

Józef Sówka, Tadeusz Piecuch

Instytut Przeróbki Kopalni Politechniki Śląskiej

STAN BADAŃ TEORETYCZNYCH I PRAKTYCZNYCH
NAD PROCESEM FILTRACJI ZAWIESIN

Streszczenie. Artykuł obejmuje przegląd ważniejszych prac dotyczących teoretycznych i praktycznych badań technologii procesu filtracji zawiesin ze szczególnym uwzględnieniem filtracji zawiesin mułów węglowych

1. Wstęp

Filtracja jako jeden z podstawowych procesów technologicznych w wielu gałęziach przemysłu, a zwłaszcza chemicznego, celulozowego, spożywczego a także górniczego, doczekała się licznych i obszernych publikacji.

Na podstawie znanych prac, można ogólnie filtrację podzielić na ciśnieniową i próżniową. Ze względu na rodzaj stanowiska badawczego może ona być prowadzona w sposób ciągły lub periodycznie, natomiast ze względu na przyjęty schemat badań, proces może być prowadzony przy stałej prędkości filtracji lub przy stałej różnicy ciśnień.

Odbiegając nieco od tematu można wspomnieć o tzw. filtracji powierzchniowej i głębokiej - pojęciach spotykanych w hydrogeologii.

Można dokonać także podziału ze względu na rodzaj części stałych w zawieszynie, np. zawieszina mułu węglowego lub inna, przy czym w zależności od charakteru medium filtracyjnego każdy z osadów może być jednorodny (ma na całej swej grubości jednakową strukturę) lub niejednorodny. Osady filtracyjne można też podzielić na ściśliwe (ulegają deformacji pod wpływem wzrostu różnicy ciśnień) i nieściśliwe. Dla prac doświadczalnych istotny jest też model opracowania wyników, który może uwzględniać wydajność (filtratu, osadu) lub jakość (zawartość wilgoci w osadzie, zagęszczenie filtratu), bądź też rozpatrywać jakość i wydajność produktów łącznie w zależności od charakteru praktycznego zastosowania badań.

Należy wspomnieć, że proces filtracji to nie tylko przepływ cieczy przez warstwę porowatą i narastanie osadu, ale także jego następne okresy, wstępne odwadnianie, płukanie, końcowe odwadnianie i usunięcie osadu, które głównie w warunkach przemysłowych składają się na całkowity cykl procesu. Odpowiedni dobór tych czasookresów jest także niejednokrotnie przedmiotem teoretycznych opracowań prowadzących do empirycznych zależności.

Przegląd poszczególnych pozycji umożliwia ogólną orientację w zakresie tematu.

2. Przegląd wybranych pozycji literaturowych

Prowadzenie technologii rozdzielania faz (stanów skupienia) przy wykorzystaniu danej własności fizycznej daje określoną operację [1]. Operacja stanowi pewien zamknięty fragment w całkowitym ciągu technologicznym zakładu. Celem bliższego określenia operacji można wprowadzić pojęcie procesu. Filtracja jest takim procesem, gdzie następuje rozdział fazy ciekłej od stałej, przy czym fazą rozproszoną jest faza ciekną a rozpraszającą faza stała. Pojęciem "filtracja" określa się proces należący do całokształtu operacji odwadniania. Najogólniej sformułowana definicja procesu filtracji jest następująca [2].

Filtracja jest procesem, w którym niejednorodna mieszanina płynu i ciała stałego podlega rozdzielaniu przez ośrodek filtrujący (przegrodę) przepuszczający płyn lecz zatrzymujący cząstki stałe.

Można także definicję procesu podać następująco wg prof. Jana Kuhla: filtracja jest to oddzielanie substancji stałych (kryształicznych i niekryształicznych) z cieczy przy pomocy urządzeń tzw. filtrów, które przepuszczają ciecz, a zatrzymują substancje stałe. Zatem w procesie filtracji zasadniczą rolę odgrywa przepływ cieczy przez ośrodek porowaty. Przepływu cieczy przez ośrodek porowaty (układ jednofazowy) nie można utożsamiać z procesem filtracji. Jednak dzięki fizykalnemu podobieństwu dot. mechaniki procesu, teoretyczne opracowania filtracji oparte są na matematycznym modelu równań charakteryzujących przepływ cieczy przez ośrodek porowaty. Najczęściej spotykanymi w literaturze równaniami są matematyczne ujęcia zależności prędkości liniowej przepływu, tzn. obliczonej w odniesieniu do przekroju całkowitego, czyli pustego (tzw. prędkość pozorną) od pozostałych fizykalnych parametrów. Do podstawowych równań należą tu równania wg Poiseuille'a, wg Darcy, Kozeny-Carmana i Rutha podaje w pracy [2].

Według Poiseuille'a prędkość przepływu przez ośrodek porowaty u zależy przede wszystkim od wielkości cząstek warstwy D_{cz} , od różnicy ciśnień Δp oraz od grubości warstwy porowatej L i lepkości cieczy μ .

$$u = \frac{\varepsilon_c D_{cz}}{32} \cdot \frac{\Delta p}{L \cdot \mu},$$

gdzie:

ε_c - współczynnik przeliczeniowy.

Darcy wprowadza do równania przepływu nowe wielkości tzw. czynniki liczby Reynoldsa F_{Re} i współczynnika oporów F_t , które zależą pośrednio od porowatości warstwy ε . Wielkości te odczytuje się z nomogramu sporządzonego dla cząstek o różnej sferyczności ψ . Następnie Darcy uogólnia równanie wprowadzając tzw. stałą przepuszczalności K .

$$u = \frac{\varepsilon_c \cdot D_{cz} \cdot F_{Re}}{32 F_t} \cdot \frac{\Delta p}{L \cdot \mu} = K \cdot \frac{\Delta p}{L \cdot \mu}.$$

Kozeny-Carman wprowadzają do ich równania bezpośrednio czynnik porowatości ξ oraz tzw. saturację S_o , czynnik odpowiadający za pory wypełnione cieczą, ale wyeliminowane z przepływu przez działanie sił kapilarnych.

$$U = \frac{\xi_c \cdot S_o^{-2} \cdot \xi^3}{k(1 - \xi)^2} \cdot \frac{\Delta p}{L \cdot \mu},$$

gdzie:

k - tzw. stała Kozeny równa ok. 5.

Równanie Rutha charakteryzuje zaś przepływ jako funkcję czynnej powierzchni normalnej do kierunku przepływu A , wprost proporcjonalnej do szybkości przepływu u , a odwrotnie proporcjonalnej do wielkości tzw. oporu właściwego α i ciężaru warstwy G . Opór właściwy zależy od porowatości ξ i gęstości cieczy ρ .

$$u = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{A}{G} \cdot \frac{\Delta p}{\mu}.$$

Na przebieg filtracji w ogóle składa się szereg złożonych a często wzajemnie uwarunkowanych czynników zależnych zarówno od własności fazy stałej oraz ciekłej jak i od warunków filtracji [3]. Takich czynników wymieniono w pracy [3], aż osiemnaście, przy czym w zakończeniu pracy autorzy stwierdzają, że podane przez nich zestawienie nie jest kompletne, chociaż ilustruje wzajemne uwarunkowanie jednych wielkości od drugich tworzących w szeregu przypadkach skomplikowane funkcje.

Wiele spośród czynników wymienionych w pracy [3] zostało opisanych i zdefiniowanych w pracy S. Leszczyńskiego [4], m.in. pojęcia oporu właściwego osadu, oporu właściwego filtracji, składu ziarnowego, nadawy i osadu współczynnika kształtu, kulistości, porowatości, ściśliwości, chropowatości i powierzchni właściwej. Głębsza analiza pracy S. Leszczyńskiego nasuwa jednak pewne uwagi krytyczne, które reasumując dotyczą metodyki opracowania w części omawiającej teorię procesu, braku jednoznacznych oznaczeń fizykalnych i braku niektórych wyjaśnień przy ustalaniu pewnych istotnych dla teorii procesu zależności.

Do podstawowych prac w literaturze polskiej zajmujących się między innymi problemem filtracji należą znane i ogólnie dostępne prace J. Ciborowskiego [5], [6], omawiające zagadnienie od strony teoretycznej, analizując oddzielnie proces filtracji przy stałym ciśnieniu i stałym przepływie. Wyżej wspomniane prace dotyczą analizy filtracji wobec czasu ssania, a więc niecyklicznej.

W.W. Strielcow w swoim artykule [7] zajmuje się optymalizacją toku pracy filtrów okresowych, omawia proces biorąc pod uwagę całkowity czas cyklu i podaje przebieg teoretycznego wywodu, gdzie zmienną zależną podlega

jąca optymalizacji jest wydajność filtratu. Otrzymana w konsekwencji wywodu postać równania, mimo poprawności matematycznego przeliczenia, budzi pewne zastrzeżenia, gdyż ilość filtratu nie powinna być w żadnej potęgze dodatniej proporcjonalna do czasu przeznaczanego na operacje pomocnicze, bowiem jest to czas martwy i w tym czasie nie zachodzi ssanie filtratu. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że błędne jest założenie z punktu widzenia technologii procesu różniczkowania funkcji

$$t_c = f(V_f),$$

gdzie:

t_c - całk. czas cyklu, s,
 V_f - objętość filtratu, m³

względem dV , gdyż raczej czas jest parametrem zmiennym niezależnym, którym należy optymalizować proces. Zatem funkcję typu

$$V_f = f(t_c)$$

należy różniczkować względem dt_c i określić optymalny czas, dla którego wydajność będzie maksymalna.

W.P. Sibirko [8] w swej pracy dotyczącej również optymalizacji procesu filtracji, opiera się częściowo na uprzednio orawianej pracy Strielcowa i dlatego na drodze swego teoretycznego wywodu dochodzi do zależności, z której wynika, że warstwa osadu jest tym grubsza, im dłuższy jest czas operacji pomocniczych, który jest czasem martwym dla przyrostu warstwy. Krytyczne ustosunkowanie się do tej relacji jest analogiczne jak uprzednio. Dalej, jak się wydaje, autor przeprowadza prawidłowo już założone różniczkowanie, celem określenia ciśnienia optymalnego funkcji typu

$$q = f(p),$$

gdzie

q - wydajność osadu,
 p - różnica ciśnień,

i wylicza optymalną wartość p , dla którego wydajność "q" jest maksymalna. Podane w zakończeniu różnice weryfikowanych otrzymanych w pracy zależności w stosunku do danych doświadczalnych dochodzą do 29% - a więc są znaczne.

S.A. Miller w swoim przeglądowym artykule pt. "Filtracja" [9], napisanym w styczniu 1955 roku zreferował najnowszą wówczas literaturę dotyczącą procesu, uważając za najciekawsze publikacje takich autorów jak F.M. Tiller [14, 15], W.L. Ingmanson [18] i H.P. Grace [20, 21]. Na uwagę zasługują także przeglądowe artykuły H.K. Suttle [10, 11, 12] podobne w

swej formie do pracy S.A. Millera [9], streszczające prace z zakresu filtracji z lat 1958-61. Za najciekawsze prace uważa publikacje A.F. Orlicka [13], N. Nikolausa [17] oraz prace autorów wymienionych już przez S.A. Millera.

Pracę Orlicka [13] poprzedza obszerny przegląd literatury z lat 1933-1954 dotyczący fizycznych zasad procesu filtracji. Podsumowując ten przegląd autor stwierdza, że filtracja jest operacją, gdzie teoria nie jest brana praktycznie pod uwagę i jest ona konsekwencją wykonanego doświadczenia. Wiedza teoretyczna jest dalej niedostateczna i dlatego należy doświadczalnie rozwiązywać problemy filtracji zadowalając się empirycznymi lub graficznym przedstawieniem korelacji ważniejszych parametrów. Z części badawczej omawianej pracy wynika szereg wniosków, z których ważniejszymi są:

- przy filtracji zawieszin dających osady ściśliwe istnieje optymalne ciśnienie filtracji, dla którego wydajność jest maksymalna;
- w procesie filtracji mamy często kilka punktów maksymalnych (np. dla wydajności), co wynika ze złożoności procesu;
- opór filtracji osadu nie jest wartością stałą, chociaż we wzorach przyjmuje się najczęściej wartość średnią;
- wydajność i jakość filtracji można zwiększyć stosując odczynniki hydrofobizujące;
- wydajność maksymalna procesu nie odpowiada minimum kosztów;
- błędne jest twierdzenie, że długie okresy filtracji są korzystne, bowiem szybkość filtracji zmniejsza się z narastaniem warstwy osadu.

Poza tym autor prowadzi analizę i krytykę pewnych anomalii występujących we wzorach, m.in. przytacza tzw. równanie Kelly-Swetlanda na optymalną wydajność filtratu, zupełnie podobne do postaci, jaką otrzymał Strielcow W.W. [7], stwierdzając, że relacja ta jest zaskakująca, bowiem czas pomocniczy w cyklu (suszenie, wydmuch) jest czasem martwym dla wydajności.

Znaczenie czynnika porowatości osadu, analizuje obszernie w swych pierwszych pracach P.M. Tiller [14, 15] omawiając szczegółowo równanie Kozeny, z którego między innymi określa zależności między prędkością przepływu a ciśnieniem, zarówno dla stałej prędkości i dla stałego ciśnienia filtracji. W swych rozważaniach teoretycznych analizując porowatość osadu jako funkcję zmiany ciśnienia zakłada, że czas potrzebny do osiągnięcia stanu równowagi porowatości jest bardzo mały, co w przypadku wielu substancji, np. łąk, nie jest prawdą ze względu na ich ściśliwość. Autor stwierdza, że nawet dla materiałów średniościśliwych porowatość jest stała, gdy ciśnienie jest mniejsze od około $0,01 \text{ kg/cm}^2$, przy czym małe zmiany porowatości powodują istotne zmiany oporu właściwego. Przez następne lata autor publikuje wiele artykułów studialnych i po 13 latach w roku 1966 ukazuje się obszerna praca P.M. Tillera [16], w której autor streścił przede wszystkim swoje dotychczasowe publikacje. We wnioskach autor powiada, że pod-

stawą projektowania procesu filtracji jest pilotujące doświadczenie laboratoryjne.

N. Nikolaus i D.A. Dahlstrom [17] wskazują w pewnych przypadkach na wyższość filtracji ciśnieniowej nad próżniową, podając jednocześnie warunki, w których filtracja próżniowa nie może być stosowana, m.in. przy nadawie o wysokiej temperaturze (uwaga: temperatura obniża lepkość).

Interesującą pracą jest artykuł W.L. Ingmansona [18] omawiający badania oporów filtracji zawieszin dających osady ściśliwe. Autor posługując się równaniami na prędkość filtracji Kozeny-Carmana oraz Darcy, wylicza wielkość oporu właściwego, który jest oporem średnim. Różnica wyników między obliczonym, dzięki uprzedniemu określeniu wszystkich wielkości występujących w równaniu - średnim oporem właściwym a tymże oporem pomierzonym na stanowisku laboratoryjnym, nie przekraczała 6%.

Szczegółową analizę procesu filtracji przeprowadza w swych pracach H.P. Grace [19, 20] opracowując metodę przewidywania średniego oporu właściwego osadu filtracyjnego na podstawie określenia współczynników ściśliwości i przepuszczalności zaznaczając, że współczynniki te są stałe tylko w wąskich zakresach różnicy ciśnień. W pracy podano, że przewidywane wartości średnich oporów właściwych były zgodne z dokładnością $\pm 10\%$ z wartościami otrzymanymi z pomiarów.

P. Le Lec [21] w pracy na temat przepuszczalności osadów omawia zagadnienie teorii procesu na bazie znanych podstawowych równań Poiseuille'a i Darcy. Publikacja opracowana jest w łatwej i przystępnej formie przy czym autor już na wstępie stwierdza, że znane powszechnie podstawowe równanie filtracji nie mają bezpośredniego zastosowania bez odpowiednich korekt.

W teoretycznej rozprawie o procesie filtracji V.E. Gonsalves [22] analizuje mało znane i rzadko spotykane w literaturze równanie Hermansa-Bredde. Efektem szczegółowej analizy tego równania jest stwierdzenie, że nadaje się ono do przedstawienia każdego procesu filtracji. Autor jednak nie uwzględnił w swych rozważaniach czynnika lepkości, a także nie zweryfikował otrzymanych zależności.

Treść i forma opracowania powoduje, że jedną z ciekawszych prac jest artykuł P.M. Heertjesa [23]. Autor podaje najpierw ogólną definicję procesu, omawia jego istotę i zaraz na wstępie mówi, że pomiędzy praktyką a teorią istnieje znaczna luka, przy czym powołuje się w swej pracy na publikacje aż 49 autorów i stwierdza, że teoria jest daleka od stanu, który można by nazwać zadowalającym. Z wielu ciekawych rezultatów pracy autora na podkreślenie zasługują następujące uwagi:

- działanie jonów miedzi, wapnia i magnezu może zredukować opór osadu filtracyjnego;
- zmniejszając napięcie powierzchniowe można zwiększyć prędkość filtracji.

Bardzo interesującą pracą także H.P. Heertjesa oraz H. Hassa [24] są studia nad procesem filtracji, gdzie autorzy rozpatrują kwestię zablokowania por siatki filtracyjnej i osadu. Regularność oczek siatki jak i por

są czynnikami ułatwiającymi blokowanie, poza tym wpływ ma wielkość i kształt cząstek substancji stałej, skład ziarnowy oraz oddziaływanie międzycząsteczkowe oraz między siatką filtracyjną a cząstkami. Najciekawszym rezultatem tej pracy jest podanie i wyjaśnienie tzw. teorii "mostów" tworzących się nad porami po przekroczeniu pewnej wielkości zagęszczenia nადawdy. Wymagałoby to jednak oddzielnego omówienia.

W maju 1968 roku ukazała się publikacja P. Le Leca [25], będąca streszczeniem referatu wygłoszonego w październiku 1967 roku na międzynarodowym sympozjum w Magdeburgu, poświęconym problemom mechanicznego rozdziału zawieszin. Autor analizuje równanie Kozeny-Carmana podstawiając w nim za wielkość oporu właściwego jego funkcyjną zależność od współczynników ścisłości [23]. W zakończeniu swego artykułu potwierdza on wnioski innych autorów, że przedstawione zależności wyprowadzone teoretycznie nie dają w wyniku ich praktycznej weryfikacji dostatecznych przybliżeń.

Badania nad przepuszczalnością osadu prowadzi na zawiesinie modelowej mikrokulek o jednakowej wielkości J. Dohnal [26]. Wywód teoretyczny rozpoczyna od analizy równania Kozeny-Carmana. Efektem pracy jest określenie wpływu spadku naprężeń mechanicznych w warstwie osadu na zmianę przepuszczalności, przy czym autor określił zależność funkcyjną naprężenia od tzw. współczynnika względnego zmniejszenia grubości warstwy określając ją mianem krzywej deformacji. Autor podaje cztery rodzaje przebiegu tej krzywej jako typowe stwierdzając, że każdy z osadów ściśliwych można przypisać do jednej z tych charakterystyk.

Obok problematyki przepływu cieczy przez warstwę porowatą celowe jest zwrócenie uwagi na zagadnienie ilości wody zatrzymanej przez zbiór ziarn. Zjawisko takie rozważał W. Batel [27] opierając się na układzie modelowym dwóch kul i wyprowadził wzór na określenie pozostałości cieczy w osadzie, której nie można usunąć na drodze mechanicznej. Opracowany wzór weryfikował doświadczalnie dla modelu węgla i kamienia wapiennego uzyskując zadowalające przybliżenia dzięki zastosowaniu współczynników charakterystycznych dla układów.

Ciekawą analizę procesu filtracji przeprowadził w swej pracy W.A. Żużikow [28]. Autor wyodrębnił umownie cztery stadia filtracji: obniżenie poziomu zawiesziny w wannie filtra, tworzenie się warstwy wody sklarowanej, tworzenie się warstwy zawiesziny o niezmiennym zagęszczeniu i warstwy zawiesziny o stężeniu wyższym od nadanego do procesu oraz powstanie warstwy osadu filtracyjnego. Każde stadium opisuje zależnościami funkcyjnymi. W.A. Żużikow [29] zajmuje się także badaniami zmian oporu właściwego w funkcji różnicy ciśnień. Ogólnym wnioskiem tych badań jest stwierdzenie, że opór właściwy osadów tych zawieszin rośnie ze wzrostem różnicy ciśnień.

P.N. Suchobrusow [30] opracowuje natomiast zagadnienie osuszania osadów filtracyjnych. Czas osuszania osadu wchodzi w przypadku filtracji zawieszin w całkowity czas cyklu. W konsekwencji swego teoretycznego wywodu,

opartego na doświadczeniu, autor dochodzi do empirycznego równania typu wykładniczego na zawartość wilgoci w osadzie:

$$W = \frac{w + \frac{1}{p} \eta}{p^{\theta} t^{\Delta}},$$

gdzie:

- W - zawartość wilgoci w osadzie,
- w - zawartość wilgoci w osadzie o grubości 1 cm przy osuszaniu w przeciągu 1 sek. pod nadciśnieniem 1 kG/cm²,
- p - ciśnienie osuszania kG/cm²,
- η, θ, Δ - odpowiednie współczynniki.

Porównanie mechanizmu przebiegu procesu filtracji do ruchu ciepła przeprowadził w swej pracy G.Q. Martin [31]. Ciepło przemieszcza się w modelowym odpowiednio przygotowanym zamkniętym i izolowanym zbiorniku wodnym, który z jednej strony jest w kontakcie ze spadkiem temperatury poniżej zera, gdzie w efekcie tegoż przemieszczania otrzymujemy warstwę lodu, tzw. "placek lodowy", który można porównać do osadu filtracyjnego. Różnica temperatur jest tu analogią do różnicy ciśnień (Ciborowski [6] porównuje różnicę ciśnień do różnicy napięć w przewodniku). Na tej bazie założeń autor dochodzi do znanych zależności opisujących proces [2].

K.J. Ivs [32] rozważa zagadnienie filtracji głównie pod kątem możliwości otrzymania czystego filtratu, opisując matematycznie proces zatrzymywania się części stałych nadawy w warstwie osadu utworzonej w pierwszym momencie zassania, tzw. warstwie wstępnej.

Na uwagę zasługuje także praca B. Fitcha [33] na temat przeciwprądowego płukania osadów filtracyjnych. Autor przedstawia proces płukania osadów w formie matematycznego modelu, podobnego operacjom jednostkowym opisywanym w pracy G.G. Browna 2. Wnioskiem ogólnym z tych badań jest stwierdzenie, że przeciwprądowe płukanie wydatnie obniża zawartość wilgoci w osadzie.

Istotną pracę w literaturze polskiej z zakresu techniki wodno-mułowej w obszernej dziedzinie nauki, jaką jest przeróbka mechaniczna kopalni stanowi na pewno praca A. Battaglii [34]. Część teoretyczną oparł autor o analizę równania Poiseuille'a, po czym obszernie omówił proces w praktyce głównie filtracji mułów węglowych. Większość filtrów próżniowych działa przy różnicy ciśnień 0,4-0,6 kG/cm². Maksymalna wielkość ziarn nadawy nie powinna przekraczać 2 mm, a średnica przeważającej części ziarn powinna wynosić poniżej 1 mm. Siatki filtracyjne są najczęściej fosforobrazowe o otworach kwadratowych od 0,1 do 0,3 mm, rzadziej prostokątne.

Na uwagę zasługują także badania K. Koppitza [35, 36] nad zastosowaniem teorii filtracji do filtracji zawiesin węglowych. Na wstępie autor zawarł podstawy teoretyczne procesu filtracji wychodząc ze znanych równań

Darcy i Poiseuille'a, a po przebadaniu tych zależności w świetle doświadczeń stwierdził, że zgodność obliczeniowych i praktycznych wyników filtracji zachodzi jedynie w idealnych laboratoryjnych warunkach przy równomiernej nadawie na filtr. Pomiar laboratoryjne wykonał na węglu o następujących własnościach:

- zawartość popiołu 7,6-10,6%,
- gęstość 1,34-1,35 g/cm³,
- zagęszczenie nadawy 300-700 g/l.

Jak widać więc, do badań użyto koncentratu węglowego. Ciekawe wyniki uzyskano dla oporu właściwego. Na ogół ze wzrostem ilości ziarn bardzo drobnych, poniżej 0,1 mm w nadawie, a więc także w materiale odwodnionym, opór właściwy rośnie. Tymczasem zaobserwowano zmniejszenie się oporu ze wzrostem drobnoziarnistości nadawy. Jak pisze autor - zjawisko to trudno wyjaśnić. Prawdopodobnie z gęstej zawiesiny o dużej zawartości ziarn bardzo drobnych otrzymuje się dużą ilość filtratu o małej koncentracji części stałych, gdyż zachodzi zjawisko naturalnego tworzenia się kłaczków, tzw. flokulacja. Wniosku tego nie potwierdzają jednak badania prowadzone na zawiesinach polskich węgla energetycznych [37, 38].

T. Piecuch [37] w swym artykule dokonuje techniczno-ekonomicznej oceny pracy filtrów próżniowych. Autor przedstawia opis jakości pracy filtrów próżniowych różnej produkcji, pracujących w różnych zakładach przerobczych, w zależności od własności technologicznych materiału odwodnionego, a także możliwości technicznych danego typu filtra w oparciu o przyjęte wskaźniki. Znane jest, że współczynnikiem pozwalającym określić stopień filtrowalności nadawy jest tzw. wskaźnik Dahlstroma:

$$K_D = a_D \cdot \sqrt{i},$$

gdzie:

- a_D - zapopielenie w klasie ziarnowej poniżej 0,07 mm,
- i - udział klasy ziarnowej poniżej 0,07 mm.

Efektom tej pracy jest m.in. ustalenie kryteriów zakwalifikowania stopnia trudności filtrowalności zawiesin węglowych na podstawie oceny parametrów otrzymanego osadu filtracyjnego do czterech grup A, B, C, i D, przy czym każda z tych grup odpowiada jednemu z przedziałów dla wielkości wskaźnika Dahlstroma. Praca ta, a zasadniczo jej założenia w metodyce badań muszą jednak budzić pewne wątpliwości. Mianowicie autor dość nietypowo ocenia pracę filtrów próżniowych, wychodząc z charakterystyki osadu filtracyjnego, a nie z charakterystyki nadawy. Podobnie dyskusyjna jest tu także ocena pracy różnych filtrów pracujących na różnych zawiesinach, jak i ocena trudności filtrowalności różnych zawiesin oparta na bazie doświadczeń prowadzonych na różnych filtrach. Pomimo tego należy jednak uwzględnić fakt, iż praktycznie nie ma możliwości, ze względu na olbrzymie trudności natury technicznej, wykonania takich badań w warunkach ruchowych,

nie dysponując przemysłowym zakładem doświadczalnym, a więc oparto się na badaniach prowadzonych w miarę istniejących możliwości. Mając na uwadze wyjaśnienie tych wątpliwości autor podjął w skali półtechnicznej [38] badania filtracji zawiesin mułów węglowych. Przeprowadzono je na filtrze bębnowym w hali technologicznej Głównego Instytutu Górniczego. Do prób przyjęto zawiesiny mułów węglowych z wielu kopalń o jednakowej początkowej koncentracji części stałych w nadawie. Filtrację przeprowadzono w jednakowych warunkach technicznych. Praca ta potwierdziła wnioski wypływające z pracy [37] a ponadto uchwycono wyraźny chociaż niewielki efekt wzbogacania otrzymanego osadu filtracyjnego.

Problematyką technologiczną występującą przy eksploatacji filtrów próżniowych zajmuje się także H. Rumpfeldt [39]. Do najistotniejszych czynników przy filtracji zawiesin węglowych zalicza m.in. mieszanie nadawy i dodatek środków flokulujących.

Pracą o charakterze podstawowym są badania procesu filtracji mułów węgli surowych w świetle doświadczeń optymalizacyjnych [40]. Analizowano tu wpływ na efekt procesu siedmiu czynników zmiennych: zagęszczenia początkowego nadawy, ilości ziarn poniżej 0,1 mm w nadawie, różnicy ciśnień, czasu ssania, czasu odwadniania, wielkości otworów siatki filtracyjnej i rodzaju wody. Efektem pracy było ustalenie warunków prawie optymalnych procesu w aspekcie praktycznych możliwości ich stosowania. Praca zawiera także wytyczne odnośnie konstrukcji i regulacji pracy filtrów.

Nawiązując do wystarczającej dokładności tzw. wskaźnika Dahlstroma dla praktycznych możliwości oceny procesu, należy celem uściślenia zagadnienia wspomnieć, że wg J. Kuhla [41] wpływ na filtrację ma nie tylko samo zapopielenie, ale rodzaj substancji mineralnej, która to zapopielenie stwarza i nie tylko udział w mułach klasy ziarnowej poniżej 0,07 mm, lecz przede wszystkim stopień uwęglenia węgla.

Spostrzeżenia te potwierdziły badania R. Lacha [42] nad elektrodwadnianiem różnych mułów węglowych. Autor w specjalnie wykonanym naczyniu cylindrycznym odwadniał węglową zawiesinę mułową o zagęszczeniu ok. 400 g/dcm³ używając typowej siatki filtracyjnej o otworach 0,06 mm na podkładzie siatki fosforobrazowej o oczkach 1 mm. Do naczynia podłączono napięcie 40 V i przez cały czas trwania pomiaru utrzymywano je w tej samej wielkości.

Badania zaczynano prowadzić po 22 godzinach, tj. po czasie, gdy ustawało naturalne obciekanie. Jednym z wielu ciekawych wniosków płynących z pracy, jest stwierdzenie, że odwadnianie jest funkcją poboru mocy elektrycznej.

Można więc zastanowić się nad celowością podłączenia odpowiedniego napięcia do tarcz lub bębnow filtrów przemysłowych w czasie ich normalnej pracy.

3. Podsumowanie

Przegląd wybranych publikacji i opracowań, których problematyka związana jest z teorią i praktyką technologii procesu filtracji nasuwa następujące spostrzeżenia:

1. Teoria procesu opiera się zasadniczo na wynikach badań praktycznych i obserwacjach.
2. Podstawowe modelowe równania procesu filtracji są funkcjami czasu ssania, a więc efektywnego czasu filtracji, nie uwzględniając czasów odwadniania i czynności pomocniczych; obniża to możliwość ich praktycznego stosowania.
3. Najwięcej prac studialnych nad procesem filtracji przeprowadzonych zostało dla surowców (zawiesin) produktów procesów chemii przemysłowej.
4. Występuje poważny brak prac studialnych nad weryfikacją teorii procesu dla filtracji zawiesin surowych miazg węglowych.

LITERATURA

- [1] Sówka J., Lisoń J., Piecuch T.: Systematyka procesów i klasyfikacja maszyn przerobczych. Biuletyn - Informacja Techn.-Ekonom. J.M.Z.P.W. Wyd. NOT, Luty 1972, s. 51-75.
- [2] Brown G.G. i inni: Praca zbiorowa. Inżynieria chemiczna. Operacje jednostkowe. W-wa 1960, PWT, s. 234-284.
- [3] Sówka J., Sówka R.: Niektóre aspekty rozkładu zawartości wilgoci w placku na filtrze tarczowym. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. nr 21, rok 1967 s. 167-174.
- [4] Leszczyński St.: Filtracja w przemyśle chemicznym. W-wa 1958, PWT, s. 39.
- [5] Ciborowski J.: Inżynieria chemiczna. W-wa 1955, PWT.
- [6] Ciborowski J.: Podstawy inżynierii chemicznej. W-wa 1965, PWT, Wyd. II, s. 155-169.
- [7] Strielcow W.W.: Raszczot optimalnowo reżima raboty filtrov periodičestkovo deistwijskija. Chimičieskaja Promysliennost nr 5, 1955, s. 35-42.
- [8] Sibirko W.P.: Raszczot optimalnowo reżima raboty automaticzeskich filtrov i drugich filtrov periodičieskovo deistwijskija. Chimičieskije Maszinstrojenije. Nr 2, 1961, s. 28-31.
- [9] Miller S.A.: Filtration. Industrial and Engineering Chemistry. Nr 1, 1955, s. 100-105.
- [10] Suttle H.K.: Theoretical and practical advances, atmospheric pollution problems; filter media; filters in unit processes, etc. Chemical Process Engineering, No 2, 1957, s. 59-62.
- [11] Suttle H.K.: Filtration. Advances in filtration in the theoretical and practical fields. Chemical Process Engineering, No 2, 1960, s. 58-62.
- [12] Suttle H.K.: Filtration. Chemical Process Engineering, No 8, 1962, s. 413-416.

- [13] Orlicek A.F.: Les principes physiques de la filtration. Genie Chimique 1956, paździenik No 3, s. 65-74.
- [14] Tiller F.M.: The role of porosity in filtration. Chemical Engineering Progress. No 6, 1955, s. 282-290.
- [15] Tiller F.M.: Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's law (Lamar State College of Technology Beaumont Texas). Chemical Engineering Progress, No 9, 1953, s. 467-479.
- [16] Tiller F.M.: Filtration theory today. Chemical Engineering Progress No 6, 1966, s. 151-162.
- [17] Nikolaus N., Dahlstrom D.A.: Theory and practice of continuous pressure filtration. Chemical Engineering Progress. No 3, 1956, s. 87-93.
- [18] Ingmanson W.L.: Filtration resistance of compressible materials. Chemical Engineering Progress. No 11, 1953, s. 577-581.
- [19] Grace H.P.: Resistance of compressibility of filter cakes. Chemical Engineering Progress. Part I. No 6, 1953, s. 303-318.
- [20] Grace H.P.: Resistance and compressibility of filter cakes. Chemical Engineering Progress. Part II, No 7, 1953, s. 367-377.
- [21] Le Lec P.: Variations de permeabilité des gateaux de filtration. Genie Chimique Nr 3, 1962, s. 61-83.
- [22] Gonsalves V.E.: A critical investigation on the viscous filtration process. Recueil Trav. Chim. Pays-Bas. No 7/8 1950, s. 873-895.
- [23] Hertjes P.M.: Industrial filtration. Department of Chemical Engineering. Technical University - Delf., s. 254-259.
- [24] Hertjes P.M., Haas H.: Studies in filtration. Recueil Trav. Chim. Pays-Bas, No 6, 1949, s. 361-383.
- [25] Le Lec P.: Die Kompressibilität der Filterkuchen und ihr Einfluss auf die Filtergleichung. Chemische Technik Nr 5, 1963, s. 264-272.
- [26] Dohnal J.: Die mechanischen Eigenschaften des Filterkuchens und ihr Einfluss auf die Form der Allgemeinen Filtergleichung. Chemische Technik, Nr 5, 1968, s. 273-276.
- [27] Batel W.: Vorausberechnung der Restfeuchtigkeit bei der mechanischen Flüssigkeitsabtrennung. Chemie Ing. Techn. Nr 8/9, 1955, s. 497-501.
- [28] Żuzikow W.A.: Zakonomiernosti filtrowanija pri rozdieleniji rasstajawuszczihsja suspienziji na filtrie. Chemiczijskaja Promyszlennost Nr 4, 1960, s. 51-59.
- [29] Żuzikow W.A.: O metodach opriedelenija udielnogo soprotiwlenija filtrowannyh osadow. Chemiczijskoje i Nieftianoje Maszinostrojenie. Nr 3, 1966, s. 29-31.
- [30] Suchobrusow P.N.: Metod opriedelenija optimalnowo režima prosuszki osadka na filtrach. Chemiczijskoje i Nieftianoje Maszinostrojenije. Nr 12, 1965, s. 27-29.
- [31] Martin G.Q.: Relate filtration to heat transfer. Chemical Engineering Progress. Nr 2, 1960, s. 103-106.
- [32] Ives K.J.: New concepts in filtration. Water and Water Engineering Nr 3, 1961, s. 341-344.
- [33] Fitch B.: Countercurrent filtration washing. Chemical Engineering Progress. Nr 1, 1962, s. 119-124.
- [34] Battaglia A.: Odwadnianie produktów wzbogacania i obiegi wodne płuczek. Wyd. II. K-ce, 1963, Wyd. Górn.Hutn. s. 164-187.
- [35] Koppitz K.: Untersuchungen über die Anwendbarkeit der Filtertheorie auf die Steinkohle-Filter-Arbeit Teil 1. Aufbereitungs-Technik Nr 9, 1970, s. 523-530.

- [36] Koppitz K.: Untersuchungen über die Anwendbarkeit der Filtertheorie auf die Steinkohle-Filterarbeit. Teil 2, Aufbereit.-Technik, Nr 12, 1970, s. 731-743.
- [37] Piecuch T.: Ocena wskaźników techniczno-ekonomicznych filtrów próżniowych. Separator Nr 3, 1970, s. 10-21.
- [38] Piecuch T.: Badania filtracji zawiesin mułów węglowych na laboratoryjnym filtrze bębnowym o działaniu ciągłym. Materiały niepublikowane - Instytut Przeróbki Kopalni Politechniki Śląskiej.
- [39] Rumpfeldt H.: Besondere Probleme bei der Anwendung von Drehfiltern in der Aufbereitung. Aufbereitungstechnik, Nr 11, 1967.
- [40] Piecuch T.: Badania efektywności procesu filtracji mułów węgla surowych w świetle doświadczeń. Praca doktorska, czerwiec 1972. Promotor Doc. dr hab.inż. Józef Sówka, Instytut Przeróbki Kopalni Politechniki Śląskiej.
- [41] Kuhl J.: Chemiczno-mineralna budowa nieorganicznej substancji mineralnej w węglu kamiennym. Kwartalnik Geologiczny 1961 r.
- [42] Lach R.: Badania nad elektroodwadnianiem mułów węglowych. Prace Głównego Instytutu Górnictwa. Komunikat nr 504, 1971 r.

СОСТОЯНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА
ФИЛЬТРАЦИИ ЭМУЛЬСИЙ

Р е з ю м е

Статья содержит обзор важнейших работ, касающихся теоретических и практических исследований технологии процесса фильтрации эмульсий а в частности, фильтрации эмульсий угольных илов.

THE STATE OF THEORETICAL AND PRACTICAL RESEARCHES CONCERNING
THE PROCESS OF COAL SUSPENSION FILTRATION

S u m m a r y

The article gives a full review of the most important papers dealing with theoretical and practical researches in technology concerning the process of emphasizing the filtration of the suspensions of raw slime coal.