Magnaflog 156 i Magnaflog 919. Sposób preparowania flokulantów, ich rodzaj i dawka wynikały z danych firmy CIBA [4] oraz informacji uzyskanej od dr hab. inż. Andrzeja Gierczyckiego [5].

2. Cel i zakres badań

Celem badań było stwierdzenie, czy zawiesina zrzutowa po wirówce sedymentacyjnej BIRDa zawierająca bardzo drobne ziarna może być separowana mechanicznie na drodze filtracji ciśnieniowej. W wypadku pozytywnej odpowiedzi na tak postawione pytanie kolejnymi etapami badań były dobór przegrody filtracyjnej, wyznaczenie parametrów niezbędnych w modelowaniu procesu rozdziału oraz sprawdzenie, czy używany obecnie dla zawiesiny flotokonzentrat flokulant Magnaflog 336 firmy Ciba jest właściwie dobrany. Ponadto kolejnymi zadaniami było określenie skrajnych możliwości odwodnienia uzyskanego osadu (przy zadanej różnicy ciśnień i długim czasie filtracji) oraz przeprowadzenie szeregu badań dodatkowych i pomocniczych, w tym analiz ziarnowych, testów sedymentacyjnych, zdjęć mikroskopowych, pH zawiesiny, zawartości soli w filtracie i popiołu w cieple stałym. Ze względu na obszerny zakres badań część z nich jest kompletna, część niepełna, np. modelowanie ograniczono dla 6 zawiesin: jednej pierwotnej (dostawa I), trzech dla dostawy I z dodatkiem Magnaflog (336, 156 i 919) oraz dwu dla dostawy II z dodatkiem Magnaflog 336 i 333, zaś parametry filtracyjne określono doświadczalnie dla wszystkich serii pomiarowych. Należy tu też dodać, że analizę ziarnową zawiesiny z dostawy II (bez flokulantów) dokonano po zakończeniu badań (po około 3 miesiącach od dostawy), a zawiesiny z dostawy I bez flokulantów również około 2 miesiące po dostawie. Wykazano, że czas przechowywania zawiesiny wpływa na jej skład ziarnowy.

Przyjęto, by badania każdej z zawiesin opierały się o 14-17 pełnych charakterystyk filtracyjnych (dla dostawy I świeżej przeprowadzono 21 testów) w zakresie ciśnień 0,1÷2,0 MPa. Większość serii to 15-16 testów. Dla każdej z badanych zawiesin (bez i z dodatkiem flokulantów) określono ponadto udział masowy ciała stałego w zawieszynie wraz z solą (u_z), gęstość zawiesiny (ρ_z), gęstość filtratu z solą (ρ_f), udział masowy soli w filtracie (u_s), wilgotność końcową osadu (w_k), wilgotność końcową osadu skorygowaną o zawartość soli w filtracie (w_k^*), udziały masowe ciała stałego w plackach bez (u_{pl}), i z korektą na zawartość soli (u_{pl}^*) i grubość placka. Dla prostoliniowego odcinka charakterystyki wyznaczano metodą najmniejszych kwadratów stałą filtracji K , stałą zmodyfi-

kowana K' oraz stała C , przy czym stwierdzono, że filtracja przebiega zgodnie z modelem filtracji osadowej [2, 6], a równanie charakterystyki filtracji ma postać:

$$\frac{V}{F} = K \frac{\tau}{V/F} + C \quad (1)$$

Niezależnie od podanych tu badań prowadzono też określone badania dodatkowe i pomocnicze zgodnie z metodyką opisaną we wcześniejszych pracach, w tym w [7] i [8]. Pełny opis aktualnych modyfikacji tej metodyki znajduje się w [9], wyniki modelowania w [10].

3. Wyniki pomiarów i obliczeń

Konstrukcja filtru testowego i karta analogowa umożliwiają bezpośrednio komputerowe uzyskiwanie charakterystyk (1) oraz charakterystyk

$$\frac{V}{F} = f(\tau) \quad (2)$$

Dla filtracji klasycznej przebieg funkcji (2) jest paraboliczny, a stałe K i C zależności (1) wynoszą:

$$K = \frac{2\Delta P^{1-s}}{\alpha_m \eta C_A} \quad (3)$$

$$C = -\frac{2r}{C_A} \quad (4)$$

przy czym przyjmuje się, że tzw. masowy współczynnik oporu osadu występujący w K zmienia się z ciśnieniem zgodnie z równaniem Sperry'ego

$$\alpha_m = \alpha'_m \Delta P^s \left[\frac{m}{kg} \right] \quad (5)$$

Podobną zależność wykazuje funkcja opisująca przepuszczalność osadu

$$\alpha_v = \alpha'_v \Delta P^s \left[\frac{1}{m^2} \right] \quad (6)$$

formalnie związana z (5) poprzez C_A

$$\alpha_m = \alpha_v C_A = \alpha_v u_z \rho_z \quad (7)$$

Ponieważ często w czasie testów używa się zawieszin, w których u_z i ρ_z wykazują pewną zmienność, korelowanie funkcji

$$K = f(\Delta P) \quad (8)$$

lepiej prowadzić dla skorygowanych stałych K'

$$K' = Ku_z \rho_z \quad (9)$$

Korelacja taka umożliwiła wyznaczenie w układzie podwójnie logarytmicznym wartości współczynnika ściśliwości osadu s wg Sperry'ego:

$$\log K' = \log \frac{2}{\alpha_m \eta} + (1-s) \log \Delta P \quad (10)$$

przy czym wymaga to prowadzenia testów filtracyjnych w tej samej temperaturze i dla tej samej zawiesiny (w której może zmieniać się u_z i ρ_z), ale przy różnych ciśnieniach.

Współczynnik ściśliwości osadu można też opisać innymi równaniami, np. Tillera i Leu [11], spełniającymi warunek graniczny dla $\Delta P = 0$

$$\alpha = \alpha_m = \alpha_0 \left(1 + \frac{\Delta P}{P_a}\right)^s \left[\frac{m}{kg}\right] \quad (11)$$

w którym P_a – to tzw. współczynnik skali ($P_a = 0,005$ MPa [12]). Prawie zawsze s wyliczone wzorem (11) jest większe od s liczonego zależnościami (5) czy (6), ale te dwie ostatnie pozwalają przyjąć s jako startowe w obliczeniach numerycznych ([3], [12]). Zależność (11) przekształcono do postaci:

$$\alpha_v = \frac{\alpha_m}{u_z \rho_z} = \frac{\alpha_0 \left(1 + \frac{\Delta P}{P_a}\right)^s}{u_z \rho_z} \quad (12)$$

w której

$$\alpha_v = \frac{2\Delta P}{K_z \eta} \quad (13)$$

wyznaczono dla każdego testu. Posłużyła ona do eksperymentalnego sporządzenia funkcji $\alpha_v = f(\Delta P)$ i określenia s wg Tillera i Leu 11.

Parametr „ z ” oznaczający stosunek objętości utworzonego placka do objętości uzyskanego filtratu liczonego jako:

$$z = \frac{U_z}{\bar{\varepsilon} U_{pl} - U_{z-}} \quad (14)$$

gdzie $\bar{\varepsilon}$ - współczynnik porowatości osadu dla ciśnienia równego 80% wartości ΔP [12], przy czym

$$U = \frac{u}{1-u} \quad (15)$$

u – udział masowy ciała stałego w zawieszynie (u_z) lub placku (u_{pl}).

Jeśli określona jest wilgotność końcowa placka w_{pl} , to

$$u_{pl} = 1 - w_{pl} \quad (16)$$

Opór przegrody, kolejny parametr niezbędny w modelowaniu, a wyznaczany doświadczalnie na podstawie charakterystyki filtracji wynosi:

$$R_p = \frac{C\Delta P}{K\eta} \quad (17)$$

Zakłada się dla R_p , że opór przegrody zmienia się z ciśnieniem podobnie, jak opór osadu, tzn. rośnie z ΔP . Należy tu jednak zaznaczyć, że na dokładność określenia R_p nakłada się dokładność wyznaczania C , ΔP i K , a więc można wówczas oczekiwać, że wystąpi większy rozrzut punktów doświadczalnych, niż dla parametrów wyznaczanych bezpośrednio.

Kolejnym elementem różniącym wcześniejsze prace związane z odwadnianiem flotokonzentratów z danymi prezentowanymi w niniejszym opracowaniu jest uwzględnienie w tym ostatnim zawartości soli w filtracie i placku.

Ponieważ w oznaczaniu wilgotności osadu użyto metody wagowej i suszenia, obliczony w taki sposób rezultat obejmował ciało stałe i sól zawarte w filtracie wypełniającym pory osadu

$$w_{pl} = 1 - \frac{m_{pls}}{m_{plw}} = 1 - u_{pl} \quad (18)$$

gdzie:

m_{pls} – masa placka po suszeniu,

m_{plw} – masa placka wilgotnego

Przyjmując dla filtratu stałą wartość rozpuszczonych w nim soli (również wyznaczoną metodą ważenia i suszenia) i pełną czystość filtratu

$$w_{pl}^* = 1 - u_{pl}^* = \frac{w_{pl}}{1 - w_{pl} \frac{u_s}{1 - u_s}} \quad (19)$$

gdzie:

$$u_{pl}^* = u_{pl} - \frac{u_s}{1 - u_s} w_{pl} \quad (20)$$

u_s – udział masowy soli w filtracie

Porowatość osadu określano jako:

$$\varepsilon = \frac{1 - u_{pl}}{\frac{\rho_f}{1 - u_{pl}} + \frac{u_{pl}}{\rho_s}} \quad (21)$$

Udział masowy ciała stałego w zawieszynie

$$u_z = \frac{m_{ns}}{m_{nw}} \quad (22)$$

gdzie:

m_{ns} – masa naważki po wysuszeniu próbki,
 m_{nw} – masa naważki przed suszeniem próbki.

Korekty na zawartość soli w zawieszynie można dokonać jako:

$$u_z^* = \frac{u_z - u_s}{1 - u_s} \quad (23)$$

Udział masowy soli:

$$u_s = \frac{m_{nsf}}{m_{nmf}} \quad (24)$$

gdzie:

$(m_{ns})_f$ – masa naważki filtratu po suszeniu próbki,
 $(m_{nm})_f$ – masa naważki filtratu przed suszeniem próbki.

Porowatość graniczną ε_0 i współczynnik podatności porowatości na różnicę ciśnień określono innym równaniem Tillera i Leu [11]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\Delta P}{P_a} \right)^\beta \quad (25)$$

Wilgotność końcową osadu po długim czasie filtracji (obejmującym strefę filtracji klasycznej i kompresji placka) korelowano równaniem eksperymentalnym

$$w_{pl} = \exp A \Delta P^B + C \quad (26)$$

Charakterystyki sedymentacyjne sporządzono w układzie Fousta:

$$\ln \frac{h - h_\infty}{h_0 - h_\infty} = f \cdot t \quad (27)$$

Wszystkie prezentowane jako przykładowe dane pomiarowe i obliczeniowe dotyczą tkaniny importowanej o symbolu 71-2183, którą dobrano w wyniku testu tkanin ([9], [10]).

Określono też zawartość popiołu wraz z solami w wysuszonych próbkach płacka pofiltracyjnego jako

$$\lambda = \frac{m_{\text{po prażraże}}}{m_{\text{przed prażrażen}}} \quad (28)$$

gdzie:

$m_{\text{po prażeniu}}$ – masa naważki po wyprażeniu próbki

$m_{\text{przed prażeniem}}$ – masa naważki suchej przed prażeniem próbki oraz pH zawiesiny.

Wartości λ i pH dla kolejnych oznaczeń były bardzo zbliżone. Wreszcie badano też skład ziarnowy zawiesin bez i z flokulantami na analizatorze ziarnowym Analysette-22 firmy FRITSCH w zakresie $0,10 \div 1227\mu\text{m}$.

W tabeli 1 zamieszczono przykładowo pełne zestawienia danych dla dostawy I zawiesiny świeżej, zaś na rysunku 1 charakterystyki doświadczalne odpowiadające danym tabeli 1.

Dla pozostałych zawiesin bez i z dodatkiem flokulantów przebieg charakterystyk jest podobny.

Na podstawie danych tabeli 1 sporządzono zależność $K' = f(\Delta P)$, którą pokazano na rysunku 2, natomiast na podstawie wartości w_k i w_k^* – zależności $w_k = f(\Delta P)$, $w_k^* = f(\Delta P)$ (rysunki 3 i 4).

Jak widać, przebiegi dwu ostatnich wykresów są bardzo zbliżone, co jest zresztą oczywiste ze względu na bardzo małe ilości soli w filtracji. Również przebiegi funkcji w_k , $w_k^* = f(\Delta P)$ dla innych zawiesin są bardzo podobne.

Na kolejnym rysunku 5 przedstawiono zależność $\varepsilon = f(\Delta P)$, na podstawie której wyznaczono ε_0 i β , a na rysunku 6 zależność $\alpha = f(\Delta P)$ zgodnie z równaniem (11).

Dla pozostałych zawiesin bez i z dodatkiem flokulantów przebieg charakterystyk jest podobny.

Na podstawie danych tabeli 1 sporządzono zależność $K' = f(\Delta P)$, którą pokazano na rysunku 2, natomiast na podstawie wartości w_k i w_k^* – zależności $w_k = f(\Delta P)$, $w_k^* = f(\Delta P)$ (rysunki 3 i 4).

Tabela 1. Zestawienie wyników doświadczalnych filtracji ciśnieniowej zawiesiny świeżej dostawy I

($u_z = 0,0441$, $\rho_z = 1012,3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_f = 1000,1 \text{ kg/m}^3$, $u_s = 0,0036$, $\text{pH} = 7,86$)

Table 1. Pressure filtration results for fresh suspension of supply I

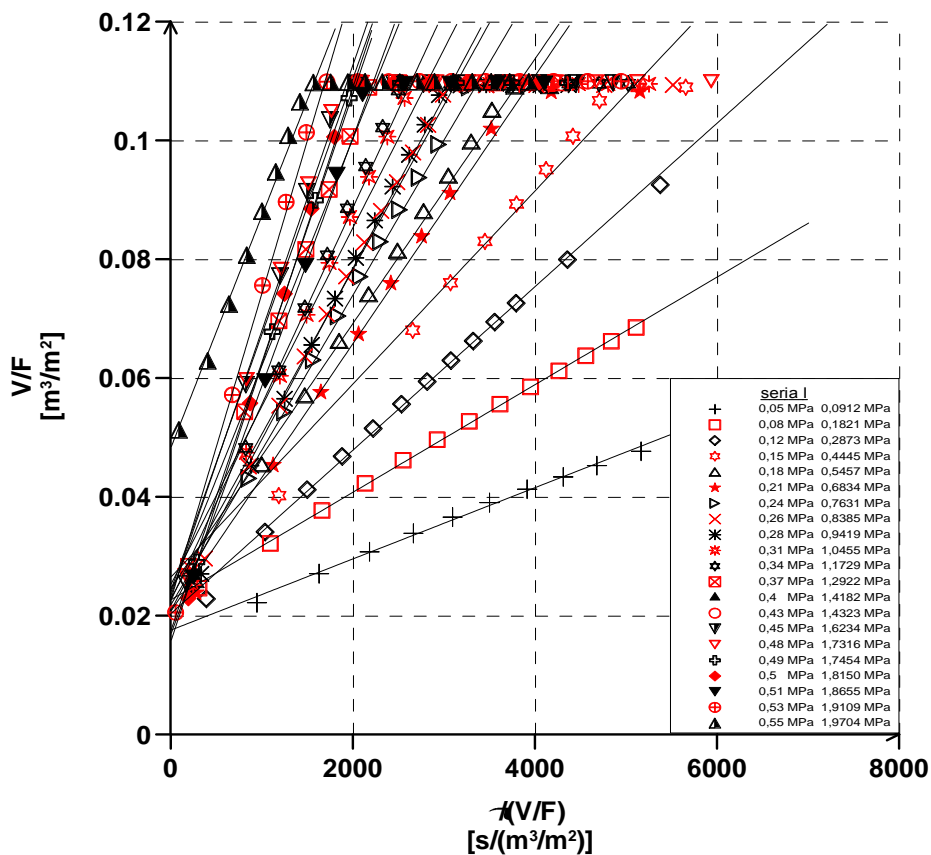
L.p.	Ciśnienie filtracji odczytana z manom. ΔP [MPa]	Ciśnienie filtracji ΔP [MPa]	Wilgotność końcowa osadu w_k [kg H ₂ O/kg]	Wilgotność końcowa osadu w_k^* [kg H ₂ O/kg]	Udział masowy ciała stałego w placku u_{pl} [kg/kg]	Udział masowy ciała stałego w placku u_{pl}^* [kg/kg]	Grubość placka filtracyjnego [m]	Stała filtracji $K \cdot 10^5$ [m ² /s]	Stała filtracji $K \cdot 10^3$ [kg/ms]	Stała filtracji $C \cdot 10^3$ [m ³ /m ²]
1	0,05	0,0912	0,4586	0,4593	0,5414	0,5398	0,00572	0,4995	0,2229	20,7982
2	0,08	0,1821	0,4314	0,4321	0,5685	0,5670	0,00570	0,9000	0,4016	22,9060
3	0,12	0,2873	0,3999	0,3999	0,6201	0,6187	0,00567	1,3460	0,6006	21,0639
4	0,15	0,4441	0,3691	0,3695	0,6309	0,6296	0,00565	1,7198	0,7674	23,3734
5	0,18	0,5457	0,3648	0,3653	0,6352	0,6339	0,00559	2,2302	0,9952	24,6748
6	0,21	0,6834	0,3528	0,3533	0,6471	0,6458	0,00557	2,2935	1,0234	20,0898
7	0,24	0,7631	0,3561	0,3566	0,6438	0,6425	0,00552	2,6802	1,1960	20,7580
8	0,26	0,8385	0,3491	0,3494	0,6510	0,6497	0,00551	2,7973	1,2483	22,4350
9	0,28	0,9419	0,3502	0,3507	0,6497	0,6485	0,00549	2,9534	1,3179	19,8212
10	0,31	1,0455	0,3421	0,3425	0,6579	0,6566	0,00545	3,0354	1,3545	24,7622

*zawartość ciała stałego bez rozpuszczonych soli

Tabela 1. cd. Zestawienie wyników doświadczalnych filtracji ciśnieniowej zawiesiny świeżej dostawy I $(u_z = 0,0441, \rho_z = 1012,3 \text{ kg/m}^3, \rho_f = 1000,1 \text{ kg/m}^3, u_s = 0,0036, \text{pH} = 7,86)$ **Table 1. cont.** Pressure filtration results for fresh suspension of supply I

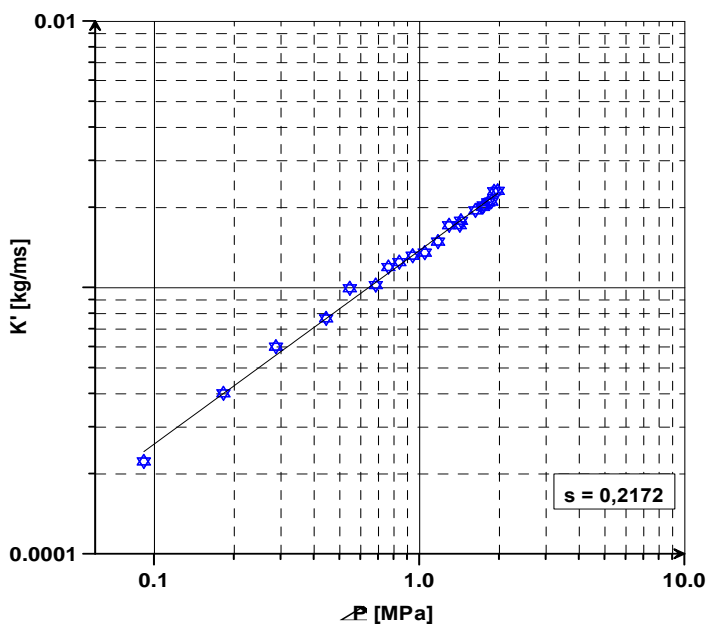
L.p.	Ciśnienie filtracji odczytana z manom. ΔP [MPa]	Ciśnienie filtracji ΔP [MPa]	Wilgotność końcowa osadu w_k [kg H ₂ O/kg]	Wilgotność końcowa osadu w_k^* [kg H ₂ O/kg]	Udział masowy ciała stałego w placku u_{pl} [kg/kg]	Udział masowy ciała stałego w placku u_{pl}^* [kg/kg]	Grubość placka filtracyjnego [m]	Stała filtracji $K \cdot 10^5$ [m ² /s]	Stała filtracji $K \cdot 10^3$ [kg/ms]	Stała filtracji $C \cdot 10^3$ [m ³ /m ²]
11	0,34	1,1729	0,3431	0,343	0,6570	0,6557	0,00543	3,3368	1,4890	22,1970
12	0,37	1,2922	0,3402	0,3407	0,6597	0,6585	0,00541	3,8460	1,7162	23,7306
13	0,40	1,4182	0,3382	0,3386	0,6718	0,6705	0,00539	3,8491	1,7176	20,1253
14	0,43	1,4323	0,3341	0,3346	0,6359	0,6345	0,00535	3,9970	1,7837	27,3068
15	0,45	1,6234	0,3327	0,3332	0,6672	0,6660	0,00533	4,3720	1,9510	23,5882
16	0,48	1,7316	0,3356	0,336	0,6644	0,6631	0,00531	4,5053	2,0105	23,0912
17	0,49	1,7454	0,3284	0,3288	0,6715	0,6703	0,00530	4,5618	2,0357	17,1596
18	0,50	1,815	0,3277	0,3281	0,6722	0,6711	0,00529	4,6862	2,0912	17,6416
19	0,51	1,8655	0,3325	0,3329	0,6574	0,6562	0,00526	4,7197	2,1062	20,7535
20	0,53	1,9105	0,3307	0,3311	0,6693	0,6680	0,00524	5,1557	2,3007	23,0366
21	0,55	1,9704	0,326	0,3264	0,6739	0,6727	0,00521	5,1817	2,3123	20,3816

**zawartość ciała stałego bez rozpuszczonych soli*



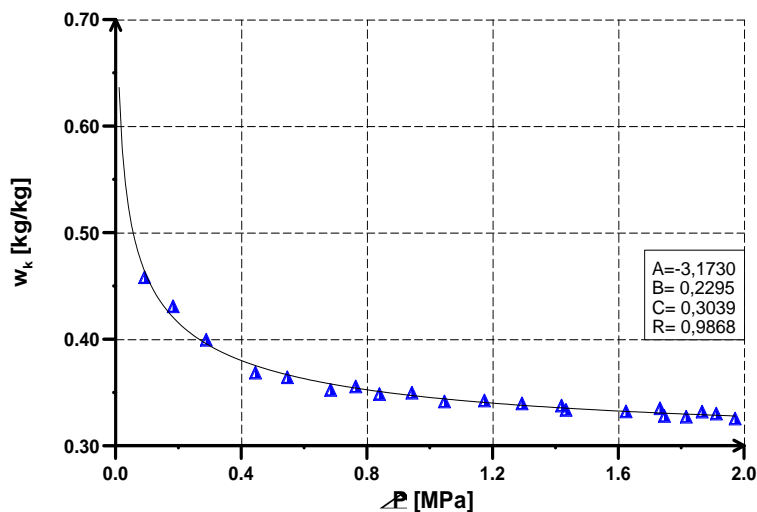
Rys. 1. Pełne charakterystyki filtracji ciśnieniowej flotokonzentratu węglowego dla badanego zakresu ciśnień – dostawa I

Fig. 1. Full characteristics of coal flotation concentrate pressure filtration in the tested pressure range – supply I



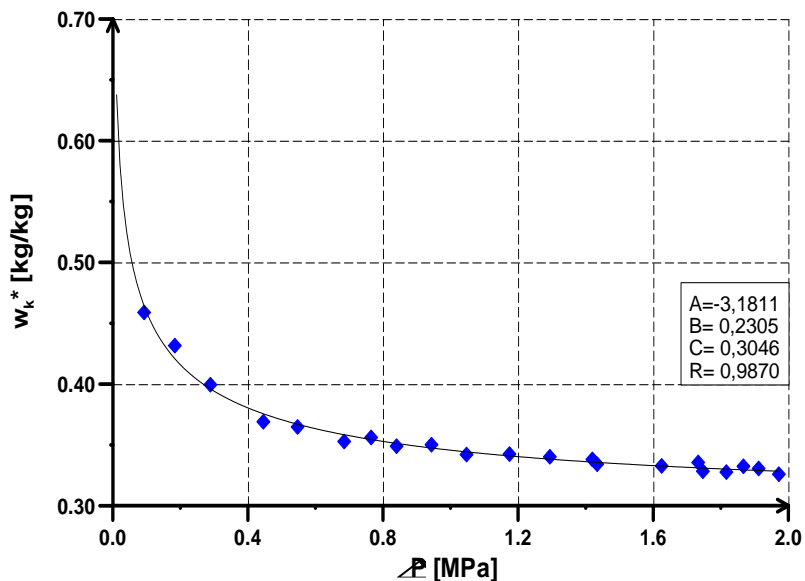
Rys. 2. Zależność $K' = f(\Delta P)$ dla flotokonzentratu węglowego w przebadanym zakresie ciśnień – zgodnie z równaniem Sperry’ego – dostawa I

Fig. 2. Dependence $K' = f(\Delta P)$ for coal flotation concentrate in the tested pressure range – according to Sperry equation – supply I

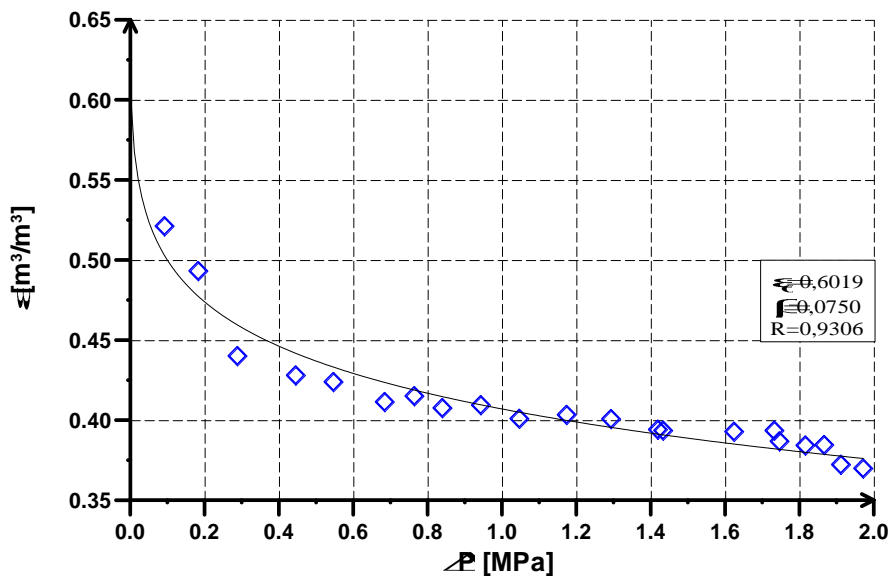


Rys. 3. Zależność $w_k = f(\Delta P)$ dla flotokonzentratu węglowego – dostawa I

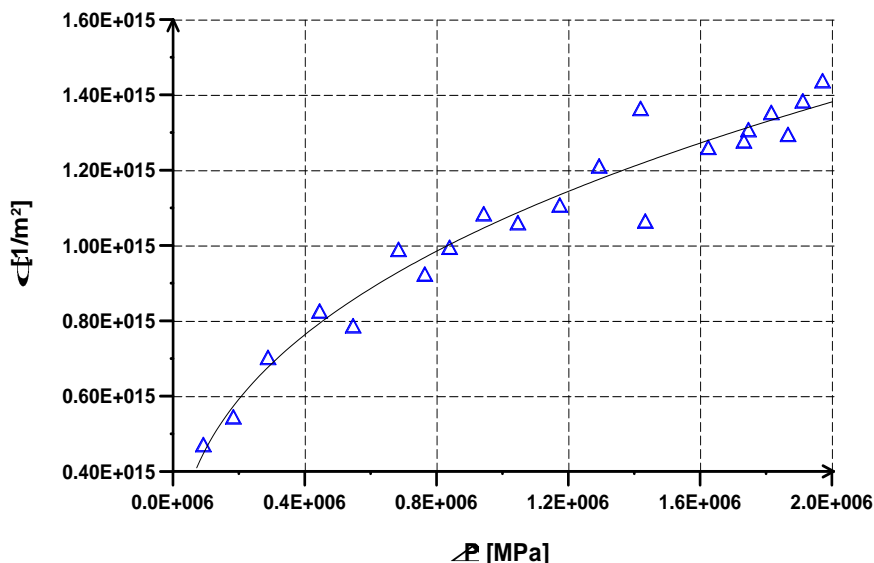
Fig. 3. Dependence $w_k = f(\Delta P)$ for coal flotation concentrate – supply I



Rys. 4. Zależność $w_k^* = f(\Delta P)$ dla flotokonzentratu węglowego – dostawa I
 Fig. 4. Dependence $w_k^* = f(\Delta P)$ for coal flotation concentrate – supply I



Rys. 5. Zależność porowatości od ciśnienia dla flotokonzentratu węglowego – dostawa I
 Fig. 5. Porosity versus pressure for coal flotation concentrate – supply I



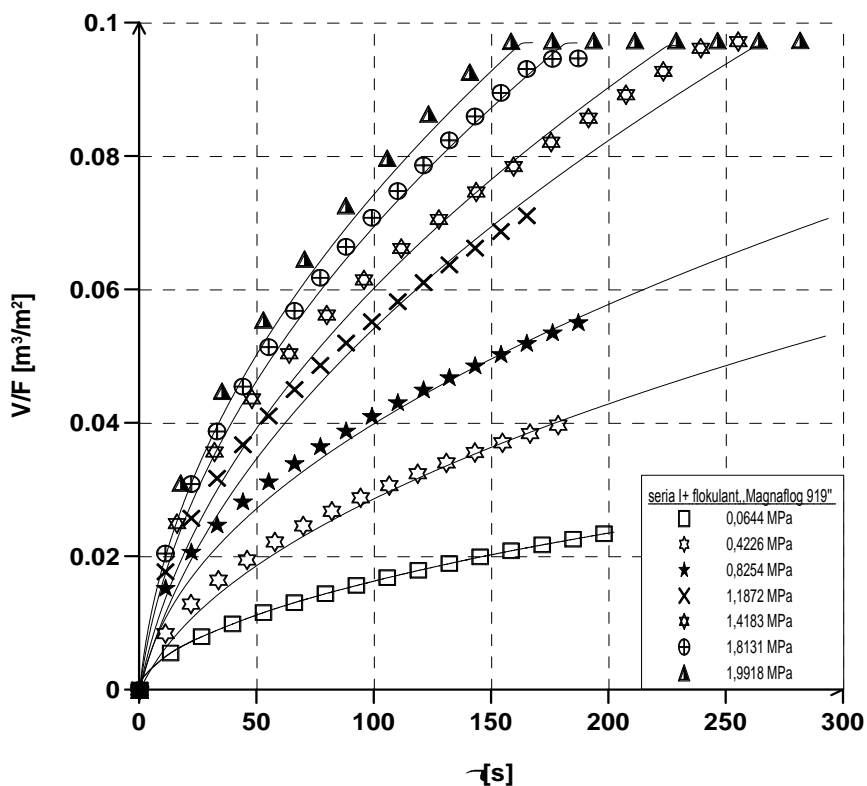
Rys. 6. Zależność oporu właściwego osadu od ciśnienia dla flotokonzentratu węglowego – dostawa I

Fig. 6. Cake specific resistance versus pressure for coal flocculent concentrate – supply I

Wszystkie te dane dotyczą zawiesiny z dostawy I bez dodatku flokulantu. Natomiast na rysunku 7 pokazano porównanie wyników doświadczeń i modelowania dla zawiesiny I z dodatkiem flokulantu Magnaflog 919. Również wykresy tego typu dla pozostałych zawiesin są bardzo podobne.

Modelowanie przeprowadzono na bazie danych doświadczalnych zgodnie z procedurą opisaną w [3], [14] i [15], a pełne dane doświadczalne znajdują się w [9] i [10]. Na ich podstawie w tabelach 2 i 3 podano stałe do obliczenia wilgotności końcowej osadów dla poszczególnych zawiesin bez i z dodatkiem flokulantów, zaś w tabeli 4 porowatości graniczne i współczynnik β korelacji (25). W kolejnej tabeli 5 zamieszczono wybrane dane analiz ziarnowych oraz czasy krytyczne sedimentacji dla poszczególnych zawiesin. Wreszcie w tabeli 6 znajdują się dane związane z oporem przegrody importowanej o symbolu 71-2183 określone w poszczególnych testach dla zawiesiny z dostawy II (świeżej), przy czym wartość R_p obliczono zależnością (17).

W ostatniej z przedstawionych tabel 7 podano, ile wynosiły podczas testów wartości u_z , współczynnik ściśliwości wg Sperry'ego, wartości α_0 obliczone z równania Tillera i Leu oraz wartości α_0 i s określone z modelowania.



Rys. 7. Zależność $V/F = f(\tau)$ uzyskana z modelowania dla flotokonzentratu węglowego – dostawa I z dodatkiem flokulantu „Magnaflog 919”

Fig. 7. Dependence $V/F = f(\tau)$ obtained from modeling for coal flocculent – supply I with the addition of „Magnaflog 919” flocculant

Tabela 2. Stałe do obliczenia wilgotności końcowej osadów po filtracji ciśnieniowej prowadzonej do uzyskania strefy stabilnej odwodnienia (numery odpowiadają oznaczeniu flokulantu Magnaflog, n – ilość testów)

Table 2. Constants necessary for calculation of cake final moisture content after pressure filtration leading to the stable dewatering zone (numbers refer to the type of Magnaflog, n – number of tests)

$$w_{pl} = \exp A(\Delta P)^S + C$$

Zawiesina	A	B	C	R	n
I	-3,1730	0,2295	0,3039	0,9868	21
I+336	-4,6017	0,3087	0,3269	0,9721	16
I+333	-0,3807	0,0884	-0,3444	0,9803	15
I+156	-0,3736	0,0933	-0,3383	0,9396	15
I+919	-2,8752	0,1577	0,2893	0,9326	17
II	-0,3749	0,0989	-0,3394	0,9470	16
II+336	-0,3743	0,1098	-0,3388	0,9825	15
II+333	-0,3651	0,0833	-0,3316	0,9013	15
II+156	-0,3684	0,1072	-0,3345	0,8937	15
II+919	-0,3681	0,1110	-0,3340	0,9507	14

Tabela 3. Stałe do obliczenia wilgotności końcowej osadów skorygowanej, po filtracji ciśnieniowej prowadzonej do uzyskania strefy stabilnej odwodnienia (numery odpowiadają oznaczeniu flokulantu Magnaflog, n – ilość testów)

Table 3. Constants necessary for calculation of the corrected cake final moisture content after pressure filtration leading to the stable dewatering zone (numbers refer to the type of Magnaflog, n – number of tests)

$$w_k^* = \exp A(\Delta P)^B + C$$

Zawiesina	A	B	C	R	n
I	-3,1810	0,2305	0,3046	0,9870	21
I+336	-4,7650	0,3208	0,3293	0,9616	16
I+333	-0,3804	0,0887	-0,3442	0,9803	15
I+156	-0,3733	0,0936	-0,3381	0,9397	15
I+919	-2,8749	0,1581	0,2897	0,9327	17
II	-0,3748	0,0990	-0,3392	0,9470	16
II+336	-0,3739	0,1102	-0,3385	0,9825	15
II+333	-0,3648	0,0836	-0,3313	0,9012	15
II+156	-0,3680	0,1075	-0,3342	0,8938	15
II+919	-0,3677	0,1114	-0,3337	0,9507	14

Tabela 4. Porowatość graniczna ε_0 i współczynnik β podatności porowatości na ΔP dla poszczególnych zawiesin

Table 4. Limit porosity ε_0 and coefficient β determining susceptibility of porosity to ΔP for individual suspensions

Zawiesina	ε_0	β	R	n
I	0,6019	0,0750	0,9306	21
I+336	0,5545	0,0571	0,9113	16
I+333	0,5283	0,0419	0,9792	15
I+156	0,4988	0,0389	0,9508	15
I+919	0,5818	0,0642	0,9626	17
II	0,6195	0,0582	0,9583	16
II+336	0,5729	0,0734	0,9343	15
II+333	0,5222	0,0415	0,9901	15
II+156	0,5256	0,0487	0,9623	15
II+919	0,5407	0,0520	0,9756	14

Tabela 5. Wybrane dane analiz ziarnowych oraz czasy krytyczne sedimentacji τ_{kr} [godz]

Table 5. Selected data of PSD and sedimentation critical times τ_{kr} [hr]

Zawiesina	d_{arytm} [μm]	%d<1 μm	%d<5 μm	%d<10 μm	%d<20 μm	τ_{kr} [godz]
I	6,137	5,21	45,51	83,04	99,87	70
I+336	4,214	11,83	75,24	98,57	99,78	68
I+333	7,936	4,87	41,74	70,06	94,21	70
I+156	7,564	4,53	39,78	71,79	96,80	65
I+919	8,695	4,66	40,59	68,71	94,05	70
II	9,385	4,75	26,88	54,18	96,28	46
II+336	9,017	3,45	31,83	61,41	94,01	30
II+333	8,602	3,18	25,16	63,75	98,33	28
II+156	5,326	5,63	48,60	92,35	100,00	50
II+919	6,960	4,89	39,07	75,92	99,28	30

Tabela 6. Opór przegrody importowanej 71-2183 w funkcji różnicy ciśnień – dostawa II (świeża)

Table 6. Resistance of the imported filter medium type 71-2183 versus pressure drop – supply II (fresh)

L.p.	ΔP [MPa]	$R_p \cdot 10^{-12}$ [1/m]	L.p.	ΔP [MPa]	$R_p \cdot 10^{-12}$ [1/m]
1	0,0882	0,2275	9	0,9886	0,3861
2	0,1473	0,2689	10	1,0708	0,3461
3	0,2406	0,2571	11	1,1896	0,4477
4	0,2964	0,2543	12	1,3322	0,4112
5	0,4576	0,2146	13	1,7607	0,4331
6	0,5938	0,3178	14	1,8609	0,6470
7	0,7158	0,3426	15	1,9665	0,5401
8	0,8466	0,2890	16	1,9682	0,5110

$$(R_p)_{sr} = 0,368 \cdot 10^{12} \text{ [1/m]}$$

Tabela 7. Współczynniki ścisłości osadu s wg Sperry’ego i określone z modelowania s_{mod} oraz przepuszczalność osadu graniczna i wynikająca z modelowania

Table 7. Cake compressibility coefficient s , according to Sperry and determined in the modelling s_{mod} ; limit cake permeability and determined in the modelling

Zawiesina	s	s_{mod}	$\alpha_{mod} \cdot 10^{-14}$ [1/m ²]	$(\alpha_0)_{mod} \cdot 10^{-14}$ [1/m ²]	u_z
I	0,2172	0,7837	1,5080	0,9176	0,0441
I+336	0,2230	0,5730	3,7070	5,7940	0,0440
I+333	0,2287	–	1,1810	–	0,0455
I+156	0,2204	0,2339	1,8810	0,9447	0,0678
I+919	0,2237	0,3803	2,6104	2,3581	0,0215
II	0,2304	–	2,0100	–	0,0184
II+336	0,2187	0,3204	1,7250	1,7133	0,0369
II+333	0,2215	0,3498	1,0420	0,7998	0,0378
II+156	0,2236	–	1,5690	–	0,0437
II+919	0,2285	–	0,7710	–	0,0423

4. Omówienie wyników badań

Dane pomiarowe i obliczeniowe, zebrane dla 6 zawiesin wskazują, że filtracja ciśnieniowa zachodzi zgodnie z modelem filtracji osadowej, przy czym dane te wystarczają do modelowania odwadniania. Można sądzić, że dla pozostałych 4 zawiesin, dla których takiego modelowania nie przeliczono, jest to również możliwe. Dysponując parametrami filtracyjnymi i modelem przebiegu procesu w oparciu o doświadczalne przebiegi filtracji uzyskano w pełnym zakresie zmienności ΔP bardzo dobrą zgodność danych doświadczalnych i modelowych. Oznacza to, że można przewidzieć nie tylko jednostkową ilość filtratu V/F dla dowolnego ΔP i τ , ale również końcową wilgotność osadu po strefie jego kompresji. Pozwala to przyjąć te wartości jako wskaźniki przy doborze filtru w dużej skali. Dane te jednoznacznie wskazują, że pomimo bardzo drobnego uziarnienia zawiesin zrzutowych taka filtracja jest możliwa. Natomiast w wypadku bardzo dużych strumieni zawiesiny zrzutowej przy niskiej koncentracji ciała stałego niezbędne są etapy pośrednie odwodnienia, m.in. zagęszczanie zawiesiny zrzutowej w odstojniku i dodanie do niej flokulantu. Można by wówczas rozważyć, czy taki zagęszczony szlam mógłby być dodawany do flotokonzentratu przed wirówkami BIRDa, czy separowany oddzielnie w dodatkowym węźle. Badania zawartości popiołu w wysuszonym cieple stałym (wraz z zawartością soli) wykazały bowiem około 18,4% ciała stałego po wyprażeniu, co oznacza około 81,6% węgla w badanych próbkach. Biorąc po uwagę koncentrację ciała stałego w zawieszynie zrzutowej równą około 4% i strumienie zawiesiny zrzutowej rzędu 300 Mg/godz oznacza to odzyskanie około $300 \cdot 0,04 \cdot 0,816 = 9,8$ Mg/godz samego węgla. Jeśli placek pofiltracyjny ma wilgotność około 35%, to strumień wilgotnego ciała stałego (wraz z popiołem) wynosi $\frac{300 \cdot 0,04}{1 - 0,35}$ Mg/godz i taki osad wilgotny musiałby być suszony do stopnia

wilgotności żądanego przez odbiorców. Przyjmując, że gdyby wilgotność ta wynosiła 10%, bezpowrotnie traconoby jedynie $18,5(0,35 - 0,10) = 4,625$ Mg/godz wody, zaś cała reszta mogłaby zostać zawrócona do obiegu.

Analizując tabelę 1 i rysunek 1 widać, że zmodyfikowane stałe filtracji K' dla określonych ΔP są zbliżone do wartości opisanych w [16] dla flotokonzentratu pochodzącego z jednej z kopalń Rudzkiej Spółki Węglowej z dodatkiem flokulantu Magnaflog, przy czym flokulant ten dodawany był na kopalni. Dane niniejszej pracy dotyczą zawiesiny pochodzącej z jednej z Jastrzębskiej Spółki Węglowej, a flokulanty dodawano po procesach przerobczych (przed badaniami).

Kolejną ciekawą informacją wynikającą z tabeli 1 jest bardzo mała zmienność stałej C , wskazująca na zbliżone opory tkaniny oraz nieznacznie malejącą wartość grubości osadu z ciśnieniem, co przekłada się na stosunkowo

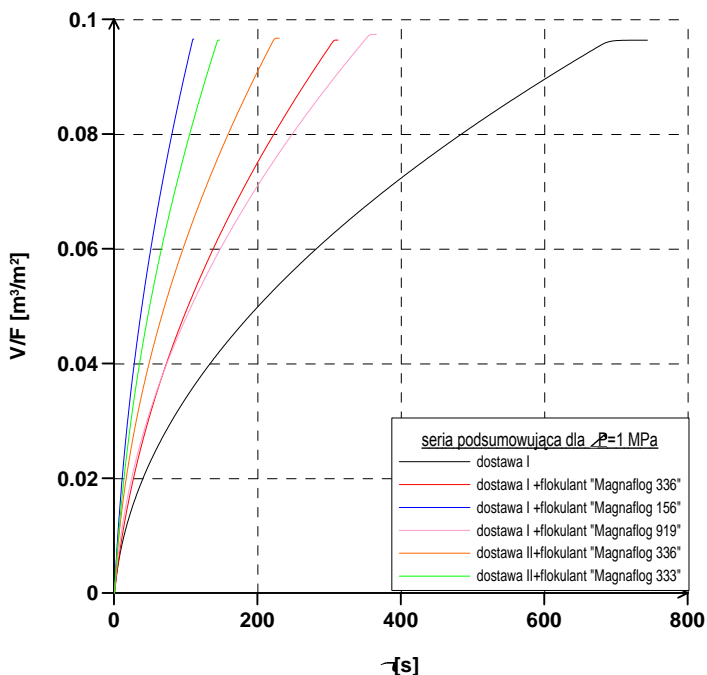
niską ściśliwość osadu wg Sperry'ego. Podobne zachowanie wykazują wszystkie przebadane zawiesiny. Na podstawie rysunku 2 wyznaczono dla zawiesiny I świeżej $s = 0,2172$ wg (10). Wilgotności końcowe po długim czasie odwodnienia bez korekty i z korektą na zawartość soli w funkcji ciśnienia pokazano na przykładowych wykresach rysunków 3 i 4, zaś liczbowe współczynniki służące do obliczenia w_k i w_k^* dla wszystkich przebadanych zawiesin zamieszczono w tabelach 2 i 3. Analiza tych danych wykazuje, że najgłębsze odwodnienie (około 35% wilgoci) uzyskuje się dla najwyższych ciśnień, ale różnice dla poszczególnych układów są niewielkie. Nieco większe różnice obserwowano w poszczególnych seriach dla ε_0 i β , głównie ze względu na różny udział masy ciała stałego w zawiesinach poddanych badaniom. Przykładowy przebieg funkcji $\varepsilon = f(\Delta P)$ dla zawiesiny świeżej z dostawy I pokazano na rysunku 5. Współczynniki ε_0 i β dla wszystkich zawiesin zestawiono w tabeli 4, zaś w tabeli 5 dane z analiz ziarnowych i sedymentacyjnych. Na podstawie tej ostatniej tabeli widać pewien związek między składem ziarnowym a czasem krytycznym sedymentacji. Otóż zawiesiny bezpośrednio po dostawie mają mniejszą średnią średnicę arytmetyczną (większą ilość drobnych ziaren) niż zawiesiny poddane analizie po kilku miesiącach deponowania lub z dodatkiem flokulantu, a przekłada się to na dłuższy czas krytyczny sedymentacji zawiesin o drobniejszym uziarnieniu. Na rysunku 6. pokazano zależność (11), a w tabeli 7 porównanie s i α_0 z doświadczeń i z modelowania. W tabeli 6 zamieszczono rezultaty przeliczeń oporu przegrody R_p dla różnych ciśnień procesowych. Gdyby z tabeli tej wyłączyć punkt 14 wyraźnie odstający od pozostałych, to zachowana byłaby tendencja, że ze wzrostem ΔP rośnie R_p . Jest to zgodne z założeniami teorii filtracji, na podstawie, której wyprowadza się równanie (1), w którym przyjmuje się, że opór przegrody zmienia się podobnie, jak opór osadu.

Rysunek 7 dla przykładowej zawiesiny z dostawy I z dodatkiem flokulantu Magnaflog 919 wskazuje na dobrą zgodność charakterystyk filtracji obliczeniowych i doświadczalnych. Najciekawszy jest jednak rysunek 8, na którym porównano dla umownego ciśnienia $\Delta P = 1$ MPa przebiegi odwodnienia zawiesin, dla których wyznaczono modelowe równania służące do wyznaczenia funkcji

$$V/F = f(\tau) \quad (2a)$$

Na podstawie tego wykresu można dla określonego czasu τ , np.100s stwierdzić, że dodanie flokulantu Magnaflog 156 do zawiesiny I prowadzi do uzyskania w tym samym czasie ponad 2,8 razy więcej filtratu niż w wypadku filtrowania zawiesiny I bez flokulantu. Pozwala to pośrednio na ocenę przydatności flokulantów różnego typu dla określonej zawiesiny, a więc stanowi praktyczną realizację postulatu zmiany składu ziarnowego w celu przyspieszenia filtracji. Należy tu jednak zaznaczyć, że takiej oceny można dokonać tylko dysponując równaniami modelowymi, a więc dla zawiesiny świeżej I, z dodatkami Magnaflog 336, 156 i 919 oraz dla zawiesiny II z dodatkiem Magnaflog 336 i 333.

Na zakończenie omówienia wyników badań można dodać, że podjęto również próbę wyznaczenia dla funkcji (11), (25) i (26) współczynników liczbowych w oparciu o cały materiał doświadczalny, ale uzyskano wówczas zdecydowanie niższe R. Potwierdza to tezę, że każdą zawiesinę należy traktować odrębnie, zwłaszcza ze względu na skład ziarnowy.



Rys. 8. Zestawienie zależności $V/F = f(\tau)$ uzyskanych z modelowania dla różnych dostaw flotokonzentratu węglowego z dodatkami flokulantów „Magnaflog”

Fig. 8. Set of dependencies $V/F = f(\tau)$ obtained in the modelling for different supplies of coal flotoconcentrate with the addition of „Magnaflog”

5. Wnioski i podsumowanie

Podstawową konkluzją z badań jest stwierdzenie, że zawiesinę zrzutową flotokonzentratu po wirówkach BIRDa można separować na drodze mechanicznej, np. przy użyciu filtracji ciśnieniowej i odzyskiwać z niej ciało stałe (węgiel) o zawartości popiołu około 18,4%. Ponieważ uzyskane placki pofiltracyjne przy najwyższych ciśnieniach filtracji (około 2 MPa) i długich czasach filtrowania miały w najlepszym wypadku ponad 33% wilgoci, osady te należy dosuszać. Zastosowanie tkaniny importowanej 71-2183 gwarantuje praktycznie czysty filtrat, który można zawracać do obiegu technologicznego. Ze względu

na bardzo duże strumienie zawiesiny zrzutowej wskazane jest zastosowanie odstojnika dla tej zawiesiny, do którego należałoby dodać flokulant Magnaflog 156 w ilości 0,1% w formie żelu, czyli około 0,4 g suchego flokulantu / 1 Mg zawiesiny. Wskaźnik ten odpowiada zaleceniu firmy CIBA dla zawiesin floto-koncentratu o stężeniu około 4% mas.. Ciecz klarowną można by wówczas zawracać z odstojnika do obiegu, natomiast szlam z odstojnika należałoby albo poddawać wirowaniu (w zdecydowanie mniejszej ilości), albo dołączyć do strumienia flotokoncentratu kierowanego do wirówek BIRDa. Rozwiązaniem doraźnym mogłoby być wykorzystanie pras filtracyjnych do odwadniania szlamu z odstojnika. O zastosowaniu konkretnego rozwiązania winien zdecydować rachunek ekonomiczny, ale wydaje się, że te ostatnie dwie propozycje są technicznie najbardziej atrakcyjne, choć wymagałyby potwierdzenia w badaniach laboratoryjnych.

Literatura

1. **Palica M.:** *Filtrowalność flotokoncentratów węgla kamiennego pochodzących z różnych źródeł*. Karbo-Energochemia-Ekologia, w druku.
2. **Żużikow W. A.:** *Filtracja, teoria i praktyka rozdzielania zawiesin*. (tłum. z j. ros.), WNT, Warszawa 1985.
3. **Palica M., Kocurek J.:** *Wybrane zagadnienia teorii filtracji i kompresji osadów*. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2001;
4. Ciba Speciality Chemicals: Zetag i Magnaflog. Polielektrolity do ścieków komunalnych oraz przemysłowych, informacja internetowa, 2006
5. **Gierczycki A.:** Informacja na podstawie pracy habilitacyjnej *Powstawanie i rozpad agregatów ciała stałego zawieszzonego w cieczy*. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2005.
6. **Palica M.:** *Mechanical dewatering of the flotation concentrate of coking coal*. Chemical Engineering and Processing, 1994, nr 33, s.141.
7. **Palica M., Kocurek J.:** *Rozdzielanie zawiesin ciał stałych w cieczach na drodze filtracji z kompresją osadu*. Rocznik Ochr. Środ., 4. Koszalin 2002.
8. **Palica M., Chmiel K.:** Karbo, 2003 nr 2, s. 103.
9. **Grotek A.:** Kat. Inż. Chem. i Proc. Pol. Śl., praca dyplomowa magisterska (do użytku wewnętrznego), Gliwice 2006.
10. **Gruca M.:** Kat. Inż. Chem. i Proc. Pol. Śl., praca dyplomowa magisterska (do użytku wewnętrznego), Gliwice 2006.
11. **Tiller F. M., Leu W. F.:** J. Chinese Ins. Chem. Eng., 1980, nr 11, s. 61.
12. **Sørensen P.B., Moldrup P., Hansen J.:** Chem. Eng. Sci., 1996, nr 51, s. 967.
13. **Bandrowski J., Merta H., Ziolo J.:** *Sedymentacja zawiesin. Zasady i projektowanie*. Wyd. II, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2004.
14. **Palica M., Thullie J., Kocurek J., Zacharski G.:** Inż. Chem. Proc., 2004, nr 25, s. 1443.
15. **Kocurek J., Palica M.:** Inż. Ap. Chem., 2003, nr 1, s.16.
16. **Malirz D., Kocurek J., Palica M.:** Karbo-Energochemia, Ekologia, 2006, nr 1, s. 39.

Spis symboli i oznaczeń

- A, B, C – stałe równania (26)
– constans in Eq. (26)
- C – stała filtracji [m]
– filtration constant [m]
- C_A – koncentracja masowa ciała stałego w zawieszynie [kg/m³]
– mass concentration of solid phase in suspension [kg/m³]
- F – powierzchnia filtru [m²]
– filtration area [m²]
- K – stała filtracji w równaniu (1) [m²/s]
– filtration constant in Eq. (1) [m²/s]
- K' – zmodyfikowana stała filtracji [kg/(m·s)]
– modified filtration constant [kg/(m·s)]
- P – ciśnienie [Pa], [MPa]
– pressure [Pa], [MPa]
- P_a – współczynnik skali [MPa]
– scale factor [MPa]
- ΔP – ciśnienie filtracji [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]
- h – wysokość granicy mętności podczas sedymentacji [m]
– height of the turbidity limit during sedimentation [m]
- h₀ – początkowa wysokość zawiesiny podczas sedymentacji [m]
– initial height of suspension during sedimentation [m]
- h_∞ – wysokość granicy mętności po długim czasie [m]
– height of the turbidity limit after a long period of time [m]
- r. – zastępcze obciążenie przegrody osadem [m²/kg]
– equivalent amount of cake on the filter medium [m²/kg]
- s – współczynnik ściśliwości osadu
– cake compressibility coefficient
- u – udział masowy ciała stałego (w placku lub zawieszynie) [kg/kg]
– mass concentration of solid phase (in cake or suspension) [kg/kg]
- w – wilgotność osadu [kg/kg]
– cake moisture content [kg/kg]
- z – stosunek objętości osadu do objętości filtratu [m³/m³]
– ratio of cake to filtrate volume [m³/m³]
- α – objętościowy opór właściwy osadu [1/m²]
– volume specific resistance of the cake [1/m²]
- α₀ – współczynnik proporcjonalności w zależności (11) [1/m²]
– proportionality coefficient in Eq. (11) [1/m²]
- α_m – masowy opór właściwy osadu [m/kg]

α'_m	– mass specific resistance of the cake [m/kg] – współczynnik proporcjonalności w zależności (5)
	– proportionality coefficient in Eq. (5)
α_v	– przepuszczalność osadu [$1/m^2$] – cake permeability [$1/m^2$]
α'_v	– współczynnik proporcjonalności w zależności (6) – proportionality coefficient in Eq. (6)
β	– współczynnik podatności porowatości osadu na ciśnienie – coefficient of susceptibility of cake porosity to overpressure
ε	– porowatość osadu [m^3/m^3] – cake porosity [m^3/m^3]
λ	– zawartość popiołu [%] – ash content [%]
η	– dynamiczny współczynnik lepkości fazy ciekłej [Pa·s] – liquid dynamic viscosity [Pa·s]
ρ	– gęstość [kg/m^3] – density [kg/m^3]
τ	– czas (filtracji lub sedymentacji) [s], [min], [godz] – time (of filtration or sedimentation) [s], [min], [godz]

Indeksy

a	– dotyczy współczynnika skali/refers to scale coefficient
f	– odnosi się do filtratu/refers to filtrate
m	– oznacza masowy/refers to mass
0	– odnosi się do wartości granicznej lub początkowej/refers to limit or initial value
pl	– dotyczy placka/refers to filtration cake
s	– dotyczy soli lub ciała stałego/refers to salt or solid phase
v	– oznacza objętościowy/refers to volume
z	– dotyczy zawiesiny/refers to suspension