



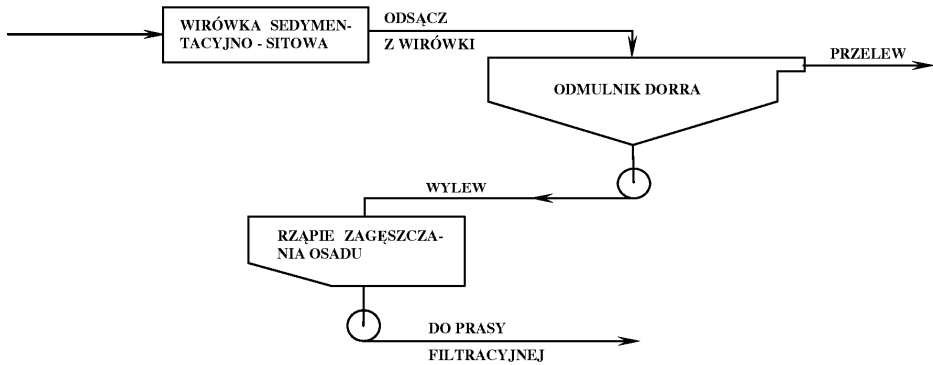
Odwadnianie szlamu węglowego na drodze periodycznej filtracji wirowej

Michał Palica, Karolina Wątor, Jan Thullie, Łukasz Kurowski
Politechnika Śląska, Gliwice

1. Wstęp

W jednej z kopalń węgla kamiennego odwadnianie zawiesiny z wirówek sedymentacyjno-sitowych polega na podawaniu odsącza do odmulnika DORR'a, skąd szlam kierowany jest na prasy filtracyjne typu PF – ROW, a proces filtracji prowadzony jest przy ciśnieniu roboczym 6 bar. W wyniku odwadniania uzyskuje się osad o wilgotności 36÷37%. Dane technologiczne przewidują, że zagęszczony wylew z odmulnika DORR'a zawiera 250÷300 g/dm³ ciała stałego, a przelew zawracany do obiegu zawiera 2÷4 g/dm³ ciała stałego, będącego wg danych [1] w ok. 81,5% węglem, a więc ciało stałe stanowi cenny surowiec energetyczny. Problemem technicznym znanych technik odwadniania takich szlamów jest ich drobne uziarnienie, dlatego rozważono zmianę sposobu odwadniania na periodyczną filtrację wirową, a ideą badań było stwierdzenie, czy w czasie takiej filtracji uzyskuje się zbliżone wilgotności końcowe osadów. Potwierdzenie takiej tezy dla periodycznej filtracji wirowej mogłoby stanowić asumpt do zmiany technologii odwadniania w kierunku filtracji wirowej ciągłej, dla której wprawdzie koszty inwestycyjne takich wirówek są bardzo wysokie, ale zdecydowanie mniejsze są koszty robocizny. Oczywiście o ewentualnym wyborze sposobu odwadniania musiałby decydować rachunek ekonomiczny.

Schemat węzła technologicznego zamieszczono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat węzła odwadniania po wirówkach sedymentacyjno-sitowych
Fig. 1. Scheme of dewatering centre after sedimentation-screen centrifuges

2. Cel i zakres badań

Celem badań było eksperymentalne ustalenie głębokości odwodnienia na drodze periodycznej filtracji wirowej w skali laboratoryjnej wylewu z odstojuka DORR'a, kierowanego poprzez rząpie do prasy filtracyjnej i porównanie uzyskanych wyników z wilgotnością po prasach filtracyjnych. Przewidywany zakres zmienności czasu wirowania wynosił $\tau = 4\div 30$ min, natomiast współczynnik uwielokrotnienia $a/g = 174,5\div 1786,8$ (wynikał on z możliwości osiągnięć laboratoryjnej wirówki MPW-340 adaptowanej do warunków filtracji wirowej, czyli liczby obrotów, przy których nie obserwowano nad osadem warstwy cieczy klarownej, równych w przybliżeniu 1250 1/min do maksymalnej liczby obrotów wynoszących 4000 1/min). Do zawiesiny poddanej wirowaniu nie dodawano powtórnie flokulantu – flokulant był podawany do strumienia koncentratu przed wirówką sedymentacyjno-sitową. Z dość dużą pewnością można tu podać, że odsącz z wirówki, szlam po odmulniku DORR'a i zagęszczony odsącz po rząpiach miał już m.in. z powodu wysokiej liczby obrotów wirówki i z tytułu działania pomp flokuły zdegradowane, stąd ewentualne dodawania nowej porcji flokulantu winno być zlokalizowane przed prasami, a więc bezpośrednio przed węzłem odwodnienia. Tematyka odwodnienia różnych strumieni kopalnianych była dotąd przedmiotem licznych badań, a dotyczyły one ogólnie różnych flokulantów, doboru tkaniny, modelowania rozdziału czy propozycji zmian tech-

nologii odwadniania strumieni o niewielkim udziale masowym ciała stałego o drobnym (mikronowym) uziarnieniu [2÷10]. Część tych prac dotyczyła filtracji czy dekantacji wirowej, część filtracji ciśnieniowej. W pracach tych oparto się na teoretycznych przesłankach opisu procesu filtracji podanego m.in. przez Żuzikowa [11], Kocha i Noworytę [12], Malinowską i wsp. [13] oraz w pracach [14÷19]. Liczne dane opublikowała również grupa badawcza kierowana przez Piecucha, w tym prace [20÷23], a zwłaszcza monografie [24] i [25] (bardziej obszerny przegląd prac tej grupy zacytowano w [26]).

Niniejsza publikacja omawia odwadnianie szlamu węglowego o stosunkowo wysokiej koncentracji ciała stałego (przekraczającej 20% masowych) na drodze periodycznej filtracji wirowej w skali laboratoryjnej, a dane pracy, jak wspomniano, mogą stanowić podstawę do ewentualnej zmiany filtracji z ciśnieniowej (na prasach) na wirową (wcześniejsze prace dotyczyły znacznie niższych udziałów masowych ciała stałego w zawieszynie, rzędu kilku procent [1÷10]).

3. Wyniki badań

Badaniom poddano szlam kierowany na prasy filtracyjne, pobrany tego samego dnia do dwu pojemników 60 dm³ w sposób losowy w odstępie ok. 1 godziny. Dane dla tych zawiesin zestawiono w tabeli 1, a zmierzono je zgodnie z obowiązującymi procedurami.

Tabela 1. Podstawowe dane dla zawiesin

Table 1. Basic data for suspensions

Wielkość	Pojemnik 1 (nadawa 1)	Pojemnik 2 (nadawa 2)
Gęstość zawiesiny ρ_z [kg/m ³]	1057,3	1056,7
Gęstość filtratu ρ_f [kg/m ³]	1003,2	1001,9
Udział masowy ciała stałego w zawieszynie u_z [kg/kg]	0,2237	0,2262
Udział masowy soli w filtracie u_s [kg/kg]	0,00973	0,00998
pH	7,13	7,28

Dane te zaczerpnięto z pracy źródłowej [27].

Wszystkie testy filtracji wirowej prowadzono na wirówce laboratoryjnej MPW – 340, adaptowanej we własnym zakresie do periodycznej

filtracji wirowej, przy użyciu wytypowanej we wcześniejszych badaniach tkaniny PT – 912. Tkanina ta charakteryzuje się relatywnie niskimi oporami, gwarantuje klarowny przesącz, a przede wszystkim daje dość wysoką wartość stałej K równania charakterystycznego filtracji

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

Testy filtracyjne prowadzono w dwu seriach (dla dwu nadaw) dla następujących czasów filtracji τ i współczynników uwielokrotnienia Φ : $\tau = 4, 7, 15, 20, 25, 30$ min, $\Phi = a/g = 174.5, 251.3, 342.0, 446.7, 565.3, 698.0, 844.5, 1005.1, 1368.0, 1786.8$.

Dla niektórych parametrów ruchowych obserwowano niecałkowite odwodnienie zawiesiny – nad utworzonym osadem pozostawała warstwa zawiesiny – punktów takich nie uwzględniano przy poszukiwaniu funkcji opisującej głębokość odwodnienia. Dotyczyło to najniższych liczb obrotów wirówki i krótkich czasów wirowania. Stąd do opracowania trójparametrowej funkcji

$$w = f(a/g, \tau) \quad (2)$$

wykorzystano w pierwszej wersji 50 uśrednionych punktów, a po przeanalizowaniu danych – 45 punktów (dla nadawy 1) oraz odpowiednio 47 i 45 punktów (dla nadawy 2).

Wilgotności osadu po wirowaniu określano jako średnią arytmetyczną z 4 oznaczeń (naczyń). W niektórych wypadkach obserwowano w jednym z naczyń mętny filtrat – wówczas do średniej wykorzystywano 3 oznaczenia (w wirówce MPW – 340 znajdują się 4 ramiona z wkładami, w których doszczelnienie między poboczną wkładu a tkaniną filtracyjną spoczywającą na siatce metalowej zapewniała gumowa uszczelka typu O-ring. Niewystarczające dociśnięcie uszczelki powodowało przechodzenie zawiesiny między ścianką cylindra a uszczelką, a efektem tego był mętny filtrat i zwykle nieco wyższa wilgotność osadu w danym wkładzie niż w pozostałych).

Przykład zestawienia danych pomiarowych zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie danych pomiarowych dla liczby obrotów wirówki
 $n = 4000$ [1/min] ($a/g = 1786,8$) dla nadawy 2**Table 2.** Setting-up of measurement data for rotational frequency of centrifuge
equal to $n = 4000$ [1/min]

Czas wirowania τ [min]	Grubość plačka [mm]	Ilość filtratu [cm ³]	Wilgotność plačka w [kg/kg]	Udział masowy ciała stałego w filtracie w_f [kg/kg]
4	14,0	37,5	0,4300	0,000561
	14,5	37,0	0,4310	0,000569
	15,0	37,5	0,4290	0,000571
	14,0	37,0	0,4298	0,000570
	średnia			0,4299
7	14,5	39,0	0,3730	0,000628
	15,0	38,0	0,3716	0,000628
	14,0	41,0	0,3744	0,000626
	14,5	38,0	0,3733	0,000627
	średnia			0,3731
15	14,5	41,0	0,3741	0,000626
	15,0	41,0	0,3719	0,000638
	15,0	39,5	0,3797	0,000620
	14,5	41,5	0,3644	0,000636
	średnia			0,3725
20	14,0	38,5	0,3734	0,000627
	14,5	38,0	0,3716	0,000628
	14,5	42,0	0,3629	0,000637
	15,0	41,5	0,3451 ^{*)}	0,000655
	średnia			0,3693
25	14,5	37,0	0,3796 ^{*)}	0,000620
	14,0	38,0	0,3688	0,000631
	15,0	38,5	0,3663	0,000634
	15,0	38,5	0,3697	0,000630
	średnia			0,3683
30	15,0	39,0	0,3725 ^{*)}	0,000627
	14,0	42,0	0,3692	0,000631
	14,5	41,0	0,3607	0,000639
	14,5	40,5	0,3679	0,000632
	średnia			0,3659

^{*)} – dotyczy oznaczeń, których nie uwzględniano w średniej

Dane tabeli 2 podają wilgotności bez uwzględnienia poprawki na zawartość soli w filtracie. Jak widać, przy podobnym stopniu napełnienia wkładów uzyskuje się zbliżone grubości osadów, a w miarę wydłużania czasu wirowania wzrasta ilość filtratu. Natomiast udział masowy ciała stałego w filtracie jest bardzo mały. Najbardziej istotne spostrzeżenie dotyczy malejącej wraz ze wzrostem τ wilgotności osadu. Analiza tabel pomiarowych pracy [27] wskazuje, że zmniejszenie wilgotności osadów występuje również w miarę wzrostu (a/g). Można tu wspomnieć, że korekty wilgotności ze względu na udział soli w filtracie zawartym w placuku można dokonać zależnością

$$w^* = \frac{w}{1 - w \frac{u_s}{1 - u_s}} \quad (3),$$

ale ze względu na niewielką ilość soli (rzędu 1%) wartości w^* niewiele się różnią od w . Pełny materiał doświadczalny znajduje się w [27]. Dane jak w tabeli 2 dotyczyły wspomnianych wartości a/g i dwu nadaw, a do opisu funkcji (2) zaproponowano wyrażenia

$$w = e^{A\tau^B} + C \quad \text{dla } a/g = \text{idem} \quad (4)$$

$$w = e^{A(a/g)^B} + C \quad \text{dla } \tau = \text{idem} \quad (5)$$

$$w = e^{A(a/g)^B \tau^C} + D \quad (6)$$

Wysokie współczynniki korelacji R dla funkcji (4) i (5) oraz dość wysokie dla funkcji trójparametrowej (6) sugerowały, że forma wyrażenia eksperymentalnego opisującego odwodnienie szlamu została dobrana właściwie.

Znaleziono dla nadawy 1 w oparciu o 45 uśrednionych oznaczeń wilgotności w zakresie $\tau = 4 \div 30$ min oraz $a/g = 174,5 \div 1786,8$

$$w = \exp[110,8 \cdot (a/g)^{-0,5234} \cdot \tau^{-0,6107}] - 0,6435 \quad (7)$$

$$(R = 0,9671, \quad 45 \text{ punktów}),$$

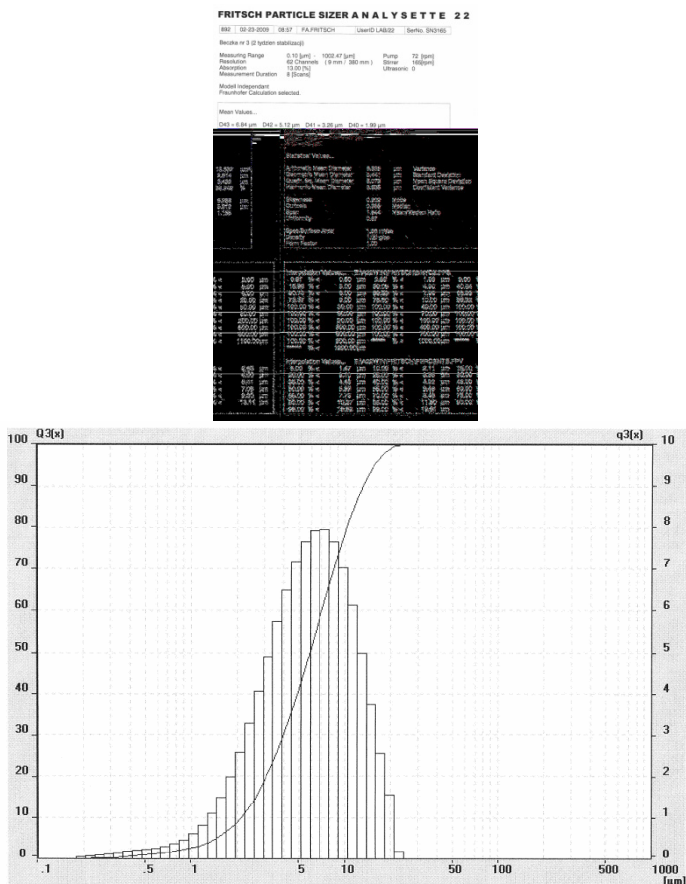
zaś dla nadawy 2 w oparciu o 45 punktów w tym samym zakresie a/g i τ

$$w = \exp[2104,4 \cdot (a/g)^{-0,8587} \cdot \tau^{-0,7601}] - 0,6355 \quad (8)$$

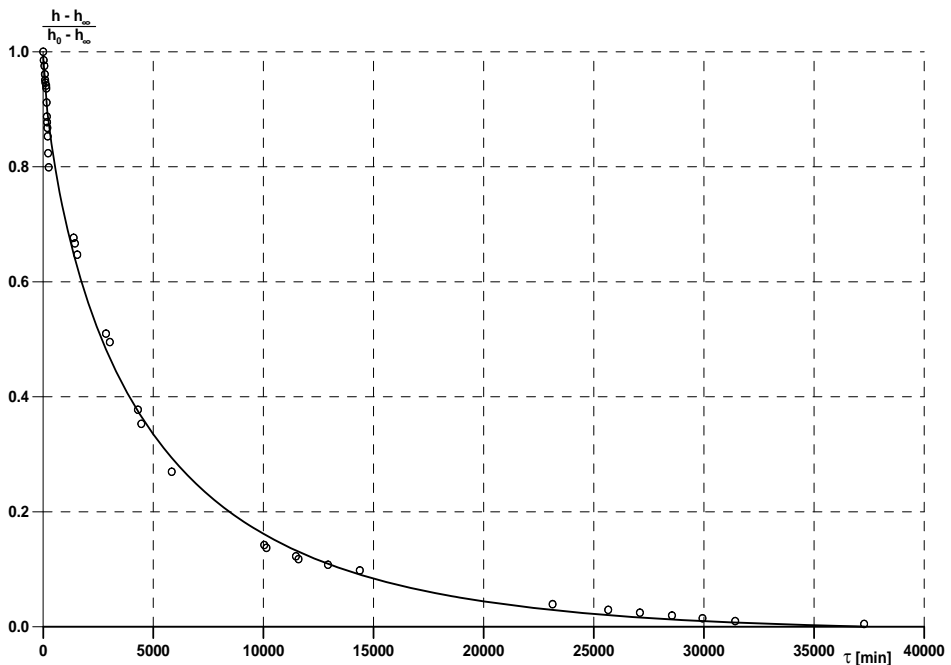
$$(R = 0,9444, \quad 45 \text{ punktów}).$$

4. Badania dodatkowe

Oprócz testów wirowania, które stanowiły główny cel pracy, przeprowadzono również wybrane badania dodatkowe, które umożliwiły ustosunkowanie się do uzyskanych wyników. Były to m.in. analizy ziarnowe i testy sedymentacyjne. Analizy ziarnowe prowadzono systematycznie co ok. 2 tygodnie od momentu pobrania próbek zawiesin obydwu nadaw, do zakończenia (po ok. 3 miesiącach) badań. Przykład takiej analizy dla nadawy 2 zamieszczono na rys. 2.



Analizy prowadzone dla innych czasów stabilizacji nie wykazały znaczących różnic składu ziarnowego w stosunku do rezultatów rys. 2. Oznacza to, że ziarna ciała stałego nie mają skłonności do aglomeracji, siły międzycząsteczkowe są niewielkie i ewentualne aglomeraty są rozbijane w układzie mieszania analizatora. Wynika stąd konkluzja, że drogą deponowania zawiesiny nie da się znacząco zmienić składu ziarnowego. Ponadto drobne uziarnienie stanowi o trudnościach w separacji fazowej i nawet stosując bardzo wysokie wartości a/g i długie czasy wirowania nie należy oczekiwać niższych od ok. 36,5% wilgotności osadów. Potwierdzeniem tego są testy sedymentacyjne. Wyniki (przykładowe) testu sedymentacyjnego zamieszczono w tabeli 3 oraz na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Wykres sedymentacyjny dla nadawy 1

Fig. 3. Sedimentation plot for the supply 1

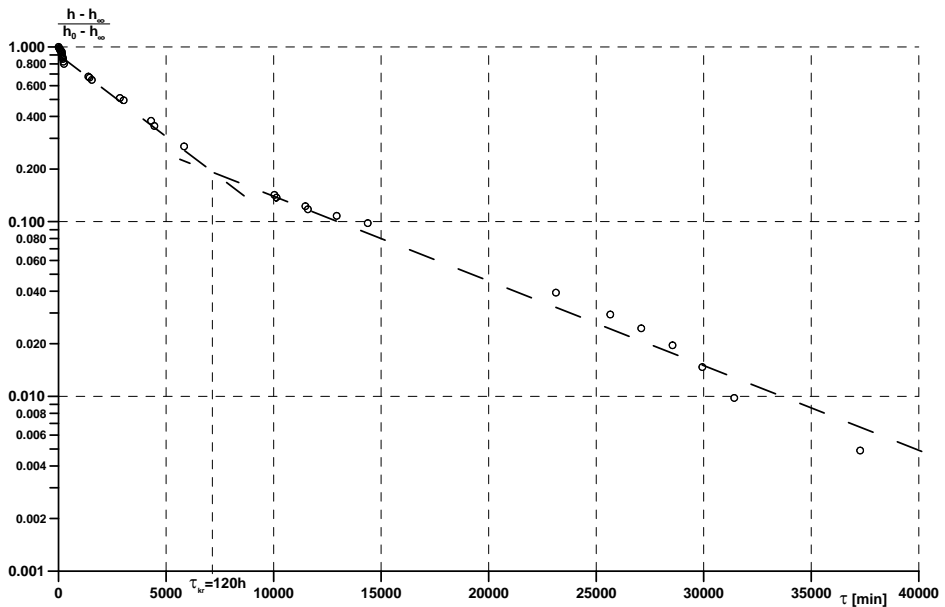
Tabela 3. Zestawienie wyników testów sedymentacyjnych dla nadawy 1
Table 3. Setting-up of sedimentation test results for the supply 1

Czas τ [min]	$\frac{h - h_{\infty}}{h_0 - h_{\infty}}$	h [min]
0	1,00000	650
23	0,98529	647
54	0,97549	645
76	0,96078	642
87	0,95098	640
100	0,94608	639
136	0,94118	638
144	0,93627	637
156	0,91176	632
166	0,88725	627
177	0,87745	625
189	0,86765	623
204	0,85294	620
223	0,82353	614
250	0,79902	609
1384	0,67647	584
1441	0,66667	582
1546	0,64706	578
2851	0,50980	550
3026	0,49510	547
4301	0,37745	523
4454	0,35294	518
5836	0,26961	501
10036	0,14216	475
10137	0,13725	474
11476	0,12255	471
11593	0,11765	470
12931	0,10784	468
14376	0,09804	466
17296	0,09314	465

Tabela 3. cd.

Table 3. cont.

Czas τ [min]	$\frac{h - h_{\infty}}{h_0 - h_{\infty}}$	h [min]
21466	0,07353	461
23128	0,03922	454
25654	0,02941	452
27094	0,02451	451
28549	0,01961	450
29934	0,01471	449
31419	0,00980	448
37274	0,00490	447



Rys. 4. Wykres sedymentacyjny dla nadawy 1 w układzie półlogarytmicznym

Fig. 4. Semi-logarithmic sedimentation plot for the supply 1

Na podstawie rys. 4 oszacowano czas krytyczny sedymentacji (po którym opadanie swobodne zmienia charakter na opadanie skrępowane) jako równy $\tau_{kr} \approx 120$ godz. Tak duża wartość τ_{kr} potwierdza, że proces rozdziału fazowego szlamu zachodzi bardzo opornie.

5. Analiza wyników badań i wnioski

Jak wynikało z pracy [26], w której poddano filtracji wirowej zawieszinę o zawartości ciała stałego $u_z \approx 8\%$, pochodzącą z tej samej kopalni, niższe wilgotności końcowe dla tych samych parametrów ruchowych wirówki uzyskiwano dla zawieszin nie zawierających flokulantu dla najwyższych a/g i τ stosowanych w testach laboratoryjnych ($w \approx 39,0\%$). Wzrastający dodatek flokulantu zwiększał wilgotność końcową osadu, stąd w omawianych badaniach nie dodawano do szlamu flokulantu. W porównywalnych warunkach ruchowych uzyskano dla szlamu wilgotności nieco niższe (najniższe wartości w uzyskano dla $a/g = 1786,8$ i $\tau = 30$ min i wynosiły one: $w = 36,6\%$ dla nadawy 2 i $w = 37,2\%$ dla nadawy 1). Są to wartości o ok. 2% niższe, niż w [26], a biorąc pod uwagę znaczne wielkości strumieni poddawanych odwadnianiu na prasach, rezultat ten można uznać za istotny. Stanowi on ponadto potwierdzenie tezy, że większy udział ciała stałego w zawieszinie poddawanej filtracji wirowej skutkuje niższą wilgotnością końcową osadu.

O trudnościach rozdziału fazowego świadczą też analizy ziarnowe i testy sedymentacyjne. Przy tak drobnym uziarnieniu (mikronowym) i długich czasach krytycznych sedymentacji (ok. 120 godz.) nie można oczekiwać niskich wilgotności osadów, a filtracja wirowa jest zalecanym technicznie sposobem prowadzenia separacji fazowej, tylko przy wysokich czasach wirowania i dużym współczynniku uwielokrotnienia.

Oznaczenia – Symbole

A, B, C, D – stałe zależności empirycznych (4), (5) i (6)

– constants in Eq. (4), (5) and (6)

C – stała filtracji, m

– filtration constant, m

F – powierzchnia filtracji, m^2

– filtration area, m^2

K – stała kinetyczna filtracji w równaniu (1), m^2/s

– filtration kinetic constant in Eq. (1), m^2/s

V – objętość filtratu, m^3

– filtrate volume, m^3

a – przyspieszenie dośrodkowe, m/s^2

– centripetal acceleration, m/s^2

- g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2
– *acceleration due to gravity, m/s^2*
- u_s – udział masowy soli w filtracie, kg/kg
– *salt mass fraction in filtrate, kg/kg*
- u_z – udział masowy ciała stałego w zawiesinie, kg/kg
– *mass concentration of solid phase in suspension, kg/kg*
- w – wilgotność osadu, kg/kg
– *cake moisture content, kg/kg*
- w^* – zmodyfikowana wilgotność osadu, kg/kg
– *modified cake moisture content, kg/kg*
- w_f – udział masowy ciała stałego w filtracie, kg/kg
– *mass concentration of solid phase in filtrate, kg/kg*
- ρ_f – gęstość filtratu, kg/m^3
– *density of filtrate, kg/m^3*
- ρ_z – gęstość zawiesiny, kg/m^3
– *density of suspension, kg/m^3*
- τ – czas filtracji, s
– *filtration time, s*
- τ – czas krytyczny sedymentacji, s
– *critical time of sedimentation, s*

Literatura

1. Palica M., Salasowicz M., Spyрка W., Szczepańska J.: Karbo, 2, 121, 2009.
2. Palica M.: Chem. Eng. Proc., 33, 141, 1994.
3. Malirz D., Kocurek J., Palica M.: Karbo, 1, 39, 2006.
4. Palica M.: Karbo, 3, 164, 2006.
5. Palica M., Korcz Ł., Niemirowski J., Szeja W.: Karbo, 1, 57, 2007.
6. Palica M., Pudło W.: Inż. Ap. Chem., 4, 22, 2005.
7. Palica M., Kocurek J., Szymczyk S.: Rocznik Ochr. Środ., 8, 215, 2006.
8. Palica M., Grotek A., Gruca M., Niemirowski J.: Rocznik Ochr. Środ., 9, 133, 2007.
9. Palica M., Kocy G., Kurowski Ł., Pławecka A.: Rocznik Ochr. Środ., 10, 301, 2008.
10. Palica M., Spyрка W.: Karbo, 3, 142, 2008.
11. Żużikow W. A.: *Filtracja. Teoria i praktyka rozdzielania zawiesin*. WNT, Warszawa 1985.

12. Koch R., Noworyta A.: *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*. WNT, Warszawa 1992.
13. Malinowskaja T. A., Kobrinskij I. A., Kirsanow O. S., Rejnfart W.W.: *Rozdzielanie zawiesin w przemyśle chemicznym*. WNT, Warszawa 1986.
14. Sørensen P. B., Moldrup P., Hansen J.: *Chem. Eng. Sci.*, 51, 967, 1996.
15. Luckert K.: *Inż. Chem. Proc.*, 1, 277, 1990.
16. Luckert K.: *Inż. Chem. Proc.*, 5-6, 21, 1988.
17. Machej K., Trefler U.: *Chemik*, 5, 165, 1995.
18. Tiller F. M., Leu W. F.: *Chinese Inst. Chem. Engrs.*, 11, 61, 1980.
19. Kocurek J.: *Badanie strefy kompresji ściśliwych placków filtracyjnych*. rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
20. Piecuch T.: *Analiza teoretyczna przepływu medium przez modelowe wirówki sitowe*. Wyd. Polskiego Tow. Nauk o Ziemi, s. 100, 1984.
21. Piecuch T., Anielak A.M.: *Zesz. Nauk. Arch. Gór. PAN*, t. 29, Z. 3, 405, 1984.
22. Piecuch T., Piekarski J.: *Env. Prot. Eng.*, 2, 2002.
23. Piecuch T., Dąbrowski T.: *Env. Prot. Eng.*, 33, 2007.
24. Piecuch T.: *Analiza studialna procesu rozdziału w wirówce sedymentacyjnej*. Wyd. Pol. Koszalińskiej, Monografia, Koszalin 1992.
25. Piecuch T.: *Technika hydroszlamowa*. Wyd. II, Wyd. Pol. Koszalińskiej, Monografia, Koszalin 1999.
26. Palica M., Dolina A., Gierczycki A., Kolorz S.: *Rocznik Ochr. Środ.*, 11, cz. 2, 1063, 2009.
27. Wątor K.: *Periodyczna filtracja wirowa zawiesiny węglowej*. Praca dyplomowa magisterska wykonana pod kierunkiem M. Palicy, Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Śląskiej, do użytku wewnętrznego, Gliwice 2009.

Coal Sludge Dewatering Using Periodical Centrifugal Filtration

Abstract

Results of experiments dealing with laboratory-scale periodical centrifugal filtration of sludge originated from one of coal mines, currently dewatering in filtration press, is presented in the paper. This sludge is characterized by a quite high, i.e. greater than 20% mass concentration of solid phase being the coal in 81.3%. Because a final moisture content in the sediment is approximately equal to 37% at pressure of 6 bars, a question appears, if using the centrifugal filtration for simplex $a/g = 1000$ (usually applied in industrial conditions) and

the centrifugation time close to 10 min, a lower final moisture content of sediment can be achieved? It was stated that for such conditions, the final moisture content was equal to about 0.418, what was much higher than after presses. Researches on centrifugal filtration were conducted in a relatively broad range of $a/g = 174.5 \div 1786.8$ and $\tau = 4 \div 30$ min. It was proved that the influence of a/g on the final moisture content was stronger than τ . For the highest a/g and τ used in the experiments, values of $w = 36.6\%$ (for the supply 2) and $w = 37.2\%$ (for the supply 1) were obtained. The data for sludge presented in this work indicate that the increase of solid phase mass concentration in the suspension influences the decrease the final moisture content of sediment, and this conclusion is a result of comparison of the data taken from works [26] and [27], obtained for a few and over 20% solid phase concentration in suspension. Quite high values of moisture content in sediments indicate the difficulties in mechanical phase separation. This was also proved by additional measurements, including particle size distribution and sedimentation tests. It was stated that particle size distribution was very fine (μm) and critical sedimentation time – long (ca. 120 hr.). This means that the initial suspension thickening using sedimentation is unnecessary. One of the conclusion derived from the researches leads to the statement that periodical or continuous centrifugal filtration is useless because of wet sediments obtained. It is also worth to mention that filtration tests were carried out for previously selected filtration cloth of the type PT – 912 and suspension tested could be treated as without addition of flocculant.