

Rozdzielanie zawiesin ciał stałych w cieczach na drodze filtracji z kompresją tworzonego osadu

II. Wyznaczanie parametrów filtracyjnych zawiesin oraz doświadczalna weryfikacja modelu

Jacek Kocurek, Michał Palica
Politechnika Śląska w Gliwicach

1. Wyznaczenie parametrów i określenie warunków umożliwiających przeprowadzenie stabilnej symulacji komputerowej

Poprawne przeprowadzenie komputerowej symulacji procesu rozdziału zawiesiny na drodze filtracji i kompresji osadu przy użyciu opisanego w części pierwszej modelu wymaga znajomości jej właściwości fizykochemicznych i parametrów filtracyjnych oraz doboru odpowiednich wartości kroku czasu $\Delta\tau$ i długości $\Delta\omega$.

Właściwości filtracyjne zawiesiny to przede wszystkim opór właściwy utworzonego z niej osadu przy ciśnieniu 0 [Pa] – α_0 , współczynnik oporu przegrody R_p oraz współczynnik ściśliwości osadu – s . Przebieg procesu zależy także silnie od porowatości osadu przy ciśnieniu 0 [Pa] – ε_0 oraz współczynnika określającego podatność porowatości na ciśnienie – β . Istotnym parametrem jest wreszcie przestrzeń swobodna zawiesiny – e_z . Wszystkie wyżej wymienione parametry można wyznaczyć dla danej zawiesiny jedynie na podstawie doświadczeń.

Przestrzeń swobodną zawiesiny e_z można ustalić w oparciu o wzór definicyjny oraz znajomość parametrów fizykochemicznych zawiesiny: masowego udziału ciała stałego w_z , gęstości zawiesiny ρ_z oraz gęstości cieczy ρ_c . Wychodząc z równania:

$$e_z = \frac{V_c}{V_s} = \frac{\frac{m_c}{\rho_c}}{\frac{m_s}{\rho_s}} \quad (1.1)$$

gdzie V_c – to całkowita objętość cieczy, a V_s – to całkowita objętość ciała stałego w poddawanym rozdziałowi ładunku zawiesiny; m_c i m_s to odpowiednie masy. Po podzieleniu licznika i mianownika przez masę zawiesiny m_z oraz stosując zależność pozwalającą obliczyć gęstość zawiesiny w oparciu o udział masowy ciała stałego w_z oraz jego gęstość ρ_s i gęstość ośrodka ρ_c :

$$\rho_z = \frac{1}{\frac{w_z}{\rho_s} + \frac{1-w_z}{\rho_c}} \quad (1.2)$$

można równanie 1.1 przekształcić do postaci:

$$e_z = \frac{1-w_z}{\frac{\rho_c}{\rho_z} + w_z - 1} \quad (1.3)$$

Zawartość ciała stałego w_z wyznaczano przez suszenie próbki zawiesiny w temperaturze 105°C do stałej masy.

W oparciu o gęstość ciała stałego oraz jego udział masowy w zawiesinie wyznacza się całkowitą grubość ładunku urządzenia testowego wyrażoną we współrzędnych materiałowych – $\omega_{cal.}$. Zgodnie z definicją jest to stosunek całkowitej objętości ciała stałego do powierzchni filtru:

$$\omega_{cal.} = \frac{V_{s.cal.}}{F} \quad (1.4)$$

Korzystając ze związku pomiędzy objętością a gęstością oraz z definicji udziału masowego i równania (1.2) wiążącego gęstości otrzymuje się wyrażenie pozwalające wyliczyć $\omega_{cal.}$:

$$\omega_{cal.} = l \cdot \left(1 - \frac{\rho_z}{\rho_c} (1 - w_z) \right) \quad (1.5)$$

gdzie l to skok tłoka w cylindrze filtru ciśnieniowego, czyli grubość ładunku zawiesziny.

Pozostałe właściwości zawiesziny konieczne do przeprowadzenia komputerowej symulacji procesu można wyznaczyć jedynie na drodze testów filtracyjnych.

Porowatość graniczną ε_0 oraz współczynnik β wyznaczano przez badanie wilgotności osadów pofiltracyjnych otrzymywanych w testach na laboratoryjnym filtrze ciśnieniowym. Zakładając, że po zakończeniu zarówno filtracji jak i kompresji osadu jego struktura jest jednorodna, tzn., że wszystkie jego warstwy mają tę samą porowatość, możliwe jest, na podstawie badania wilgotności tego osadu, wyznaczenie jego porowatości dla danego P_k . Przy braku przepływu filtratu przez osad ciśnienie kompresji jest stałe i wynosi tyle, ile całkowite przyłożone ciśnienie P_c . Wychodząc z równania definicyjnego na porowatość osadu:

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V_c + V_s} \quad (1.6)$$

i korzystając z definicji gęstości oraz posługując się udziałem masowym ciała stałego w placku w_{pl} postępując analogicznie jak przy równaniu (1.1) można otrzymać zależność:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_s} \frac{w_{pl}}{1 - w_{pl}}} \quad (1.7)$$

Występującą w równaniu (1.7) gęstość ciała stałego można obliczyć z parametrów zawiesziny i przekształconego równania (1.2). Znakąc ciśnienia, przy jakich otrzymano rozpatrywane placki filtracyjne oraz odpowiadające im porowatości można wyznaczyć zależność $\varepsilon = f(\Delta P)$, tzn. określić ε_0 oraz β z równania (3.7) z cz.1 niniejszego artykułu [1]. Część eksperymentalna opierała się o 7,8 testów filtracyjnych dla różnych ciśnień, co umożliwiała wyznaczenie wartości porowatości osadu ε . Za pomocą programu komputerowego pozwalającego na wyznaczenie 2 parametrów funkcji ustalano ε_0 i β dla danej zawiesziny. W celu

ułatwienia obliczeń wartość współczynnika skali P_a nie podlegała wyrównywaniu i ustalono ją jako równą 5 kPa, tak jak w pracach [2,3].

Wyznaczenie α_0 , R_p oraz s dla danego układu jest najbardziej kłopotliwe i czasochłonne. Podobnie jak w przypadku ε_0 i β , koniecznym jest tu przeprowadzenie testów filtracyjnych i analiza uzyskanych danych. Podczas badań rejestrowana była objętość filtratu odniesiona do powierzchni filtru V/F uzyskana w czasie τ . Ponadto modyfikacja urządzenia badawczego umożliwiła pomiar rzeczywistego ciśnienia panującego nad osadem. Przebieg procesu rejestrowany był za pomocą komputera w formie pliku tekstowego, który w dalszej kolejności poddawano odpowiedniej obróbce.

W pierwszym przybliżeniu parametry filtracyjne wyznaczano w oparciu o bazujące na równaniu Darcy'ego równanie różniczkowe opisujące filtrację z tworzeniem osadu, w którym właściwości filtracyjne osadu traktuje się jako stałe w czasie:

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{P_c}{\alpha_m \eta \left(\frac{V}{F} c_A + r \right)} \quad (1.8)$$

Wartość c_A to ilość kg placka suchego uzyskana przy otrzymaniu 1m^3 filtratu, a r to zastępcze obłożenie plackiem przedstawiające opór przegrody. Wartość c_A jest zależna od koncentracji zawiesiny oraz średniej zawartości cieczy w osadzie. Zdefiniować ją można równaniem:

$$c_A = \frac{m_s}{V_f} \quad (1.9)$$

V_f to objętość filtratu otrzymana na masę m_s placka suchego. Objętość filtratu z objętościami ciała stałego V_s i cieczy V_c zawartymi w placku oraz objętością odfiltrowanej zawiesiny V_z wiąże równanie bilansu:

$$V_z = V_f + V_s + V_c \quad (1.10)$$

Przekształcając równanie (1.6) dla średniej porowatości placka $\bar{\varepsilon}$ tak, by wyliczyć z niego V_c :

$$V_c = \frac{\bar{\varepsilon}}{1 - \bar{\varepsilon}} V_s \quad (1.11)$$

wykorzystując definicję gęstości i udziału masowego ciała stałego w zawieszinie oraz równania (1.10 – 1.11) równanie (1.9) można przekształcić do następującej postaci:

$$c_A = \frac{w_z}{\frac{1}{\rho_z} - \frac{w_z}{\rho_s} \left(\frac{1}{1 - \bar{\varepsilon}} \right)} \quad (1.12)$$

W równaniu (1.8) opór osadu przedstawia tzw. masowy współczynnik oporu osadu α_m [m/kg]. Zgodnie z wyprowadzeniem zamieszczonym w pracy [4] α_m ze współczynnikiem α z równania Darcy'ego zamieszczonym w 1 cz. wiąże następująca zależność:

$$\alpha = \alpha_m \rho_s (1 - \bar{\varepsilon}) \quad (1.13)$$

Zastępcze obłożenie przegrody plackiem r to stosunek oporu przegrody R_p do masowego współczynnika oporów osadu α_m .

Po rozdzieleniu zmiennych, scałkowaniu i odpowiednich przekształceniach otrzymuje się równanie o konstrukcji odpowiadającej równaniu (2.2) zamieszczonemu w części 1 niniejszej pracy [1], wyprowadzonemu przez Rutha [5]:

$$\frac{\tau}{V/F} = K \frac{V}{F} + C \quad (1.14)$$

przy czym stałe K i C mają budowę następującą:

$$K = \frac{2 \cdot P_c}{\alpha_m \cdot \eta \cdot c_A} \quad (1.15)$$

oraz

$$C = -\frac{2R_p}{c_A \alpha_m} \quad (1.16)$$

Równanie (1.14) bywa nazywane klasycznym równaniem filtracji plackowej, a wykresy przedstawiające dane doświadczalne w układzie współrzędnych $\{V/F, \tau(V/F)\}$ układają się w linie proste, tzw. charakterystyki filtracji. Dane doświadczalne z zakresu filtracji z tworzeniem osadu przybliżano równaniem (1.14) i metodą najmniejszych kwadratów odchyłek ustalano wartości stałych K i C dla wszystkich przebadanych ciśnień. Z przekształconego równania (1.15) można wyliczyć masowy opór osadu α_m , a z równania (1.16) opór przegrody R_p dla poszczególnych ciśnień.

Średnią porowatość osadu podczas filtracji $\bar{\varepsilon}$ potrzebną do obliczenia c_A oraz przeliczenia α_m na α zgodnie z równaniem (1.13) szacowano w oparciu o wyznaczone uprzednio parametry β i ε_0 równania (3.7) zamieszczonego w cz. I [1] dla ciśnienia równego 80% ciśnienia całkowitego P_c . Metodę taką obrano ze względu na szacunkowy charakter obliczonej wartości oporu granicznego oraz fakt, że w rzeczywistości dla placków ściśliwych średnia porowatość osadu zmienia się w czasie, gdyż zależy ona od zmieniającej się grubości osadu i rozkładu w nim ciśnienia kompresji:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{l_{pl}} \int_0^{l_{pl}} \varepsilon(x) dx \quad (1.17)$$

Dysponując wartościami α dla różnych ciśnień procesowych można estymować parametry równania (3.6) z cz. I [1] analogicznie jak β oraz ε_0 . Współczynnik skali P_a , tak jak uprzednio, przyjęto równy 5 kPa.

Ze względu na fakt, że w przypadku równania (5.13) z cz. I [1] operuje się uśrednionymi wartościami parametrów filtracyjnych dla całego placka, zastosowanie ich do komputerowego symulowania procesu rozdziału zawieszin za pomocą opisanego w niniejszej pracy modelu warstwowego prowadzi do rozbieżności pomiędzy danymi doświadczalnymi i obliczonymi. Różnice te są tym większe, im większa jest koncentracja ciała stałego w mieszaninie i podatność osadu na ciśnienie [2]. Z tego powodu koniecznym okazało się zastosowanie samego modelu do estymacji parametrów filtracyjnych. Ze względu na olbrzymią czasochłonność obliczeń przyjęto, że wyznaczane będą tylko dwa parametry: α_0 i s , a opór właściwy przegrody R_p pozostawiono niezmienny, wyznaczony w oparciu o równanie (1.16). Ponadto, z tej samej przyczyny, dopasowanie danych doświadczalnych i uzyskanych na drodze symulacji komputerowej prowadzono tylko dla dwóch skrajnych ciśnień stosowanych w badaniach.

Przeprowadzenie poprawnego modelowania komputerowego procesu rozdziału zawiesziny na drodze filtracji i kompresji osadu wymaga jeszcze dobo-

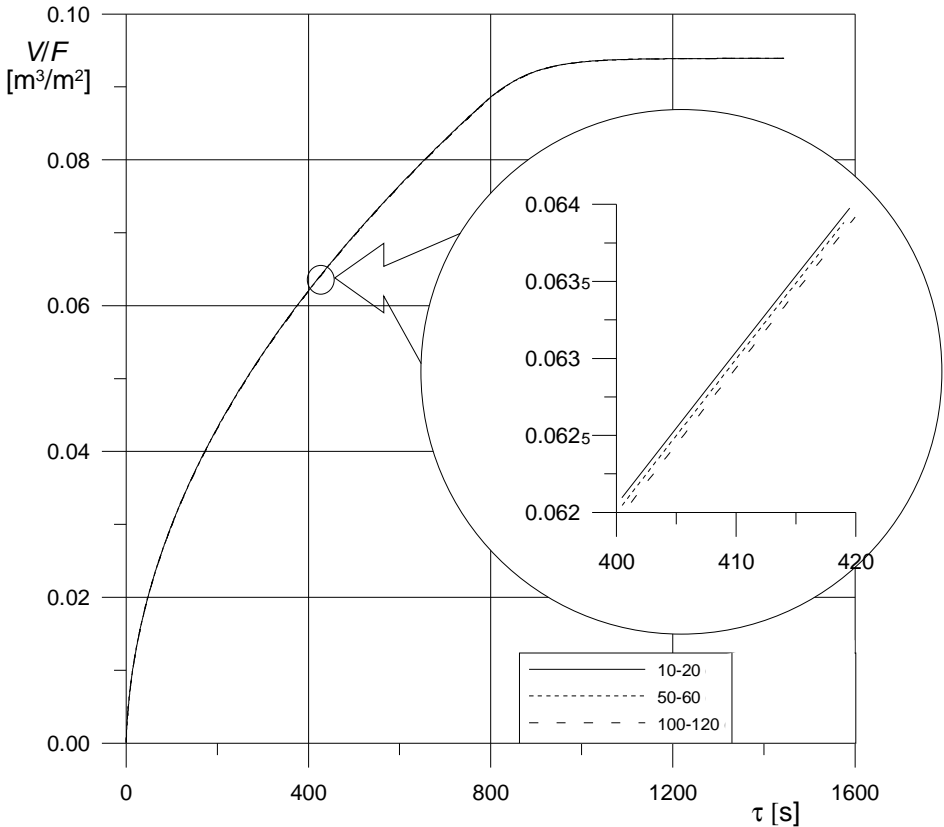
ru właściwych z numerycznego punktu widzenia wartości kroku czasu $\Delta\tau$ oraz odległości wyrażonej we współrzędnych materiałowych $\Delta\omega$. Od prawidłowego doboru tych parametrów zależy wielkość numerycznego błędu metody, jak również jej stabilność.

Ze względu na skomplikowanie funkcji wektorowej (zamieszczonej w cz. I niniejszego opracowania pod numerem (4.36)) opisującej proces, jak i fakt, że rezultaty obliczeń mogą zmieniać się w trakcie symulacji o kilka rzędów wielkości stwierdzono, że przy stałym kroku $\Delta\omega$ wynikającym z podziału zawiesiny na n części krok czasu $\Delta\tau$ musi ulegać zwiększeniu wraz ze wzrostem głównej strefy obliczeń o każdą nową warstwę $2\Delta\omega$. Przyczyna tego zjawiska leży przede wszystkim w równaniu opisującym przyrost warstwy powierzchniowej $\Delta\omega_{j+1}-\Delta\omega_j$, który w przypadku bardzo małych $\Delta\tau$ i coraz mniejszych, ze wzrostem grubości osadu, prędkości przepływu w warstwie powierzchniowej u_{j+1} , w trakcie obliczeń mógł przyjmować wartość ujemną uniemożliwiając obliczenie kolejnego kroku dla czasu τ_{j+1} . Zjawisko to występowało szczególnie w przypadku zawiesin o wysokiej wartości współczynnika ściśliwości s . Na drodze eksperymentalnej ustalono, że metoda jest dokładna i stabilna, jeżeli każdy cykl obliczeń, którego efektem jest dodanie do głównej strefy obliczeń kolejnej warstwy $2\Delta\omega$ składa się z 10 do 20 kroków. Ze względu na możliwość „wpadnięcia” programu w zakres niestabilny, krok czasu wydłużano przed rozpoczęciem obliczeń kolejnej narastającej warstwy powierzchniowej. Wartości $\Delta\tau$ zwiększano o 50%, jeżeli w trakcie poprzedniego cyklu obliczeń ilość kroków mieściła się w zakresie 10÷20. O 100% zwiększano $\Delta\tau$, gdy ilość kroków była większa od 20, a nie zmieniano, gdy kroków było mniej niż 10. W celu potwierdzenia tego założenia przeprowadzono symulację dla ilości kroków w zakresie 100÷120, 50÷60 oraz 10÷20 kroków na jedną warstwę powierzchniową $2\Delta\omega$. Wyniki przedstawia rys. 1.1.

Jak widać, dopiero w bardzo dużym powiększeniu stają się widoczne różnice pomiędzy przebiegami symulowanymi z różną ilością kroków obliczeń warstwy powierzchniowej.

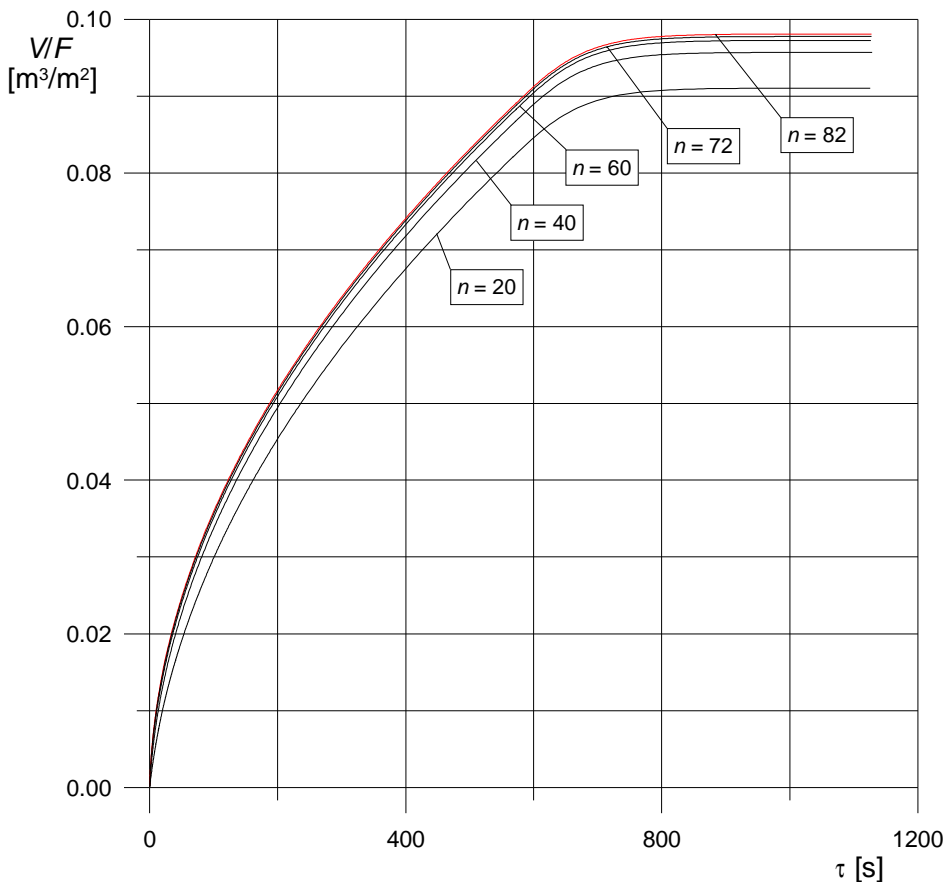
Wielkość przyrostu $\Delta\omega$ w znaczącym stopniu decyduje o dokładności opisywanej metody. Im wielkość tego kroku jest mniejsza, tym błąd obciążenia metody numerycznej jest mniejszy. Użycie bardzo małych wartości kroku prowadzi jednak do zwiększenia błędu zaokrąglenia. Ponadto im mniejsza jest wartość $\Delta\omega$, tym więcej warstw występuje w schemacie obliczeń. Ze względu na specyfikę kompilatora Turbo Pascal 7.0 oraz zastosowanie w programie gotowych procedur obliczeniowych, maksymalna ilość warstw, dla których wystarczy miejsca w pamięci komputera to 82 (przyczyną tego ograniczenia jest przeznaczenie jedynie 16 kB pamięci operacyjnej na zmienne). Pojawia się

zatem pytanie, czy ilość ta jest wystarczająca. W celu zilustrowania wpływu ilości warstw na dokładność obliczeń przeprowadzono symulacje komputerowe dla stałych parametrów zawiesziny, przy czym grubość warstwy wynosiła $\omega/20$, $\omega/40$, $\omega/60$, $\omega/72$ i $\omega/82$. Wyniki takiej symulacji przedstawiono na rys. 1.2.



Rys. 1.1. Wpływ na dokładność modelowania długości kroku czasu $\Delta\tau$ wyrażonego w ilości kroków obliczeń grubości warstwy powierzchniowej $2\Delta\omega$

Fig. 1.1. The influence of length of time step $\Delta\tau$ expressed as a number of calculations of the surface area thickness $2\Delta\omega$ upon the model accuracy



Rys. 1.2. Przebieg symulowanego komputerowo procesu rozdziału zawiesiny w zależności od wielkości kroku $\Delta\omega$

Fig. 1.2. The separation of suspension simulation progress as a function of space step size $\Delta\omega$.

Analizując wpływ wielkości $\Delta\omega$ na przebieg zależności $V/F=f(\tau)$ przedstawiony na rys. 1.2. można stwierdzić, że przebiegi symulowanych charakterystyk filtracji zbliżają się asymptotycznie do przebiegu idealnego (kiedy $\Delta\omega = d\omega$) wraz ze wzrostem ilości warstw, na które podzielono wsad filtru. Widać także, że różnica pomiędzy podziałem na 72 i 82 warstewki jest już bardzo nieznaczna i można przyjąć, że dla 82 warstw błąd numeryczny wynikający z zastosowania różnic skończonych jest do pominięcia.

W pracy [2], na której oparto niniejsze rozważania podano, że metoda modelowania numerycznego jest stabilna, kiedy spełniony jest następujący warunek oparty na podobieństwie procesu filtracji do opracowanego numerycznie przez Moldrupa i wsp. [6] procesu jednowymiarowego transportu substancji rozpuszczonej:

$$\frac{p_a (1 - \varepsilon_0)^{\frac{s-1}{\beta}}}{\eta \alpha_0 \beta} (1 + e)^{\frac{s-1}{\beta}-1} \frac{\Delta \tau}{(\Delta \omega)^2} < 5 \quad (1.18)$$

Warunek ten był spełniony we wszystkich przypadkach dla najbardziej niekorzystnych danych, tzn. gdy $e = e_{max}$ – przestrzeni swobodnej przy maksymalnym ciśnieniu kompresji równym przyłożonemu ciśnieniu procesowemu.

2. Opis stanowiska badawczego

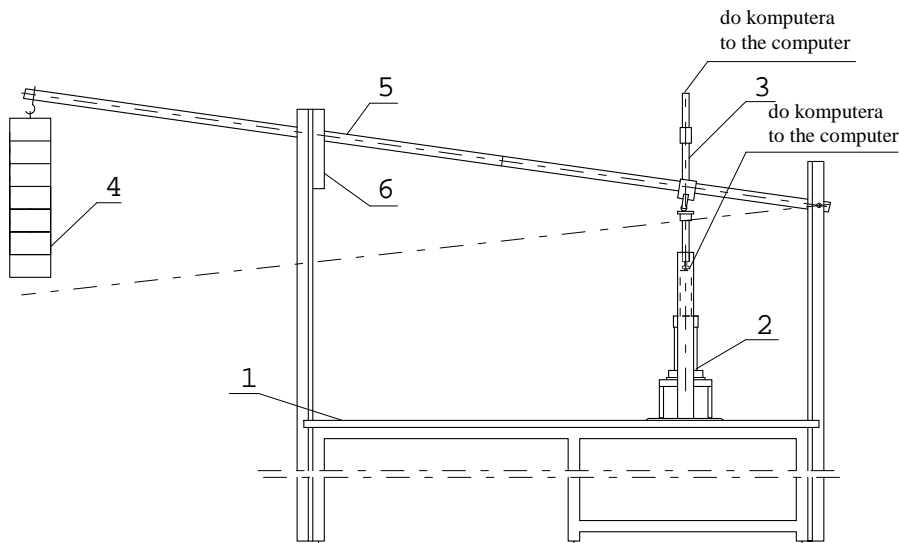
Doświadczenia, których wyniki przeanalizowano w niniejszej części pracy, prowadzono na stanowisku badawczym wyposażonym w testowy filtr ciśnieniowy [7,8]. Poza samym filtrem stanowisko wyposażone jest w obciążaną odważnikami dźwignię, wywołującą poprzez układ przeniesienia nacisku ciśnienie wewnątrz urządzenia testowego. Układ opomiarowany jest za pomocą czujnika przesuwu, mierzącego zmianę położenia tłoka w filtrze oraz czujnika ciśnienia mierzącego panujące w jego wnętrzu nadciśnienie względem ciśnienia otoczenia. Obydwa czujniki przekazują sygnały do komputera, który przetwarza je na zbiory odpowiednich danych. Schemat stanowiska badawczego przedstawiony jest na rys. 2.1.

Zasada działania stanowiska do badania filtracji ciśnieniowej polega na odfiltrowaniu porcji zawiesiny umieszczonej w filtrze ciśnieniowym zamocowanym w statywie poprzez wywołanie odpowiednio obciążoną dźwignią naciśku na tłok. Schemat użytego w badaniach filtru testowego przedstawia rys. 2.2.

Przemieszczenie się tłoka wewnątrz cylindra urządzenia testowego mierzone jest za pomocą czujnika przesuwu. Znając przesunięcie tłoka h względem punktu startowego i wiedząc, że przekrój poprzeczny filtru ciśnieniowego jest stały, można łatwo obliczyć ilość filtratu V uzyskanego w danym czasie τ .

$$V = h \cdot F \quad (2.1)$$

Sygnały elektryczne pochodzące z czujników przesuwu oraz ciśnienia przekazywane są przewodami do karty przetwornika analogowo-cyfrowego, zamontowanej w komputerze.



Rys. 2.1. Stanowisko doświadczalne: 1 – blat, 2 – filtr ciśnieniowy z czujnikiem ciśnienia, 3 – czujnik przesuwu, 4 – odważniki, 5 – ramię dźwigni, 6 – zamek

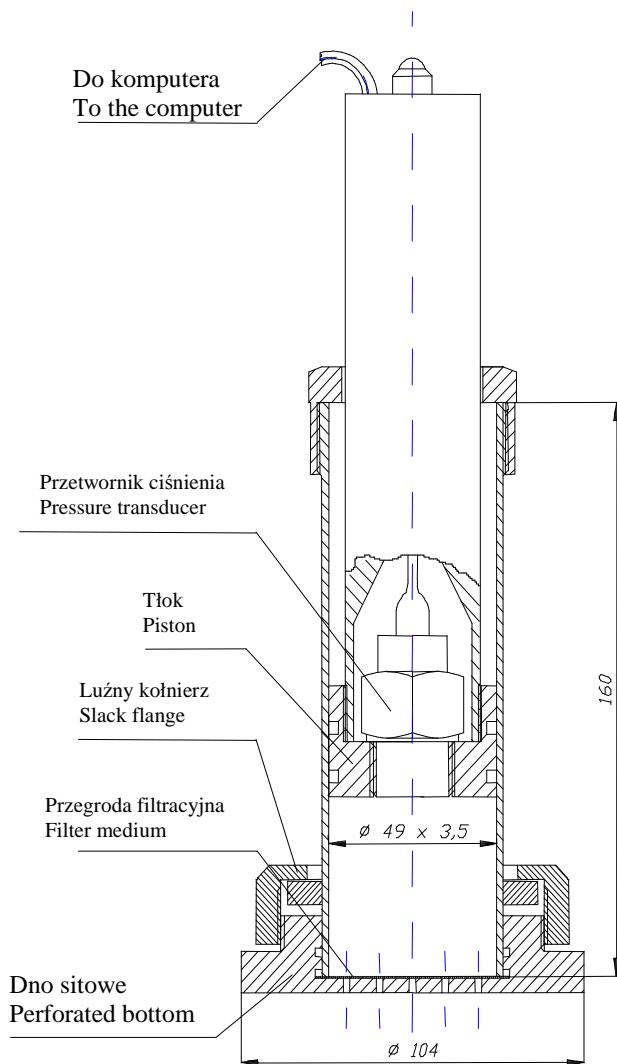
Fig. 2.1. Experimental stand: 1 – table top, 2 – pressure filter including pressure sensor, 3 – linear displacement transducer, 4 – weight, 5 – lever, 6 – lock

3. Przykładowe wyniki

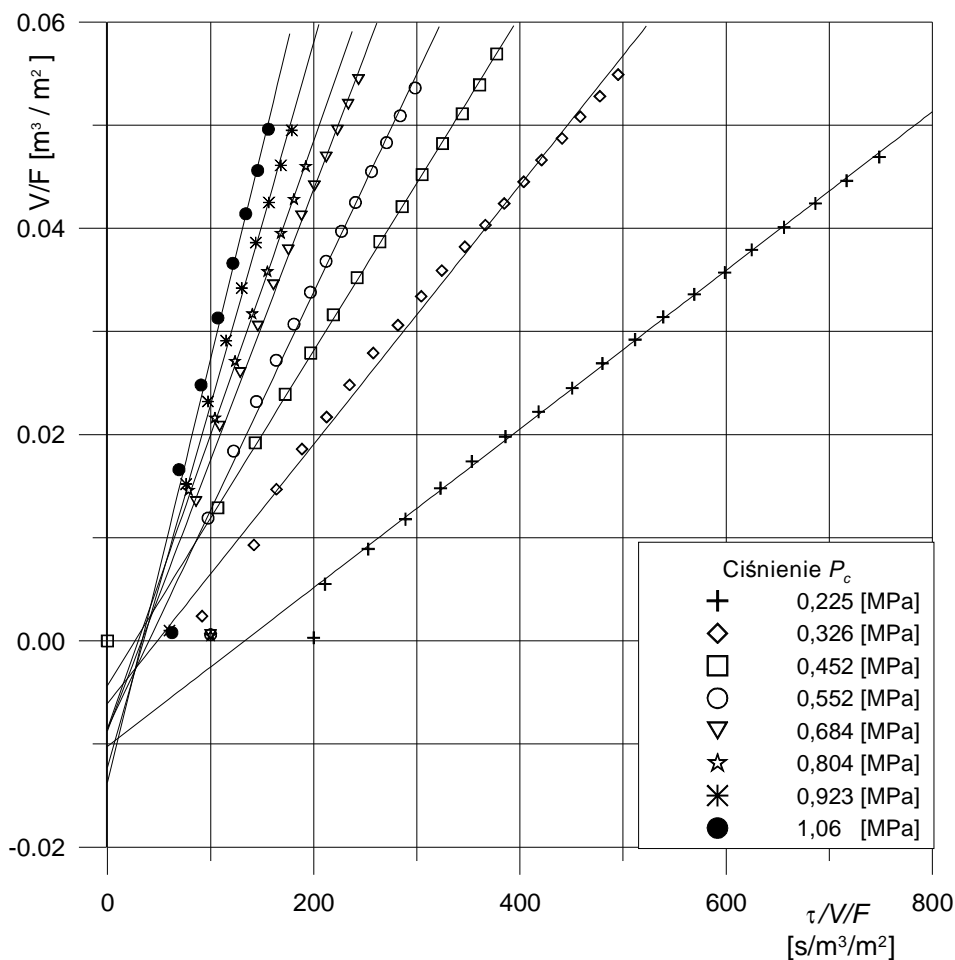
Zaprezentowany model zweryfikowano dla 3 zawieszin różniących się znacznie właściwościami fizykochemicznymi [9]. Dwie zawiesziny: gipsu niedotlenionego i dotlenionego z przerwą podczas absorpcji [10], pochodzące z instalacji odsiarczania gazów spalinowych metodą wapniakową, trzecia pochodzi z instalacji produkcji sody z Inowrocławskich Zakładów Chemicznych. Osady tworzone przez zawiesziny cechowała różna podatność na ciśnienie: od niewielkiej (jak w przypadku dotlenionego gipsu z odsiarczania) – po bardzo dużą, występującą dla zawiesziny z produkcji sody.

Pierwszy etap opracowania wyników polegał zastosowaniu klasycznej teorii filtracji i wyznaczeniu stałych K oraz C równania (1.14), które umożliwiły oszacowanie oporu osadu α oraz obliczenie oporu przegrody R_p . Rysunki 3.1÷3.3 przedstawiają punkty pomiarowe z zakresu filtracji oraz przebieg prostych opisanych równaniem 1.14.

Wyznaczone parametry równania (1.14) oraz obliczone wartości oporu przegrody zestawiono w tabeli 3.1

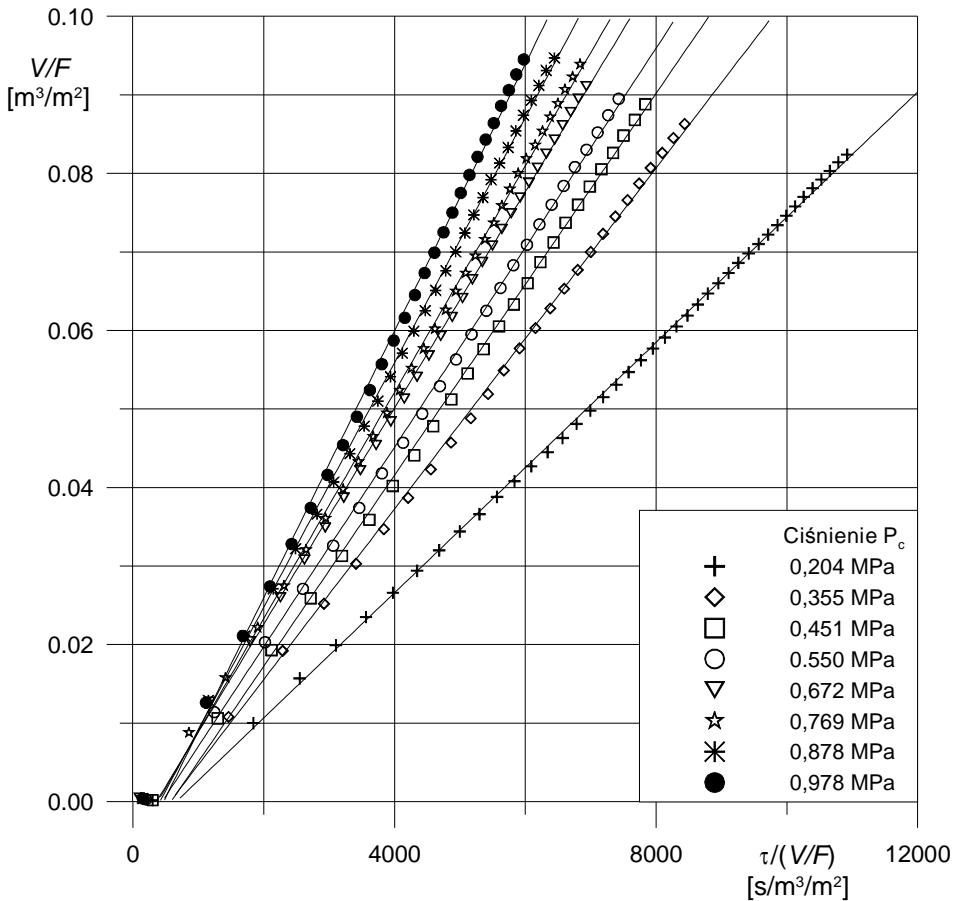


Rys. 2.2. Urządzenie testowe do filtracji ciśnieniowej
Fig. 2.2. Test pressure filter



Rys. 3.1. Charakterystyka klasycznej filtracji z tworzeniem osadu zawiesiny gipsu dołenionego z odsiarczania gazów spalinowych

Fig. 3.1. Classical characteristic of cake filtration obtained from oxidized gypsum suspension from flue gas desulphuration



Rys. 3.2. Charakterystyka klasycznej filtracji z tworzeniem osadu zawiesiny niedotlenionego gipsu z odsiarczania gazów spalinowych

Fig. 3.2. Classical characteristic of cake filtration obtained from non-oxidized gypsum suspension from flue gas desulphuration

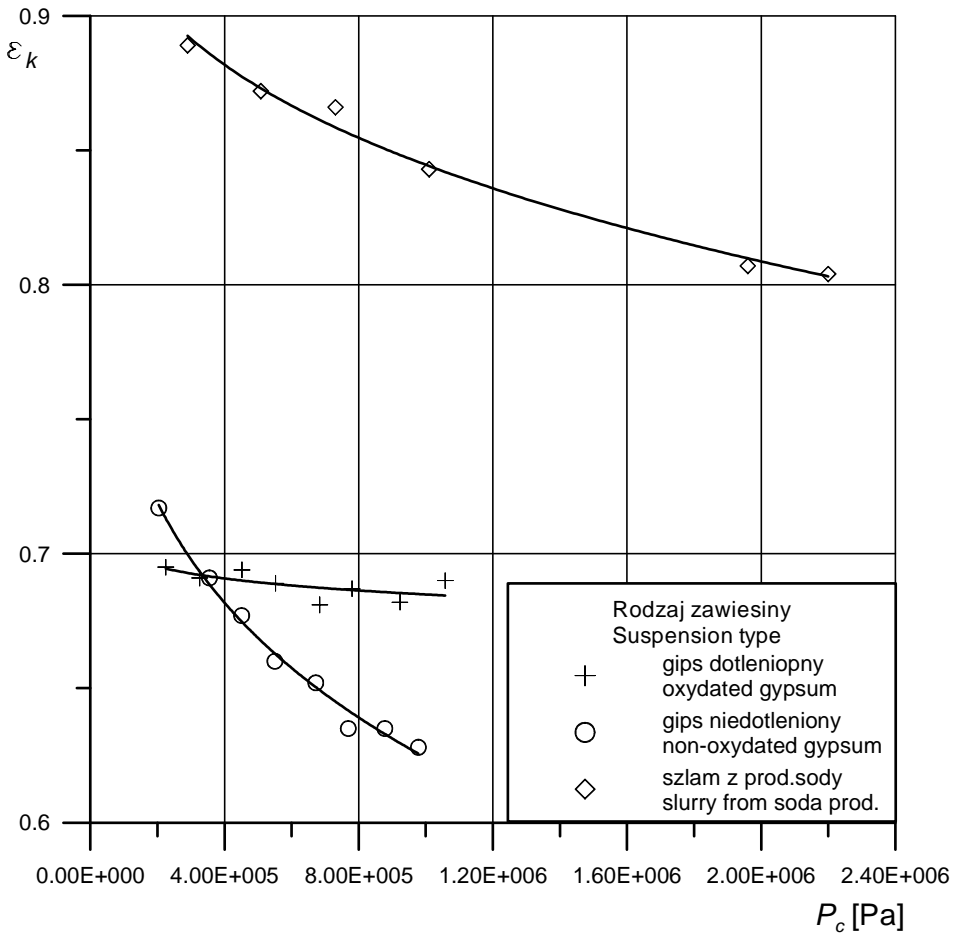
Tabela 3.1. Stałe równania filtracji i opór przegrody.

Table 3.1. Filtration equation constants and filter medium resistance

Zawiesina gipsu dotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych				Zawiesina gipsu niedotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych				Zawiesina szlamu z produkcji sody			
P_c [MPa]	$K \cdot 10^{-3}$ [s/m ²]	C [s/m]	$R_p \cdot 10^{-10}$ [1/m]	P_c [MPa]	$K \cdot 10^{-3}$ [s/m ²]	C [s/m]	$R_p \cdot 10^{-10}$ [1/m]	P_c [MPa]	K [s/m ²]	C [s/m]	$R_p \cdot 10^{-10}$ [1/m]
0,225	12,9	40,1	0,901	0,204	125	1017	20,8	0,290	31,8	1006	29,2
0,326	7,94	49,3	1,61	0,355	92,1	566	20,1				
0,452	6,17	26,7	1,21	0,451	82,2	570	25,7				
0,552	4,72	40,2	2,22	0,550	78,6	452	24,9	0,508	25,7	771	39,2
0,684	3,80	33,2	2,27	0,672	726,7	3355	23,9				
0,780	3,51	29,9	2,33	0,769	69,35	3383	29,4	0,731	26,6	478	35,0
0,923	2,85	35,0	3,23	0,878	64,18	3392	34,4				
1,058	2,44	33,4	3,53	0,978	58,82	3354	34,6	1,01	22,5	248	25,0
								1,96	21,6	130	25,4
								2,20	20,4	107	23,5

Tabela 3.2. Zawartość ciała stałego w osadzie i porowatość osadu po zakończeniu kompresji**Table 3.2.** Solids content in filter cake and final cake porosity

Zawiesina gipsu dotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych			Zawiesina gipsu niedotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych			Zawiesina szlamu z produkcji sody		
P_c [MPa]	w_k	ε_k	P_c [MPa]	w_k	ε_k	P_c [MPa]	w_k	ε_k
0,225	0,598	0,695	0,204	0,415	0,717	0,290	0,328	0,889
0,326	0,604	0,691	0,355	0,440	0,691			
0,452	0,600	0,694	0,451	0,462	0,677			
0,552	0,605	0,689	0,550	0,472	0,660	0,508	0,360	0,872
0,684	0,615	0,681	0,672	0,477	0,652			
0,780	0,607	0,687	0,769	0,485	0,635	0,731	0,370	0,866
0,923	0,613	0,682	0,878	0,490	0,635			
1,058	0,605	0,690	0,978	0,502	0,628	1,01	0,411	0,843
						1,96	0,466	0,807
						2,20	0,470	0,804



Rys. 3.4. Wyznaczone eksperymentalnie porowatości końcowe osadów przy różnych ciśnieniach oraz przebiegi zależności danych równaniem (3.7) z I cz. opracowania [1]

Fig. 3.4. Experimentally determined final cakes porosity at different pressures and function curves given by eq. (3.7) presented in the first part of the elaboration [1]

Rozrzut wartości oporu przegrody R_p w poszczególnych testach (tab. 3.1) można tłumaczyć dwiema przyczynami:

- użyciem do kolejnych pomiarów tej samej tkaniny filtracyjnej, której pory, mimo płukania, stopniowo z testu na test ulegały zatykaniu drobinami ciała stałego
- wpływem ciśnienia kompresji, powodującego zgniatanie struktury tkaniny, przez co wraz ze wzrostem ciśnienia rósł jej opór (można tutaj mówić o ścisłości tkaniny filtracyjnej).

Ostatecznie postanowiono nie używać w symulacjach numerycznych uśrednionej wartości oporu osadu, tylko wyznaczone indywidualnie wielkości R_p dla każdego z pomiarów.

W otrzymanych z testów plackach filtracyjnych mierzono zawartość ciała stałego w_k i na tej podstawie obliczano średnią porowatość po kompresji zgodnie z równaniem (1.7). Obliczone wartości przedstawia tabela 3.2.

Obliczone wartości ε dla poszczególnych ciśnień aproksymowano równaniem (3.6) przedstawionym w pierwszej części niniejszego opracowania [1] zaproponowanym przez Tiller i Leu. Dane doświadczalne i funkcje aproksymujące przedstawia rys. 3.4, a wyznaczone parametry równania tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parametry równania aproksymującego zmianę porowatości osadu z ciśnieniem kompresji

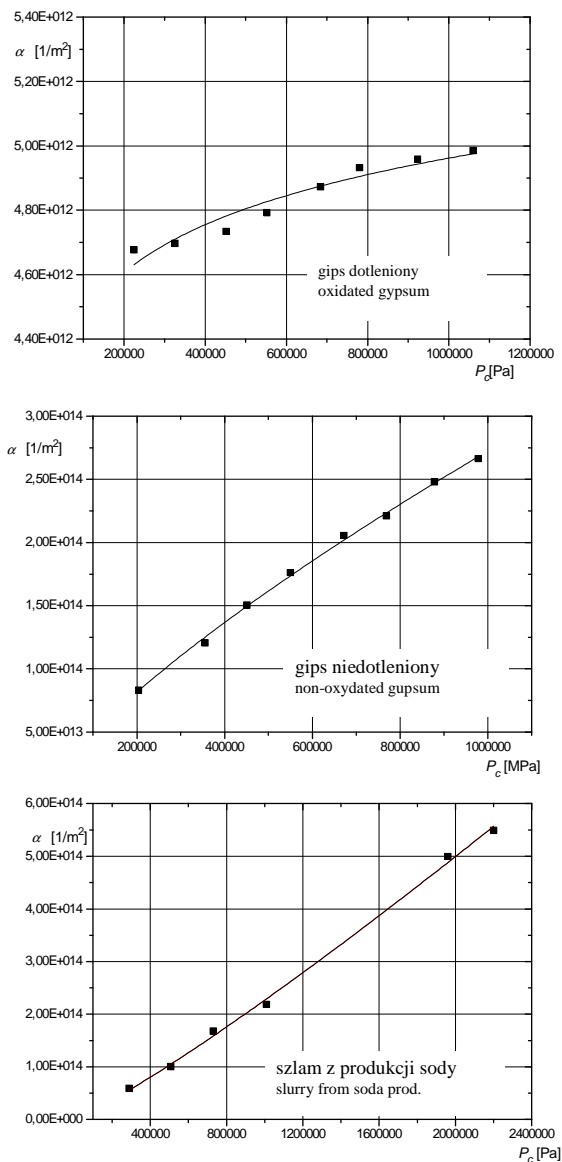
Table 3.3. Parameters of the equation approximating the cake porosity change vs. compression pressure

	Porowatość graniczna ε_0	Podatność porowatości na ciśnienie β
Zawiesina gipsu dotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych	0,718	0,021
Zawiesina gipsu niedotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych	0,858	0,183
Zawiesina szlamu z produkcji sody	0,968	0,300

Tabela 3.4. Szacunkowe parametry osadu podczas filtracji i opór osadu obliczony w oparciu o stałą filtracji K

Table 3.4. Parameters of filter cake during filtration and filter cake resistance estimated basing on the filtration constant K

Zawiesina gipsu dotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych				Zawiesina gipsu niedotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych				Zawiesina szlamu z produkcji sody			
P_c [MPa]	$\bar{\epsilon}$	c_A	$\alpha \cdot 10^{-12}$ [1/m ²]	P_c [MPa]	$\bar{\epsilon}$	c_A	$\alpha \cdot 10^{-14}$ [1/m ²]	P_c [MPa]	$\bar{\epsilon}$	c_A	$\alpha \cdot 10^{-14}$ [1/m ²]
0,225	0,696	1,13	4,68	0,204	0,728	0,616	0,831	0,290	0,899	0,314	0,589
0,326	0,693	1,10	4,70	0,355	0,699	0,542	1,21				
0,452	0,691	1,09	4,73	0,451	0,686	0,492	1,51				
0,552	0,690	1,09	4,79	0,550	0,675	0,491	1,76	0,508	0,881	0,260	1,00
0,684	0,689	1,07	4,87	0,672	0,663	0,475	2,06				
0,780	0,688	1,07	4,93	0,769	0,654	0,483	2,21	0,731	0,868	0,232	1,68
0,923	0,687	1,06	4,96	0,878	0,646	0,455	2,48				
1,058	0,686	1,05	4,98	0,978	0,639	0,432	2,66	1,01	0,854	0,208	2,19
								1,96	0,822	0,169	5,00
								2,20	0,816	0,164	5,49



Rys. 3.5. Oszacowany opór osadu α dla prezentowanych zawiesin przy różnych ciśnieniach filtracji oraz przebieg funkcji aproksymującej

Fig. 3.5. Estimated filter cake resistance α for presented suspensions at different filtration pressures and approximating function curve

Dysponując powyższymi zależnościami oraz stałymi K i C równania filtracji oszacowano opory osadów α utworzonych przy poszczególnych ciśnieniach procesowych, posługując się szacunkową średnią porowatością osadu przy ciśnieniu kompresji równym 80% ciśnienia całkowitego. Wyniki zestawiono w tab. 3.4. Zależność α od ciśnienia procesowego aproksymowano funkcją analogiczną do $\varepsilon = f(\Delta P_c)$ zaproponowaną przez Tillera i Leu, a zamieszczoną w pierwszej części opracowania [1] pod numerem (3.6). Obliczone punkty z tabeli i przebieg funkcji aproksymującej pokazano na wykresach na rys. 3.5.

Tabela 3.5. zawiera wyznaczone parametry zależności opisującej zmianę oporu osadu z ciśnieniem kompresji. Wartości te, jak wspomniano, są wartościami startowymi i uściśla się je za pomocą aproksymacji wyników doświadczeń uzyskanych dla skrajnych ciśnień procesowych przedstawionym modelem.

Tabela 3.5. Parametry równania opisującego zmianę oporu osadu z ciśnieniem kompresji obliczone na podstawie oporu osadu wyznaczonego ze stałej filtracji K

Table 3.5. Parameters of the equation describing filter cake resistance changes with compression pressure estimated basing on cake resistance calculated from the filtration constant K

	Graniczny opór osadu $\alpha_0 \cdot 10^{-12}$ [1/m ²]	Współczynnik ściśliwości osadu s
Zawiesina gipsu dotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych	3,87	0,0469
Zawiesina gipsu niedotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych	4,87	0,759
Szlam z produkcji sody	0,526	1,14

Ostatnim krokiem prowadzącym do wyznaczenia parametrów filtracyjnych potrzebnych do przeprowadzenia modelowania procesu rozdziału jest aproksymacja za pomocą modelu danych zebranych dla najmniejszego i największego ciśnienia procesowego obejmujących jedynie filtrację. Ostatecznie wyznaczone: graniczny opór osadu i współczynnik ściśliwości zebrano w tab. 3.6.

Mając do dyspozycji wszystkie parametry potrzebne do przeprowadzenia modelowania przeprowadzono symulację pełnego procesu rozdziału zawiesin (obejmującą zarówno filtrację jak i kompresję, czyli mechaniczne zginiatanie osadu tłokiem). Wyniki modelowania porównano z danymi eksperymentalnymi na rysunkach 3.6÷3.8.

Tabela 3.6. Parametry równania opisującego zmianę oporu osadu z ciśnieniem kompresji wyznaczone na drodze estymacji danych doświadczalnych modelem

Table 3.6. Parameters of the equation describing filter cake resistance changes with compression pressure using estimation of experimental data with model

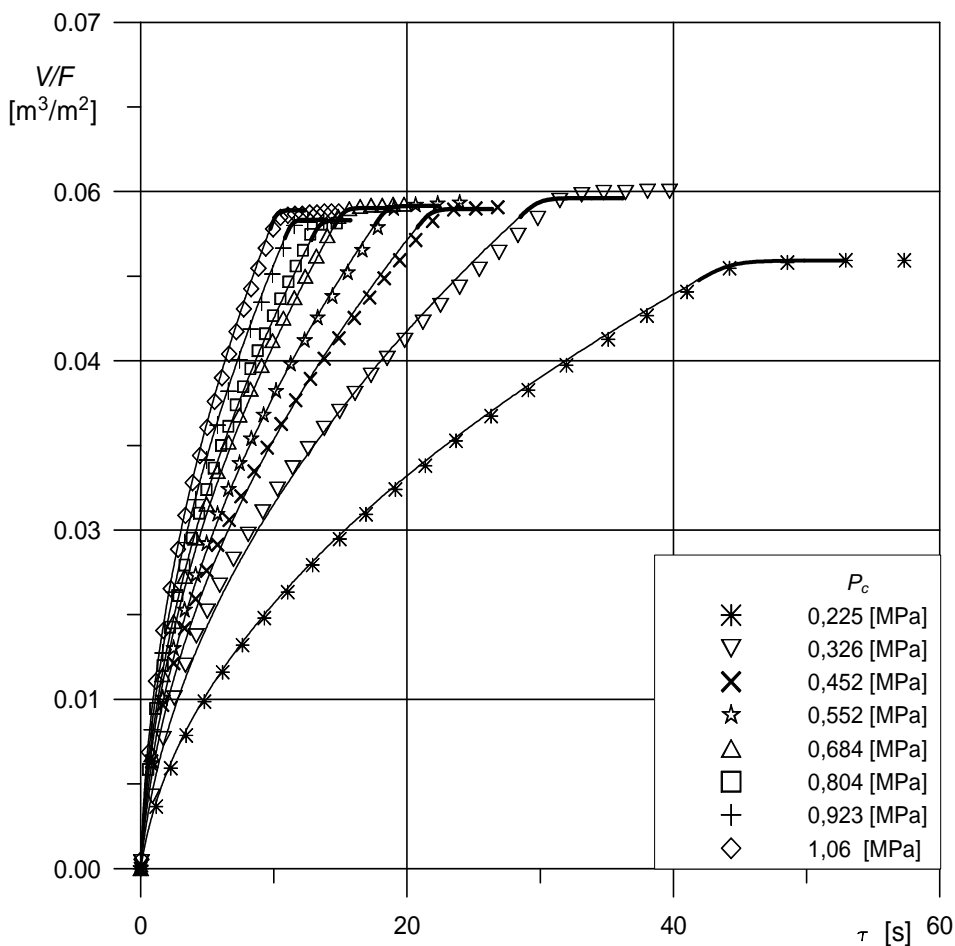
	Graniczny opór osadu $\alpha_0 \cdot 10^{-12}$ [1/m ²]	Współczynnik ściśliwości osadu s
Zawiesina gipsu dotlenionego z odsiarczania gazów spalinyowych	2,16	0,202
Zawiesina gipsu niedotlenionego z odsiarczania gazów spalinyowych	9,07	0,948
Zawiesina szlamu z produkcji sody	1,15	1,25

Ponieważ zastosowanie modelu umożliwia łatwe znalezienie punktu rozpoczęcia kompresji właściwej osadu filtracyjnego, strefę kompresji wyróżniono na wykresach pogrubieniem linii. Dokładna znajomość szerokości strefy kompresji pozwala na precyzyjne określenie dodatkowego odwodnienia w tej fazie procesu, a co za tym idzie, ekonomicznej zasadności jego przeprowadzenia. Dodatkowe odwodnienie w strefie kompresji zdefiniowane jest tu jako stosunek objętości filtratu uzyskanego podczas właściwej kompresji osadu do uzyskanego podczas filtracji:

$$\phi = \frac{V_{\text{kompresji}}}{V_{\text{filtracji}}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

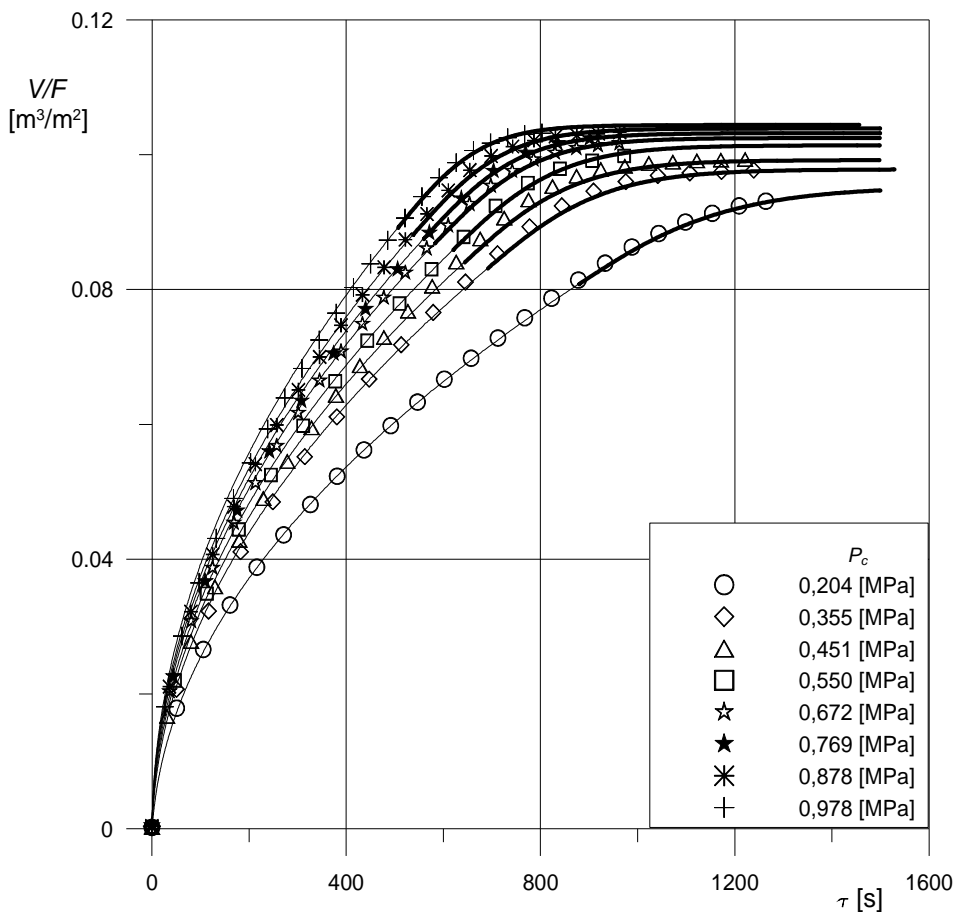
Pierwsza z zaprezentowanych zawiesin - gips dotleniony - mimo bardzo dużej koncentracji ciała stałego charakteryzuje się bardzo wąską strefą kompresji. Dodatkowe odwodnienie ϕ wynosi około 3% dla wszystkich ciśnień procesowych [9]. Z ekonomicznego punktu widzenia zastosowanie kompresji osadu do zmniejszenia jego wilgotności jest nieuzasadnione. O wiele lepsze rezultaty dla tej zawiesiny przyniesie przedmuch placka filtracyjnego powietrzem.

Druga zawiesina – gips niedotleniony z odsiarczania gazów spalinyowych - tworzy placki bardziej podatne na ciśnienie i mimo znacznie mniejszej zawartości ciała stałego w zawieszynie strefa kompresji jest dla niej znacząco szersza. Dodatkowe odwodnienie ϕ przekracza tu 17% [9]. Dodatkowe osuszenie na drodze kompresji osadu tego typu może być ekonomicznie opłacalne.



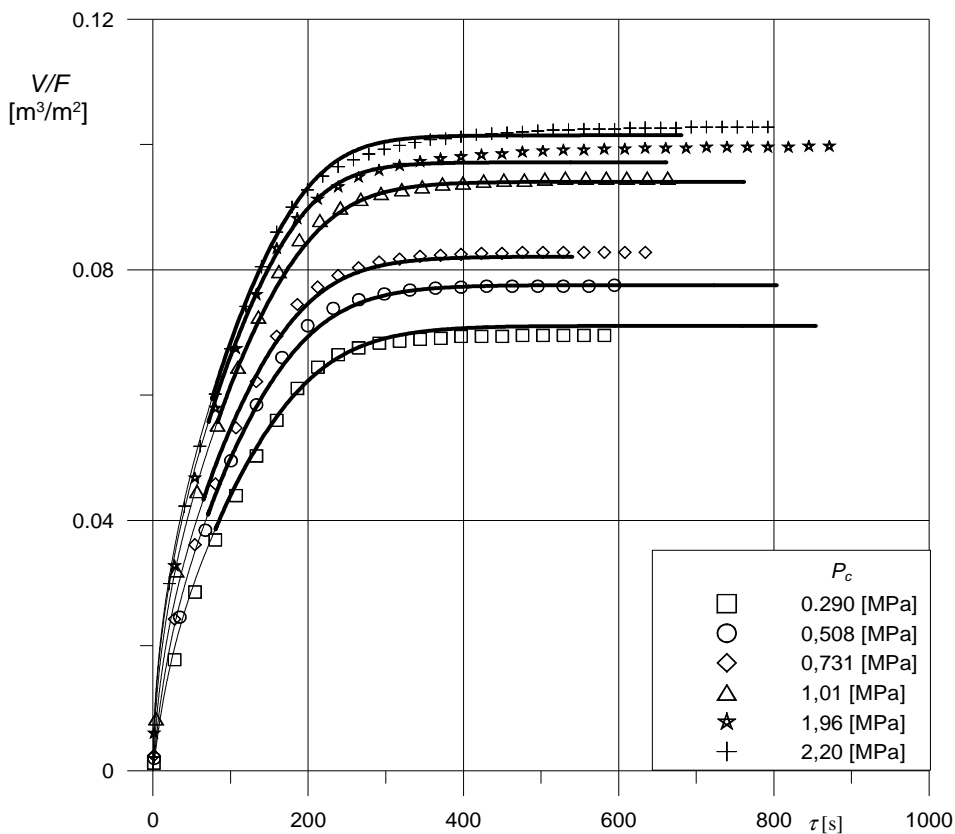
Rys. 3.6. Przebieg procesu rozdzielenia zawiesiny gipsu dotlenionego z odsiarczania spalin. Punkty odpowiadają danym doświadczalnym, linie ciągłe wynikiem modelowania

Fig. 3.6. Separation process of the oxidized gypsum suspension from flue gas desulfurisation; points – experimental data, solid lines – modelling results



Rys. 3.7. Przebieg procesu rozdzielenia zawiesiny gipsu niedotlenionego z odsiarczania spalin. Punkty odpowiadają danym doświadczalnym, linie ciągłe wynikiem modelowania

Fig. 3.7. Separation process of the non-oxidized gypsum suspension from flue gas desulphurisation; points – experimental data, solid lines – modelling results



Rys. 3.8. Przebieg procesu rozdziału szlamu z produkcji sody. Punkty odpowiadają danym doświadczalnym, linie ciągłe wynikiom modelowania

Fig. 3.8. Separation process of the slurry from soda production; points – experimental data, solid lines – modelling results

Ostatnia z zaprezentowanych zawiesin – szlam z produkcji sody – jest w znacznym stopniu rozdzielany na drodze kompresji osadu, gdyż dodatkowe odwodnienie ϕ osiąga tu od 70%÷90% w zależności od ciśnienia procesowego [9]. Kompresja osadu wydaje się tu być bardzo dobrze ekonomicznie uzasadnionym sposobem separacji faz.

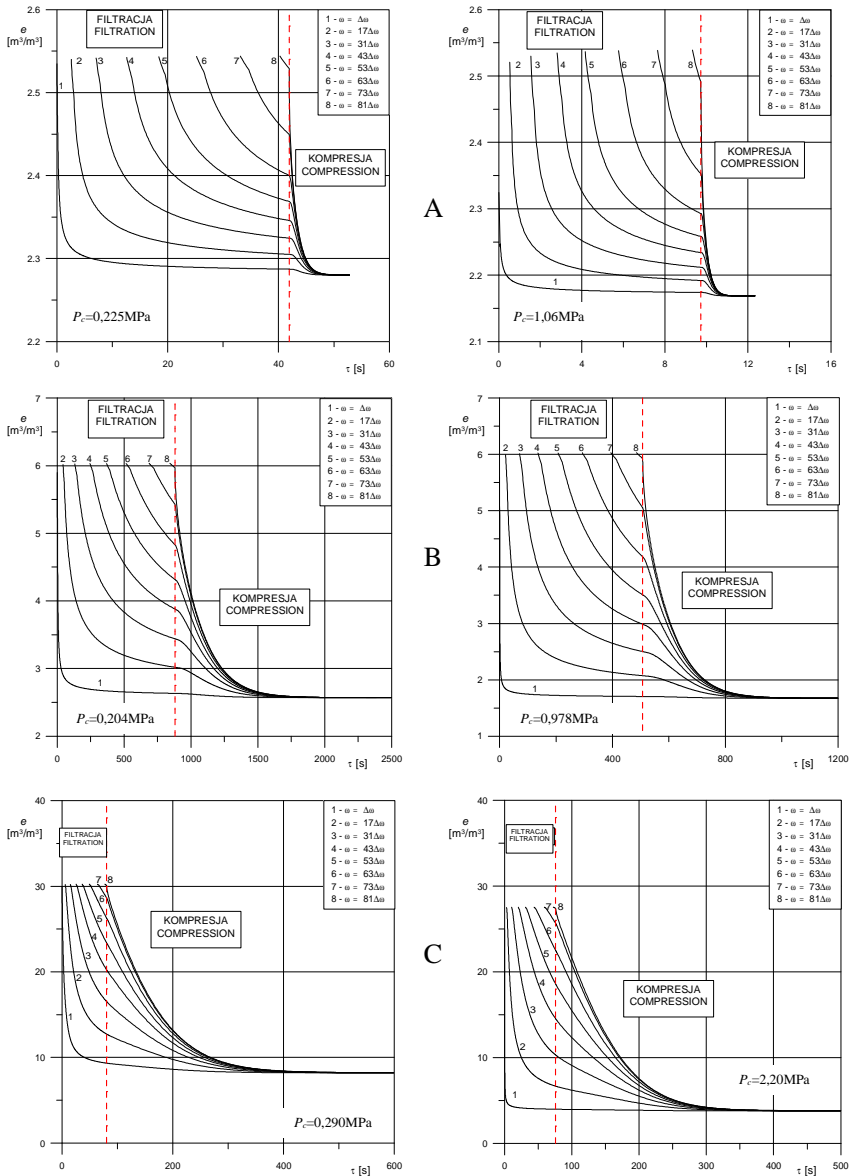
4. Profile prędkości względnej i przestrzeni swobodnej w osadzie

Dane uzyskane z modelowania procesu rozdziału zawiesin za pomocą przedstawionego układu równań pozwalają na określenie stanu placka w różnych odległościach od przegrody w dowolnym momencie procesu. Stan ten opisują dwa parametry zmienne w czasie: przestrzeń swobodna e oraz prędkość przepływu cieczy względem ciała stałego u . W zawieszynie, jeżeli pominąć sedymentację, przestrzeń swobodna nie zmienia się i wynosi e_z . Podobnie, przy pominięciu sedymentacji, względna prędkość cieczy w zawieszynie względem ciała stałego jest stała i wynosi 0. W placku wielkości te zmieniają się wraz z postępem procesu filtracji i kompresji osadu. Przestrzeń swobodna maleje w kierunku przegrody oraz z czasem, natomiast prędkość względna w kierunku przegrody rośnie, a z czasem maleje. Zjawiska te dobrze ilustrują graficznie wykresy profili prędkości względnej i przestrzeni swobodnej.

Na rys. 4.1. przedstawione są wykresy profili przestrzeni swobodnej przy niskim i wysokim ciśnieniu procesowym dla badanych zawiesin.

Każda z krzywych przedstawionych na rys. 4.1 pokazuje zmianę przestrzeni swobodnej w pewnej odległości od przegrody ω , będącej całkowitą wielokrotnością kroku $\Delta\omega$. Pionowa linia przerywana odpowiada momentowi rozpoczęcia kompresji właściwej osadu utworzonego podczas filtracji. Kolejne linie pojawiają się na wykresie w miarę narastania osadu. Krzywa nr 1 występuje przez cały czas trwania procesu rozdziału, a krzywa nr 8 pojawia się tuż przed rozpoczęciem kompresji.

Można zauważyć, że w każdym przypadku warstwa znajdująca się najbliżej przegrody bardzo szybko zmniejsza swoją porowatość i jeszcze przed rozpoczęciem właściwej kompresji osadu osiąga przestrzeń swobodną zbliżoną do wartości końcowej. Zjawisko to jest bardziej zauważalne przy wyższych ciśnieniach procesowych.



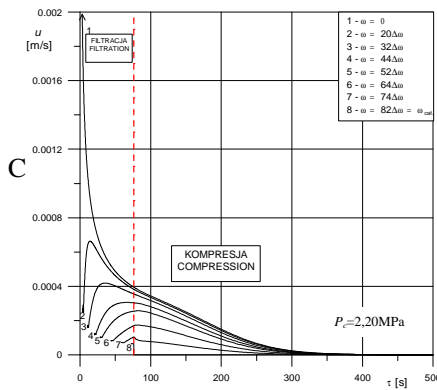
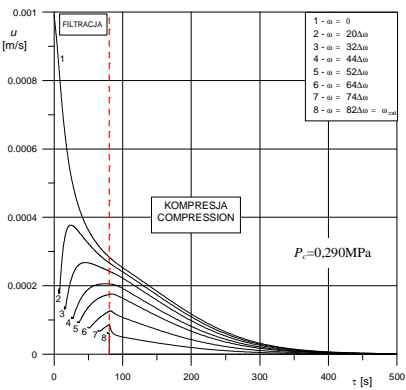
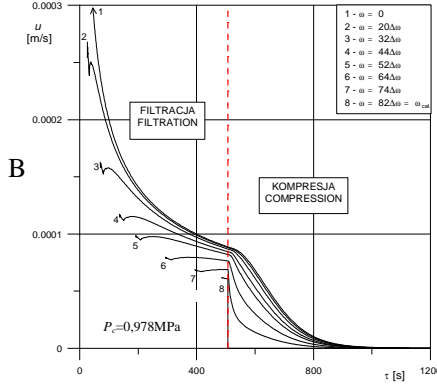
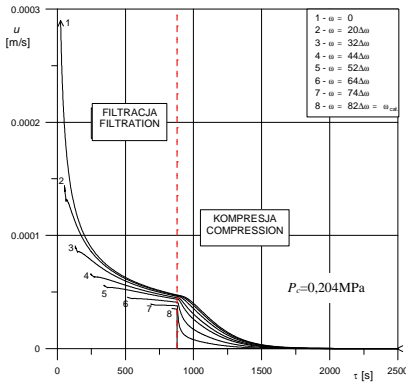
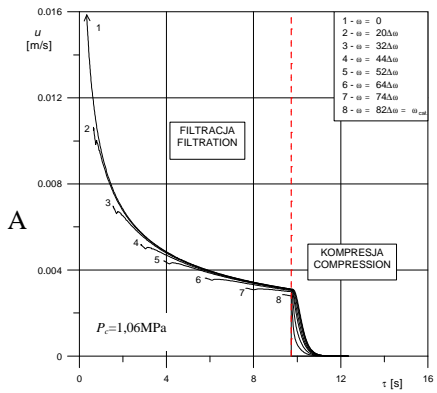
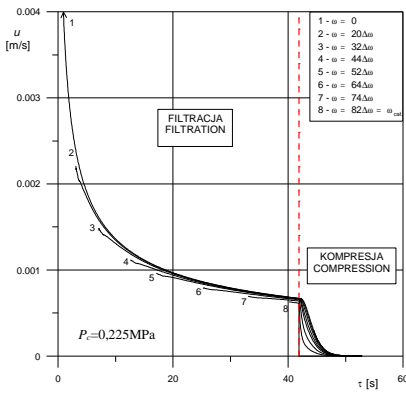
Rys. 4.1. Profile przestrzeni swobodnej w osadzie w różnych odległościach od przegrody: A – gips dotleniony, B – gips niedotleniony, C – szlam z produkcji sody
Fig. 4.1. Profiles of the free space in the cake at the different distances from the filter medium: A – oxidized gypsum, B – non-oxidized gypsum, C – slurry from soda production

Porównując przebieg krzywych dla badanych zawiesin daje się zauważyć wyraźne różnice w ich przebiegu. Osad powstały z gipsu niedotlenionego o bardzo małej podatności na ciśnienie po rozpoczęciu kompresji bardzo szybko osiąga końcową przestrzeń swobodną. Zmniejszenie przestrzeni swobodnej warstw po rozpoczęciu kompresji właściwej jest bardzo gwałtowne i trwa względnie krótko. Wszystkie krzywe (za wyjątkiem linii 1) w chwili zakończenia filtracji gwałtownie załamują się. Końcowa przestrzeń swobodna, do której asymptotycznie dążą wszystkie krzywe, jest zbliżona na wykresach dla niskich i wysokich ciśnień procesowych.

Gips niedotleniony z odsiarczania gazów spalinowych, tworzący osad bardziej podatny na ciśnienie kompresji, osiąga porowatość końcową po kompresji właściwej trwającej w przybliżeniu tak samo długo, jak filtracja. Zmiana charakteru krzywych w chwili rozpoczęcia kompresji jest łagodna już dla warstw znajdujących się niezbyt głęboko w osadzie.

Szlam z produkcji sody rozdzielany jest poprzez filtrację przez znacznie krótszy czas, aniżeli poprzez kompresję. Zatrzymanie procesu w chwili zakończenia filtracji powoduje pozostawienie znacznych ilości wilgoci w strukturze. Jego duża podatność na ciśnienie kompresji objawia się łagodnym przejściem praktycznie wszystkich linii przez moment rozpoczęcia kompresji. Przy dużych ciśnieniach warstwa znajdująca się najbliższej przegrody bardzo szybko osiąga przestrzeń swobodną zbliżoną do końcowej, co znacząco spowalnia rozdział, gdyż stanowi ona duży opór przepływu dla cieczy migrującej przez osad. Osady o jeszcze większych współczynnikach ściśliwości będą jeszcze wyraźniej wykazywać zjawisko tworzenia się cienkiej, nawet całkowicie blokującej przepływ warstwy, tzw. „skóry”, powstałej ze sprasowanych drobin osadu. Zwiększenie ciśnienia wpływa istotnie na porowatość, czyli zawartość wilgoci w osadzie po kompresji zmniejszając ją niemal dwukrotnie przy wzroście ciśnienia procesowego z 0,290 MPa na 2,20 MPa.

Podobnego rodzaju charakterystyki można wykreślić dla prędkości cieczy względem ciała stałego. Dla badanych zawiesin pokazano je na rys. 4.2 dla wysokich i niskich ciśnień procesowych. W większości przypadków z krzywej dotyczącej prędkości przepływu przez przegrodę odcięto fragment początkowy, by zwiększyć czytelność wykresu, jako że prędkość względna w początkowej fazie procesu rozdziału była bardzo duża.



Rys. 4.2. Profile prędkości względnej w osadzie w różnych odległościach od przegrody: A – gips dotleniony, B – gips niedotleniony, C – szlam z produkcji sody
Fig. 4.2. Profiles of the relative velocity in the cake at the different distance from the filter medium: A – oxidized gypsum, B – non-oxidized gypsum, C – slurry from soda production

Wykresy dla tworzącej niskościśliwe osady zawiesiny gipsu dotlenionego charakteryzują się bliskim przebiegiem krzywych prędkości od czasu dla poszczególnych warstw, co oznacza zbliżone wartości natężenia przepływu we wszystkich warstwach osadu. Krzywe zmieniają swój charakter w chwili zakończenia filtracji z wklęsłego na wypukły i po pewnym czasie ponownie na wklęsły. Po osiągnięciu punktu rozpoczynającego kompresję prędkość względna we wszystkich warstwach bardzo gwałtownie spada do 0 po kilkunastu (niskie P_c) czy kilku sekundach (wysokie P_c). Rozdział w strefie kompresji trwa tu bardzo krótko.

Zawiesina gipsu niedotlenionego z odsiarczania gazów spalinowych wykazuje znacznie większe różnice w przebiegach krzywych dla poszczególnych warstw. Szczególnie widoczne jest to przy wysokim ciśnieniu procesowym. Po rozpoczęciu mechanicznej kompresji osadu krzywe zmieniają swój charakter o wiele wolniej, niż w przypadku gipsu dotlenionego. Można także zauważyć, że w przegrodzie (krzywe nr 1) miejsce przegięcia krzywej jest odsunięte względem początku kompresji, czego efektem jest zjawisko pozornego wydłużenia filtracji, jeżeli brać pod uwagę charakter wypływu przez przegrodę, a nie rzeczywisty zanik zawiesiny pierwotnej w filtrze.

Ostatnia zawiesina – szlam z produkcji sody – tworząca osady o bardzo dużej podatności na ciśnienie, charakteryzuje się znacznymi różnicami we względnej prędkości przepływu cieczy. Rozpoczęcie kompresji osadu wpływa łagodnie na zmianę charakteru krzywych odpowiadających warstwom znajdującym się blisko przegrody, a także tym głębiej w osadzie. Pierwszy punkt przegięcia krzywej prędkości przepływu przez przegrodę znajduje się dość daleko za linią oddzielającą filtrację od kompresji właściwej osadu i trudno jest go jednoznacznie wskazać.

Dla zawiesiny gipsu niedotlenionego poddanej rozdziałowi przy dużym ciśnieniu procesowym oraz na obydwu wykresach dotyczących szlamu z produkcji sody można zauważyć, że w trakcie filtracji krzywe w początkowej fazie rosną, osiągają pewne maksimum, po czym maleją. Wzrost szybkości przepływu cieczy względem ciała stałego można wytłumaczyć, jeśli weźmie się pod uwagę, że w osadzie obydwie te fazy przesuwają się ku przegrodzie. Filtrat, na skutek różnicy ciśnień, przemieszcza się przez osad, przegrodę i w końcu opuszcza filtr. Prędkość przepływu cieczy q_c względem przegrody maleje z czasem na skutek wzrostu grubości i oporu osadu. Ciało stałe zbliża się do przegrody na skutek wywołanej ciśnieniem kontaktowym kompresji struktury osadu znajdującego się między daną warstwą, a przegrodą. Prędkość, z jaką w danej warstwie ciało stałe przemieszcza się ku przegrodzie q_s , maleje na skutek coraz bliższej maksymalnej kompresji warstw znajdujących się między

przegrodą a rozpatrywaną warstwą. Względna prędkość cieczy i ciała stałego w danym momencie τ można wyrazić jako różnicę:

$$u(\tau) = q_c(\tau) - q_s(\tau) \quad (4.1)$$

Jeżeli prędkość $q_s(\tau)$ będzie zmniejszać się szybciej, niż $q_c(\tau)$, to względna szybkość v będzie rosła, co można zapisać następująco:

$$\frac{\partial u(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial q_c(\tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial q_s(\tau)}{\partial \tau} > 0 \quad (4.2)$$

dla

$$\left| \frac{\partial q_c(\tau)}{\partial \tau} \right| < \left| \frac{\partial q_s(\tau)}{\partial \tau} \right| \quad (4.3)$$

przy czym

$$\frac{\partial q_c(\tau)}{\partial \tau} < 0 \text{ i } \frac{\partial q_s(\tau)}{\partial \tau} < 0 \quad (4.4)$$

Szybki spadek prędkości q_s powoduje także to, że po stosunkowo niedługim czasie ciało stałe praktycznie już się nie przemieszcza, a prędkość przepływu cieczy jest jeszcze spora i nadal spada na skutek wzrostu oporu hydraulicznego placka, przez co względna prędkość cieczy maleje.

5. Podsumowanie

Zaproponowany w niniejszym opracowaniu sposób badań i obliczeń filtracji i kompresji osadów pozwala przewidzieć końcową wilgotność placka. Ponieważ oparty jest na podstawowych zależnościach dotyczących przepływu przez złożę porowate, interpretacja przebiegu procesu odwadniania zawieszin jest poprawna z fizykalnego punktu widzenia. Podstawą do uzyskania poprawnych wyników są testy filtracji ciśnieniowej i kompresji prowadzone na stanowisku laboratoryjnym, np. takim, jak zaprezentowane w tej pracy. Charakteryzują się one dużą prostotą, niezawodnością, niskimi kosztami i wymagają niewielkiej ilości zawieszin. Bazą obliczeń jest sposób zaproponowany przez Sørensen i wsp. [2], rozwinięty w [3,9] i przedstawiony w skrócie w pierwszej części

niejszego opracowania. Najważniejszą jego zaletą jest to, że pozwala on traktować łącznie proces filtracji i następującej po nim kompresji osadu. Oprócz tego umożliwia on znalezienie momentu zakończenia filtracji i precyzyjną ocenę dodatkowego odwodnienia w strefie kompresji.

Literatura

1. **Kocurek J., Palica M.:** *Rozdzielanie zawiesin ciał stałych w cieczach na drodze filtracji z kompresją tworzonego osadu. I. Teoretyczny opis filtracji z równoczesną kompresją osadu* Rocznik Ochrony Środowiska, t. 4, Koszalin 2002.
2. **Sørensen P.B., Moldrup P., Hansen J.:** *Filtration and Expression of Compressible Cakes* Chem. Engng Sci. 51, 967÷978, 1996.
3. **Palica M., Kocurek J.:** *Wybrane zagadnienia teorii filtracji i kompresji osadów* Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2001.
4. **Palica M., Kocurek J.:** *Badanie strefy kompresji ściśliwych osadów filtracyjnych* Raport merytoryczny pracy BW 528/RCh-5/97, Instytut Inżynierii Chemicznej i Budowy Aparatury Pol. Śl., praca niepublikowana, Gliwice 1997.
5. **Ruth B.F., Montillon G.H., Montonna R.A.:** *Studies in Filtration* Ind. Engng Chem., 25, 75, 1933.
6. **Moldrup P., Yamaguchi T., Hansen J. Aa., Rolston D. E.:** *An Accurate And Numerically Stable Model for One-dimensional Solute transport in Soil* Soil Sci., 153, 261, 1992.
7. **Mróz W., Zabłocki J.:** Wzór Użytkowy W - 98256
8. **Mróz W., Palica M., Zabłocki J.:** Patent P – 298268
9. **Kocurek J.:** *Badanie strefy kompresji ściśliwych placków filtracyjnych* Rozprawa doktorska, praca niepublikowana, Gliwice 2000.
10. **Palica M., Jaschik M., Waluś J., Buzek J.:** *Odwadnianie zawiesin gipsów poneutralizacyjnych otrzymanych w różnych stanach technologicznych procesu, cz. I: Filtracja ciśnieniowa* Ochr. Pow. i Probl. Odp., 3, 75, 1998.

Spis ważniejszych oznaczeń

C	$[m^3/m^2]$	stała równania filtracji constant in filtration equation
c_A	$[kg/m^3]$	masa suchego placka otrzymanego wraz z jednostką objętości osadu dry solid mass in a cake with reference to the filtrate capacity
e	$[m^3/m^3]$	przestrzeń swobodna, stosunek objętości cieczy do ciała stałego void ratio, volume of liquid per volume of solid
e_0	$[m^3/m^3]$	przestrzeń swobodna w osadzie przy ciśnieniu kompresji 0 [Pa] void ratio at zero compression pressure
e_z	$[m^3/m^3]$	przestrzeń swobodna w zawieszinie void ratio of suspension

F	[m ²]	powierzchnia przegrody filter medium area
K	[m ² /s]	stała równania filtracji constant in filtration equation
l	[m]	wysokość słupa zawiesiny w filtrze testowym na początku procesu thickness of the filtration cell load
l_{pl}	[m]	grubość osadu cake thickness
m_c	[kg]	masa cieczy mass of liquid
m_s	[kg]	masa ciała stałego mass of solid
n		ilość warstw na które podzielony jest ładunek filtra number of cake layers in numerical calculations
P_a	[Pa]	przelicznik skali dla ciśnienia kompresji pressure scale factor
P_c	[Pa]	ciśnienie całkowite total pressure
P_k	[Pa]	ciśnienie kompresji (ciśnienie kontaktowe) compression pressure (contact pressure)
q_c	[m/s]	liniowa prędkość przepływu cieczy względem przegrody liquid velocity in a cake with respect to the filter medium
q_s	[m/s]	liniowa prędkość przemieszczania się ciała stałego względem przegrody solid velocity in a cake relatively to the filter medium
R_p	[1/m]	opór przegrody filter medium resistance
s		współczynnik ściśliwości placka cake compression coefficient
u	[m/s]	prędkość przepływu cieczy względem ciała stałego filtrate velocity with respect to the solid in a cake or filter medium
V	[m ³]	objętość filtratu filtrate volume
V_c	[m ³]	objętość cieczy liquid volume
V_s	[m ³]	objętość ciała stałego solid volume
V_z	[m ³]	objętość zawiesiny suspension volume
w	[kg/kg]	udział masowy ciała stałego solid mass fraction
w_{pl}	[kg/kg]	udział masowy ciała stałego w plačku solid mass fraction in the cake
w_z	[kg/kg]	udział masowy ciała stałego w zawieszynie solid mass fraction in the suspension

Litery greckie

α	[1/m ²]	opór osadu filter cake resistance
α_0	[1/m ²]	graniczny opór osadu przy ciśnieniu kompresji 0 [Pa] filter cake resistance at zero compression pressure
α_m	[m/kg]	masowy opór osadu filter cake resistance corresponding to cake mass
β		współczynnik podatności porowatości osadu na ciśnienie form factor for compressibility with respect to the porosity
ε	[m ³ /m ³]	porowatość, objętość cieczy do objętości całkowitej filter cake porosity
ε_0	[m ³ /m ³]	porowatość osadu przy ciśnieniu kompresji 0 [Pa] filter cake porosity at zero compression pressure
η	[Pas]	współczynnik dynamiczny lepkości filtratu dynamic viscosity of liquid
ρ_s	[kg/m ³]	gęstość ciała stałego solid density
ρ_f	[kg/m ³]	gęstość filtratu filtrate density
ρ_z	[kg/m ³]	gęstość zawiesiny suspension density
τ	[s]	czas time
$\Delta\tau$	[s]	krok czasu time step
ϕ		dodatkowe odwodnienie osadu additional filter cake dewatering
ω	[m]	wymiar liniowy we współrzędnych materiałowych linear dimension in material co-ordinates
ω_{cal}	[m]	całkowita grubość zawartości filtru we współrzędnych materiałowych filter load thickness in material co-ordinates
$\Delta\omega$	[m]	krok w przestrzeni współrzędnych materiałowych space step in material co-ordinates

Separation Of Solid-Liquid Suspension Using Filtration with Cake Compression II. Determination of Filtration Parameters of Suspensions and the Experimental Verification of the Model

Abstract

The method of investigations and calculations of filtration and compression of sediments, which allows to predict final moisture content of the filter cake. Since it is based on the basic relationships (dependences) concerning the flow through the porous bed, the interpretation of the process of suspensions dewatering is correct from the physical point of view. The basis for obtainment of correct results are tests of pressure filtration and compression guided on laboratory experimental stand, for example as the one presented in this paper. The tests guided on this stand are characterized with large simplicity, reliability, low costs and they require small amounts of suspensions.

The tests described in this paper were guided on a experimental stand equipped with test pressure filter [7,8]. Apart from the pressure filter the experimental stand is equipped with weighted lever by weights, producing through the system of the stress transfer pressure the test device. The system is measured by linear displacement transducer, measuring the change of placement of the piston in the filter as well as the pressure sensor, measuring overpressure inside the filter in relation to the ambient pressure. Both sensors pass on the signals to the computer, which processes them into sets of suitable data. The diagram of experimental stand is shown in Fig. 2.1.

The basis of calculations is method proposed by Sørensen and co-workers [2], developed in [3,9] and introduced in short in first part of this study. The most important advantage of this method is, that it allows to treat adjunctly process of filtration and the following after it compression of the sediments. Moreover it makes possible to find moment of filtration end and to estimate precisely additional dewatering in the compression zone.

Presented model was verified using three differing suspensions differing considerably by physicochemical properties [9]. Two suspensions: of non-oxidized gypsum and oxidized with pause during absorption [10], coming from the installation of desulphurization of the flue gas using the lime method. The third suspension comes from the installation of soda production in Inowrocław Chemical Works. Sediments created by those suspensions were characterized by compliance to pressure: from small (like the case of the oxidized gypsum from the desulphurization) – up to very big, for suspension from production of soda.