



Testy filtracji ciśnieniowej zawiesiny odpadowej z odmulnika DORRa

Michał Palica, Wiesław Spyrka, Malwina Adamczyk
Politechnika Śląska, Gliwice

1. Wprowadzenie i cel pracy

W jednej z kopalń Jastrzębskiej Spółki Węglowej zawiesina odpadowa, zawierająca niewielką ilość węgla, kierowana jest z odstojnika DORRa na prasy filtracyjne, a celem tej operacji jest odzysk cieczy klarownej i zmniejszenie ilości uciążliwych odpadów. Wynika ona głównie z polityki ekologicznej i przepisów związanych z ochroną środowiska naturalnego. Głównym problemem technicznym filtracji prowadzonej na prasach jest jej wolny przebieg, który wynika z drobnego uziarnienia odwadnianych odpadów. Dlatego rozważana jest przez służby technologiczne koncepcja zwiększenia ciśnienia procesowego, by przyspieszyć filtrację. Celem pracy było stwierdzenie, czy taki sposób jest uzasadniony, a ponadto, czy proces zachodzi zgodnie z teorią filtracji [1, 2] i czy użyta metodyka badawcza jest wystarczająco precyzyjna, by na podstawie skróconych testów wyznaczyć tzw. parametry filtracyjne, niezbędne do modelowania procesu [3÷8]. Przyjęto, by prowadzić testy w zakresie różnicy ciśnień $\Delta P \approx 0,5 \div 1,5$ MPa. Użycie niższych wartości ΔP wiąże się zwykle z nieuniknionymi błędami pomiarowymi, związanymi z tar-

ciem osadu o ściany cylindra pomiarowego, zaś ciśnienia przekraczające 2 MPa są technicznie rzadko stosowane, a zakres około 3-krotnej zmiany ΔP jest wystarczający w tego typu badaniach.

2. Metodyka badań i obliczenia

Metodyka badań i aparatura pomiarowa zostały szczegółowo opisane we wcześniejszych [2÷8] pracach, a w prezentowanych badaniach jedynymi zmianami aparaturowymi było wprowadzenie ogranicznika przesuwu tłoka w cylindrze i użycie w fazie mieszania wstępnego w pojemnikach mieszadła elektrycznego z regulacją liczby obrotów. Zawieszona flotokon-centratu w odmulniku w fazie jego zasilania zawierała 70 g flokulantu Magnafloc 336/1 Mg suchego ciała stałego (którym były ziarna węgla z flotokoncentratu) i można było założyć, że flokulant został wyprowadzony z flotokoncentratem, a zawieszina odpadowa praktycznie nie zawierała flotokoncentratu. Odpady (szlam) charakteryzowały się stosunkowo dużą zawartością ciała stałego. Zestawienie parametrów fizycznych zawiesiny odpadowej podano w tabeli 1, przy czym jedyną z wielkości, która nie była zmierzona, a obliczona z zależności (1)

$$\rho_s = \frac{u_z}{\frac{1}{\rho_z} - \frac{1-u_z}{\rho_f}} \quad (1)$$

była gęstość ciała stałego. Może się ona nieznacznie różnić od wartości rzeczywistej ze względu na nakładające się błędy oznaczeń u_z , ρ_z i ρ_f , ale parametr ten ma jedynie charakter informacyjny i nie jest potrzebny do modelowania procesu odwodnienia [2, 10]. Zbliżoną do obliczonej w ten sposób wartości $\rho_s \approx 1963 \text{ kg/m}^3$ (tabela 1) ma ziemia gliniasta wilgotna ($\rho = 1960 \text{ kg/m}^3$ [9]), co sugeruje, że ciało stałe w zawieszinie odpadowej stanowi mieszaninę gliny, ilów i węgla. Potwierdzeniem tej sugestii jest mikroskopowy obraz zawiesiny zagęszczonych odpadów z odmulnika DORRa, pokazany w pracy [4] w postaci kolorowej fotografii, na którym zdecydowaną przewagę nad innymi składnikami ma glina (kolor żółty).

W skrócie metodyka badań polegała na poddaniu badanej zawiesiny testom filtracji ciśnieniowej w możliwie szerokim zakresie ΔP . Dla tej zawiesiny określano zawartość ciała stałego i jej gęstość. Testy prowadzono przy czterech wartościach ΔP do momentu, gdy nie obserwowano

już wypływu filtratu z utworzonego osadu (a więc do strefy stabilizacji). Dla takiego osadu określano jego wilgotność, zaś dla uzyskanego filtratu zawartość soli i gęstość. Celem testów było wyznaczenie stałych K i C charakterystyk filtracji. Na podstawie tych danych można wyliczyć porowatość osadu, opór właściwy, opór tkaniny (PT – 912) i wilgotność w funkcji wywieranego ciśnienia. Wszystkie te badania prowadzono zgodnie z obowiązującymi normami i zasadami, w tym gęstości oznaczano piknometrycznie, a wilgotności i udziały masowe metodą wagową z suszeniem. Uzyskane wyniki wilgotności osadu dotyczą sumy zawartości ciała stałego i soli, natomiast udział masowy soli w filtracie, pozwalający odnieść wilgotność tylko do ciała stałego, został określony dla klarownego filtratu, czyli przy założeniu, że klarowny filtrat nie zawiera ziaren ciała stałego (ponieważ ilość soli w filtracie jest niewielka, wilgotności osadu bez uwzględnienia zawartości soli i z poprawką na jej zawartość są zbliżone). Podaje to zależność (2):

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

3. Opis parametrów procesu filtracji ciśnieniowej

Prostoliniowe odcinki charakterystyk filtracji opisywano równaniem:

$$\frac{V}{F} = K \frac{\tau}{V/F} + C \quad (3)$$

wymagającym spełnienia założeń teorii filtracji osadowej ([1]).

Wilgotność osadu określa równanie:

$$w_{pl} = e^{A \cdot \Delta P^B} + C_1 \quad (4)$$

a porowatość:

$$\varepsilon = \frac{1 - u_{pl}}{1 - \frac{u_{pl}}{u_z} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_z} \right)} \quad (5)$$

W zależności (5) poszczególne wielkości wyznaczano z zależności [2]:

$$u_{pl} = 1 - w_{pl} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \Delta P}{K \cdot z \cdot \eta} \quad (7)$$

$$z = \frac{u_z \cdot w_{pl}}{\hat{\varepsilon} \cdot (1 - u_z - w_{pl})} \quad (8)$$

$$\hat{\varepsilon} = 0,8 \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Zgodnie z [10] i [11] porowatość i opór właściwy osadu opisują funkcje:

$$(1 - \varepsilon) = (1 - \varepsilon_0) \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{0,005}\right)^\beta \quad \Delta P \text{ MPa} \quad (10)$$

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{0,005}\right)^{s_{\pi}} \quad \Delta P \text{ MPa} \quad (11)$$

Niezależnie od tych wielkości wyliczono dla użytych wartości ΔP opór tkaniny

$$R_p = \frac{C \cdot \Delta P}{K \cdot \eta} \quad (12)$$

a zmianę oporów tkaniny przy zmieniającej się różnicy ciśnień ΔP opisa-
no wzorem:

$$R_p = A_p + B_p \cdot \Delta P \quad (13)$$

Wyznaczono również współczynnik ściśliwości z zależności Spe-
ry'ego:

$$K = \frac{2 \cdot \Delta P^{1-s_s}}{u_z \cdot \rho_z \cdot \alpha' \cdot \eta} = A_1 \cdot \Delta P^{1-s_s} \quad (14)$$

Przyjmując, że dla badanej zawiesiny u_z i ρ_z były niezmiennie, a ba-
dania prowadzono w stałej temperaturze ($t_{ot} = 20^\circ\text{C}$), dla której
 $\eta = 0,001 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, można opisać $\ln K$ jako funkcję liniową w układzie
podwójnie logarytmicznym:

$$\ln K = \ln A_1 + (1 - s_s) \cdot \ln \Delta P \quad (15)$$

i wyznaczyć eksperymentalnie s_s . Wymaga to jednak spełnienia zależności Sperry'ego:

$$\alpha = \alpha' \cdot \Delta P^{s_s} \quad (16)$$

Zalecanym sposobem wyznaczenia s_s jest skorzystanie ze zmodyfikowanej stałej K' :

$$K' = K \cdot u_z \cdot \rho_z \quad (17)$$

i wyrównywanie danych podobnie jak zależnością (15):

$$\ln K' = \ln A_2 + (1 - s_s) \cdot \ln \Delta P \quad (18)$$

przy czym zależność $K' = f(\Delta P)$ ma postać pierwotną:

$$K' = A_2 \cdot \Delta P^{1-s_s} \quad (19)$$

4. Wyniki badań i obliczeń

Parametry fizyczne zawiesiny zestawiono w tabeli 1, zaś dane z testów na filtrze ciśnieniowym oraz obliczeń wielkości niezbędnych w modelowaniu procesu przedstawiono w tabeli 2.

Zestawienie stałych i wykładników równań (4), (10), (11), (12) i (14) zamieszczono w tabeli 3.

Na ich podstawie sporządzono w odpowiednich układach współrzędnych rysunki 1÷6. Ponadto w tabeli 4 podano wybrane dane analizy ziarnowej, wykonanej na analizatorze Analysette – 22 firmy Fritsch.

u_z	kg/kg	0,2592
ρ_z	kg/m ³	1162,23
ρ_s	kg/m ³	1962,95
ρ_f	kg/m ³	1008,37
u_s	kg/kg	0,01541
pH	–	7,3

Tabela 1. Parametry fizyczne zawiesiny odpadowej
Table 1. Physical parameters of waste suspension

Tabela 2. Zestawienie danych z testów filtracji ciśnieniowej**Table 2.** Data of pressure filtration tests

ΔP MPa	$K \cdot 10^4$ m^2/s	$K' \cdot 10^2$ $kg/(m \cdot s)$	$C \cdot 10^2$ m^3/m^2	w_{pl} kg/kg	u_s kg/kg	ε m^3/m^3	$\alpha \cdot 10^{-11}$ $1/m^2$	$R_p \cdot 10^{-11}$ $1/m$
0,4470	0,3297	0,0099	-1,5537	0,2181	0,01563	0,3519	7,057	2,1065
0,6328	0,3976	0,0120	-1,7363	0,2109	0,01706	0,3422	8,366	2,7634
1,1915	0,5126	0,0154	-2,5298	0,1979	0,01539	0,3245	12,575	5,8803
1,5703	0,5615	0,0169	-2,0953	0,1885	0,01588	0,3114	15,840	5,8597

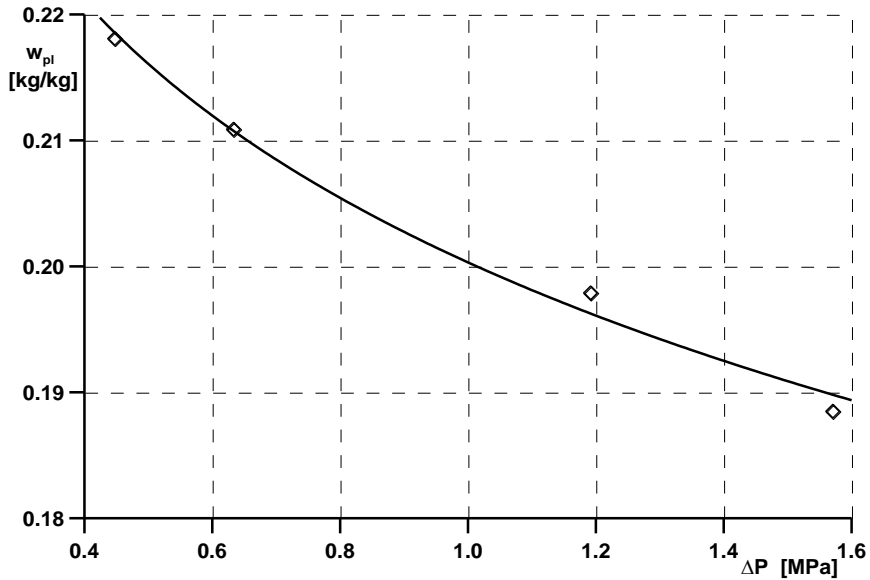
Tabela 3. Zestawienie stałych i wykładników równań opisujących zmianę parametrów filtracyjnych z ciśnieniem**Table 3.** Constants and exponents in equations describing the change of filtration parameters with pressure

Wielkość i równanie	w_{pl} kg/kg (4)	ε m^3/m^3 (10)	α $1/m^2$ (11)	R_p $1/m$ (13)	K m^2/s (14)	K' $kg/(m \cdot s)$ (19)
Stała (stałe)	$A = -0,4761$ $C = -0,4210$	$\varepsilon_0 = 0,4768$	$\alpha_0 = 3,339 \cdot 10^{12}$	$A_p = 3,998 \cdot 10^{11}$ $B_p = 0,241 \cdot 10^{11}$	$A_1 = 0,4712$	$A_2 = 1,4178$
Wykładnik	$B = 0,0780$	$\beta = 0,0473$	$s_{TL} = 0,6679$	–	$s_s = 0,5796$	$s_s = 0,5795$
R^2	0,9911	0,9903	0,9933	0,9510	0,9934	0,9923

Tabela 4. Wybrane dane z laserowego analizatora ziarnowego ANALYSETTE – 22

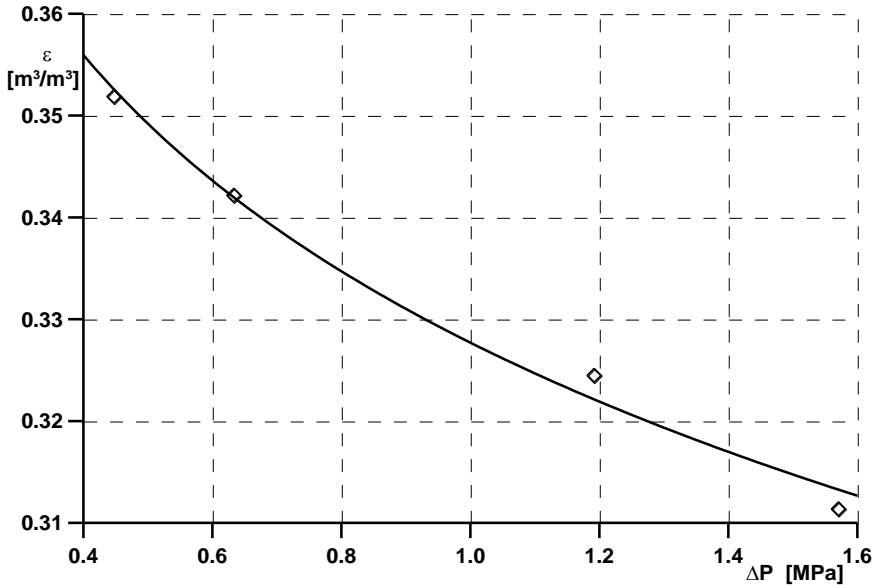
Table 4. Selected data obtained in laser particle analyser ANALYSETTE – 22

Ilość ziaren o średnicy	< 1 μm	< 2 μm	< 3 μm	< 4 μm	< 5 μm
% obj.	11,06	26,86	37,64	45,26	51,25
Ilość ziaren o średnicy	< 8 μm	< 10 μm	< 20 μm	< 30 μm	< 40 μm
% obj.	64,93	71,92	91,91	98,35	99,96
$d_{32} = 2,29 \mu\text{m}, \quad a = 2,62 \text{ m}^2/\text{cm}^3$					



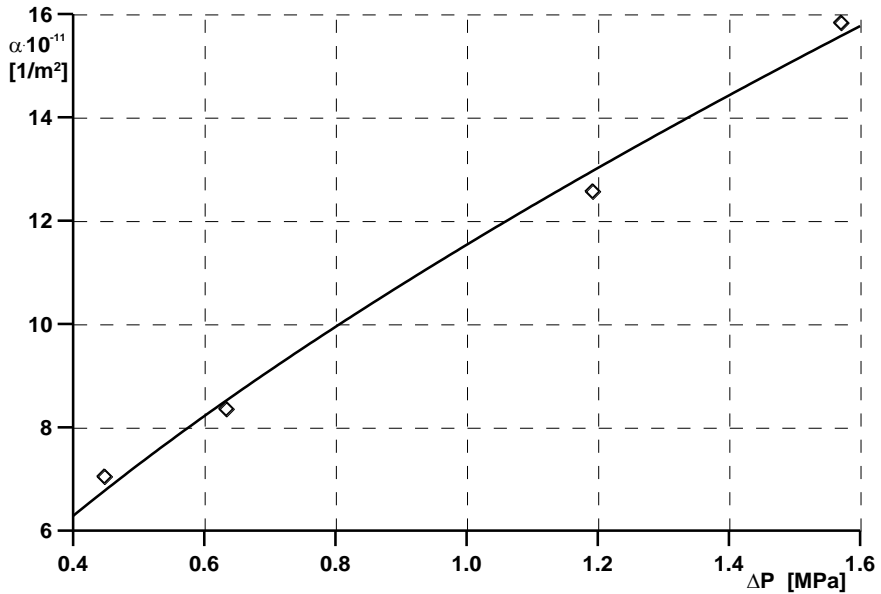
Rys. 1. Zależność $w_{pl} = f(\Delta P)$ wg (4)

Fig. 1. Relationship $w_{pl} = f(\Delta P)$ acc. (4)



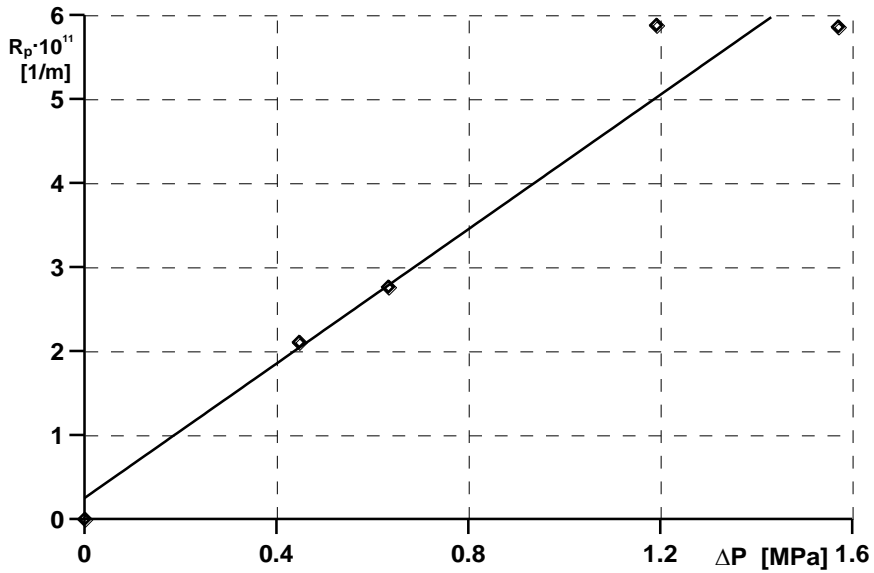
Rys. 2. Zależność $\varepsilon = f(\Delta P)$ wg (10)

Fig. 2. Relationship $\varepsilon = f(\Delta P)$ acc. (10)



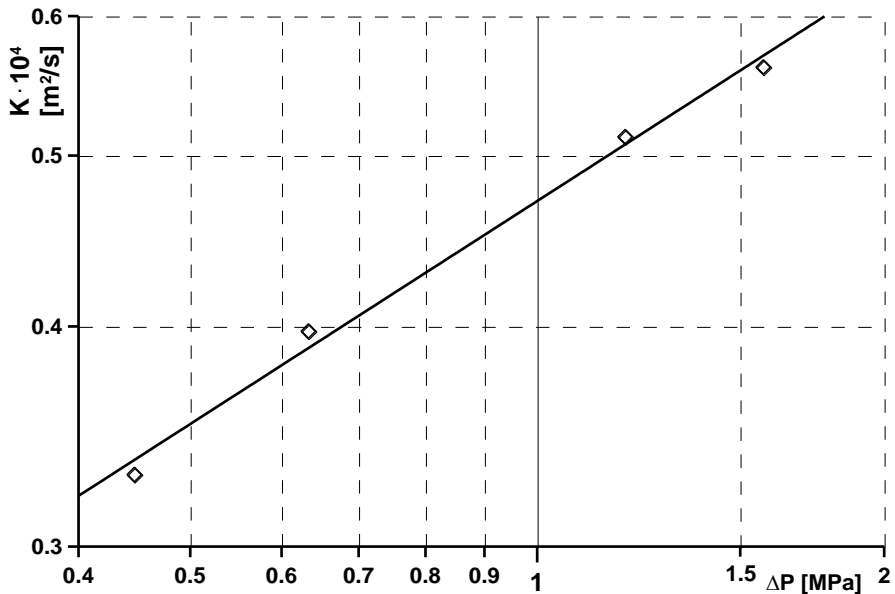
Rys. 3. Zależność $\alpha = f(\Delta P)$ wg (11)

Fig. 3. Relationship $\alpha = f(\Delta P)$ acc. (11)



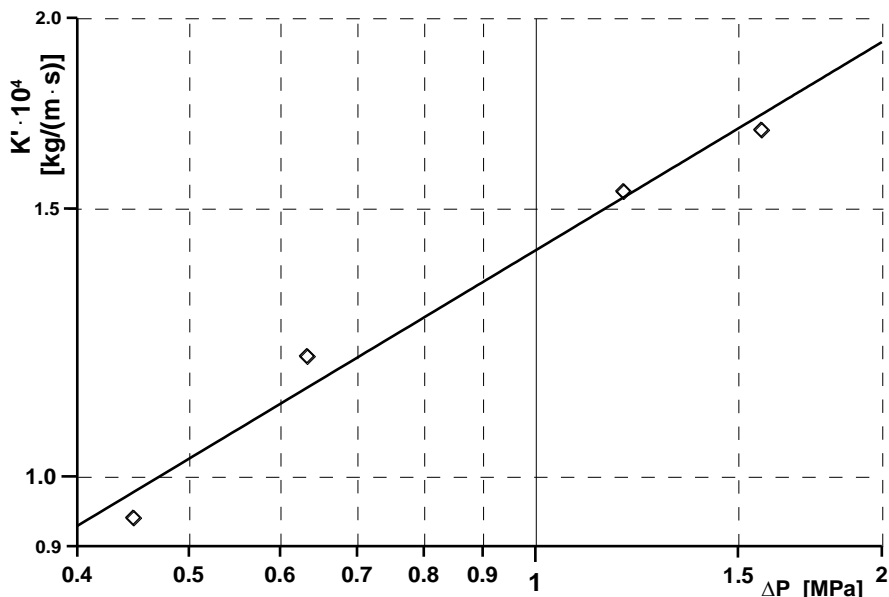
Rys. 4. Zależność $R_p = f(\Delta P)$ wg (13)

Fig. 4. Relationship $R_p = f(\Delta P)$ acc. (13)



Rys. 5. Zależność $K = f(\Delta P)$ wg (14)

Fig. 5. Relationship $K = f(\Delta P)$ acc. (14)



Rys. 6. Zależność $K' = f(\Delta P)$ wg (19)

Fig. 6. Relationship $K' = f(\Delta P)$ acc. (19)

5. Omówienie wyników badań

Jak wskazują dane tabeli 3, podczas wyrównywania danych dot. K , K' , w_{pl} , ε i α uzyskano wysoką zgodność doświadczeń z wielkościami opisywanymi ($R^2 > 0,99$), jedynie dla R_p (oporów tkaniny) wartość R^2 było nieco mniejsza ($R^2 = 0,951$). Świadczy to o właściwym doborze odpowiednich funkcji (w tym empirycznych) i staranności prowadzonych doświadczeń. Równocześnie badania pozwoliły na ocenę dodatkowego odwodnienia osadu podczas filtracji ciśnieniowej przy zwiększeniu ciśnienia procesowego z 0,9 MPa na 1,1 MPa. Otóż zależność na ilość uzyskanego filtratu G_f w stosunku do ilości ciała stałego G_s ma postać [12]:

$$\frac{G_f}{G_s} = \frac{1}{u_z} - \frac{1}{1 - w_{pl}}. \quad (20)$$

Dla $\Delta P = 0,9$ MPa i $\Delta P = 1,1$ MPa z zależności (4) obliczono

$$(w_{pl})_{0,9} = 0,2026 \text{ i } (w_{pl})_{1,1} = 0,1970$$

Ponieważ $u_z = 0.2592$, toteż

$$\left(\frac{G_f}{G_s}\right)_{0,9} = \frac{1}{0,2592} - \frac{1}{1-0,2026} = 3,8580 - 1,2541 = 2,6039$$

$$\left(\frac{G_f}{G_s}\right)_{1,1} = \frac{1}{0,2592} - \frac{1}{1-0,1970} = 3,8580 - 1,2453 = 2,6127$$

Zatem dodatkowe odwodnienie w wyniku zwiększenia ciśnienia z 0,9 MPa do 1,1 MPa w stosunku do stanu obecnego (0,9 MPa) wyniesie:

$$(2,6127 - 2,6039)/2,6039 = 0,00338 \approx 0,34\%$$

Efekt lepszego odwodnienia wskutek zwiększonego ciśnienia jest tak mały, że poddaje w wątpliwość użycie takiej metody. Przyczyną tego jest zarówno małe uziarnienie (przykładowo, ponad 51% ziaren poniżej 5 μm), ale również duża podatność osadu na ciśnienie kompresji – współczynnik ściśliwości wg Spery’ego $s_s \approx 0,580$, wg Tillera i Leu $s_{TL} = 0,668$. Dla tak dużych wartości s efekt zwiększania ciśnienia jest na ogół niewielki. Ponadto znaczący efekt odwodnienia uzyskuje się dla zawiesiny pierwotnej o niewielkiej zawartości ciała stałego (niskiej wartości u_z). Dla szlamów (wysokich u_z) nawet znaczące ich odwodnienie (uzyskanie niskich w_{pl}) tylko w ograniczonym stopniu przekłada się na dodatkowy odzysk filtratu.

6. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że:

- szlam z odmulnika Dorra filtruje się zgodnie z modelem klasycznej filtracji osadowej,
- ilość testów przy starannej ich realizacji może być niewielka i wystarczać do opisu i modelowania procesu odwodnienia,
- uzyskane na podstawie testów i oznaczeń dane pozwalają na interpolację i ekstrapolację wyników dot. stałej filtracji K i K' , porowatości osadu, jego wilgotności, oporu właściwego i oporów tkaniny w zależności od różnicy ciśnień ΔP ,
- zwiększenie ciśnienia filtracji skutkuje jedynie niewielkim (ok. 0,34%) wzrostem uzysku filtratu i z technicznego punktu widzenia wydaje się niecelowe. Oznacza to, że wskazane jest przed podjęciem ewentualnych decyzji technicznych przeprowadzić skrócone badania

uzasadniające decyzję, a nie opierać się wyłącznie na intuicji, która nie podaje informacji ilościowych.

Spis oznaczeń

- a – jednostkowa powierzchnia właściwa, m^2/cm^3
 – specific surface area, m^2/cm^3
- d_{32} – średnica Sautera, μm
 – Sauter diameter, μm
- s_s – współczynnik ściśliwości osadu wg Spery’ego
 – cake compressibility coefficient acc. Spery
- s_{TL} – współczynnik ściśliwości osadu wg Tillera i Leu
 – cake compressibility coefficient acc. Tiller and Leu
- u_{pl} – udział masowy ciała stałego w placku, kg/kg
 – solid phase fraction in cake, kg/kg
- u_s – udział masowy rozpuszczonych soli w klarownym filtracie, kg/kg
 – mass fraction of the salts dissolved in clarified filtrate, kg/kg
- u_z – udział masowy ciała stałego w zawieszynie, kg/kg
 – solid phase fraction in suspension, kg/kg
- w_{pl} – wilgotność placka, kg/kg
 – cake moisture content, kg/kg
- w_{pl}^* – wilgotność placka skorygowana o zawartość soli, kg/kg
 – cake moisture content considering salts, kg/kg
- z – parametr opisany zależnością (8)
 – parameter described by eq. (8)
- A, A_1 , A_2 , A_p – stałe równań (4), (14), (19) i (13)
 – constants in eqs. (4), (14), (19) and (13)
- B, B_p – stałe równań (4) i (13)
 – constants in eqs. (4) and (13)
- C, C_1 – stałe równań (3) i (4)
 – constants in eqs. (3) and (4)
- F – powierzchnia filtracji, m^2
 – filtration area, m^2
- G_f – masa filtratu, kg
 – filtrate mass, kg
- G_s – masa ciała stałego, kg
 – mass of solid, kg
- K – stała filtracji, m^2/s
 – filtration constant, m^2/s
- K' – zmodyfikowana stała filtracji, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

	– modified filtration constant, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
ΔP	– różnica ciśnień, MPa – pressure difference, MPa
R_p	– opór tkaniny filtracyjnej, $1/\text{m}$ – resistance of filter, $1/\text{m}$
V	– objętość filtratu, m^3 – filtrate volume, m^3
α	– opór właściwy osadu, $1/\text{m}^2$ – specific resistance of cake, $1/\text{m}^2$
α'	– współczynnik proporcjonalności w zależności (16) – proportionality coefficient in eq. (16)
α_0	– współczynnik proporcjonalności w zależności (11) – proportionality coefficient in eq. (11)
β	– współczynnik podatności porowatości osadu na ciśnienie – cake porosity susceptibility coefficient on pressure
ε	– porowatość osadu, m^3/m^3 – cake porosity, m^3/m^3
ε_0	– porowatość graniczna, m^3/m^3 – limiting porosity, m^3/m^3
$\hat{\varepsilon}$	– porowatość przy 80% ciśnienia filtracji, m^3/m^3 – porosity at 80% filtration pressure, m^3/m^3
η	– dynamiczny współczynnik lepkości filtratu, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ – filtrate dynamic coefficient of viscosity, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
ρ_f	– gęstość filtratu, kg/m^3 – filtrate density, kg/m^3
ρ_s	– gęstość ciała stałego, kg/m^3 – solid phase density, kg/m^3
ρ_z	– gęstość zawiesiny, kg/m^3 – suspension density, kg/m^3
τ	– czas filtracji, s, min – filtration time, s, min

Literatura

1. **Żużikow W.A.:** *Filtracja. Teoria i praktyka rozdzielania zawiesin*, tłum. z jęz. ros., WNT, Warszawa 1985
2. **Palica M., Kocurek J.:** *Wybrane zagadnienia teorii filtracji i kompresji osadów*, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2001

3. **Palica M., Kocy G., Kurowski L., Pławecka A.:** *Wpływ zawartości flokulantu Magnafloc 336 na przebieg filtracji ciśnieniowej kopalnianej zawiesiny zrzutowej po wirówkach BIRD'a*, Rocznik Ochrony Środowiska, Tom 10, 301, 2008
4. **Adamczyk M.:** *Wpływ ultradźwięków na wilgotność osadów po filtracji ciśnieniowej zawiesiny węglowej z dodatkiem flokulantu*, Praca dyplomowa magisterska (do użytku wewnętrznego), Pol. Śl., Gliwice 2010
5. **Palica M., Gierczycki A., Berny K., Wojtowicz M.:** *Filtracja ciśnieniowa zagęszczonej zawiesiny węglowej z odmulnika DORRa*, Karbo, Tom 3, 146, 2010
6. **Palica M., Spyrka W.:** *Dobór dawki flokulantu Magnafloc 336 do kopalnianej zawiesiny zrzutowej po wirówkach BIRD'a*, Karbo, 3, 142, 2008
7. **Palica M., Kocurek J., Szymczyk S.:** *Modelowanie rozdziału flotokonzentratu węgla kamiennego na bazie parametrów filtracyjnych*, Rocznik Ochrony Środowiska, Tom 8, 215, 2006
8. **Palica M.:** *Badania filtracji w skali laboratoryjnej*, Chemik, 6, 307, 2005
9. **Palica M., Raczek J. i inni:** *Pomoce projektowe z inżynierii chemicznej i procesowej*, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2010
10. **Sørensen P.B., Moldrup P., Hansen J.:** Chem. Eng. Sci., 51, 967, 1996
11. **Tiller F.M., Leu W.F.:** J. Chinese Ins. Chem. Eng., 11, 61, 1980
12. **Chmiel K., Palica M.:** *Stopień odwodnienia zneutralizowanych zawiesin pogalwanicznych na drodze dekantacji wirowej*, Rocznik Ochrony Środowiska, Tom 6, 159, 2004.

Pressure Filtration Tests of Waste Suspension from DORR's Clarifier

Abstract

Research results dealing with pressure filtration and filtration parameters calculations for dump sludge taken from coal mine Dorr's clarifier are presented in the paper. The research aim was to check in the increasing of filtration pressure in a filter – press was justified in view of larger volume of clarified liquid and smaller amount of wet wastes. It was stated that due to high concentration of solid phase in suspension, low granulation and participation of clay, and relatively high compressibility coefficient, the filtration ran reluctantly and moreover the decrease of cake moisture content required high, not used in practice, filtration pressure. It is visible from experiments and calculations that

sludge from Dorr's clarifier filtrates according to classical filtration model with cake formation. The employed experimental method is so precise that a number of filtration test, sufficient for the description of separation process, can be small and the obtained data may be interpreted and extrapolated in used in practice technical conditions. The pressure increase even of 50% in relation to the one used now – a – day results in a little improvement of phase separation and therefore is useless from technical point of view. Moreover, the application of such method should be based on quantitative conditions and not on intuition.

