

Elżbieta M. Grochulska-Segal

WPLYW WŁAŚCIWOŚCI ZAWIESINY POKOAGULACYJNEJ NA PROJEKTOWANIE FILTRÓW

Charakterystyka i właściwości zawiesiny pokoagulacyjnej zależą głównie od składu fizyczno-chemicznego uzdatnianej wody oraz rodzaju i dawki koagulantu. Do najistotniejszych parametrów charakteryzujących cząstki osadu pokoagulacyjnego, zatrzymywanego w złożu filtracyjnym, należy współczynnik ściśliwości oraz opór właściwy. Wartości tych parametrów decydują o pojemności masowej złoża filtracyjnych. Pojemność złoża filtracyjnego, określająca czas trwania cyklu filtracyjnego uzależniona jest nie tylko od składu i właściwości zawiesiny pokoagulacyjnej, ale także od granulometrii złoża oraz parametrów pracy filtrów.

Cel i metodyka badań

Celem pracy była ocena właściwości filtracyjnych zawiesiny pokoagulacyjnej w wielowarstwowych złożach filtrów pospiesznych. Zakres pracy obejmował analizę wpływu składu uzdatnianej wody na pojemność masową wielowarstwowych złoża filtracyjnych oraz zależności tej pojemności od właściwości filtracyjnych zawiesiny pokoagulacyjnej. Zakresem badań objęto koagulację objętościową oraz filtrację pospieszną przez złoża wielowarstwowe. Badania prowadzono w dwóch systemach doświadczalnych [1]. W pierwszym, wodę rzeczną po ko-

nym z filtrem trójwarstwowym węglowo-antracytowo-piaskowym filtrowano wodę sztucznie zmętnioną po koagulacji tym samym koagulantem. Dawki siarczanu glinowego nie przekraczały $50 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}/\text{m}^3$. Woda rzeczna charakteryzowała się podwyższoną barwą ($30\text{—}40 \text{ g Pt}/\text{m}^3$), wysoką mętnością ($20\text{—}50 \text{ g}/\text{m}^3$) oraz dużą zawartością zawieszin ($20\text{—}100 \text{ g}/\text{m}^3$). Woda sztucznie zmętniona posiadała stały skład: mętność $15 \text{ g}/\text{m}^3$, barwa $20 \text{ g Pt}/\text{m}^3$ i zawiesina $15 \text{ g}/\text{m}^3$.

Podczas badań wykonano analizy składu fizyczno-chemicznego wody surowej i oczyszczonej, mierzono wielkość strat hydraulicznych oraz natężenie przepływu wody przez instalację doświadczalną. Wykonano także bilans masowy, oznaczając stężenie zawieszin w dopływie na filtr oraz w filtracie, z częstotliwością $1\text{—}2 \text{ h}$. Straty hydrauliczne mierzono za pomocą piezometrów, rozmieszczonych co $0,3 \text{ m}$ w filtrze dwuwarstwowym i co $0,05 \text{ m}$ w filtrze trójwarstwowym wzdłuż głębokości złoża. Wodę rzeczną filtrowano z prędkością $9,4 \text{ m/h}$ natomiast wodę sztucznie zmętnioną filtrowano z trzema prędkościami 5 m/h , 10 m/h i 15 m/h . Dla tych prędkości filtracji dokonano pomiaru strat hydraulicznych przy przepływie czystej wody przez czyste złoża filtracyjne.

CHARAKTERYSTYKA ZAWIESINY POKOAGULACYJNEJ

Tabela 1

Pochodzenie wody	Skład kłaczków	Gęstość kłaczków minimalna, maksymalna $\varrho_{kl'}$ kg/m^3	Uwodnienie kłaczków
			$U_{kl'} = \frac{100 (\varrho_s - \varrho_{kl'})}{\left(\varrho_{kl'} \frac{\varrho_s}{\varrho} - 1 \right)}$ %,
Woda rzeczna	$\text{Al}(\text{OH})_3$ + mętność $20\text{—}50 \text{ g}/\text{m}^3$ + barwa $30\text{—}40 \text{ g Pt}/\text{m}^3$ + zawiesina $20\text{—}100 \text{ g}/\text{m}^3$	1004,07	99,25
		1008,77	98,46
Woda sztucznie zmętniona	$\text{Al}(\text{OH})_3$ + mętność $15 \text{ g}/\text{m}^3$ + barwa $20 \text{ g Pt}/\text{m}^3$ + zawiesina $15 \text{ g}/\text{m}^3$	1002,48	99,52
		1003,02	99,43
Woda ze zbiornika retencyjnego	$\text{Al}(\text{OH})_3$ + mętność $2,7\text{—}3,2 \text{ g}/\text{m}^3$ + barwa $30 \text{ g Pt}/\text{m}^3$	1002,72	99,48

agulacji jej domieszek siarczanem glinowym filtrowano przez złoża dwuwarstwowe węglowo-piaskowe. W drugim systemie doświadczal-

Charakterystyka zawiesiny pokoagulacyjnej

Na podstawie składu fizyczno-chemicznego wody surowej oraz dawek koagulantu, scharakteryzowano skład i właściwości zawiesiny pokoagulacyjnej (tabela 1).

W tabeli tej podano także charakterystykę zawiesiny pokoagulacyjnej, której skład i właściwości określono w oparciu o dostępne wyniki badań [2]. Woda ze zbiornika retencyjnego charakteryzowała się podwyższoną barwą, niską mętnością i nie zawierała zawieszin. Wodę tę koagulowano siarczanem glinowym dawką $24,7 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}/\text{m}^3$, a następnie filtrowano przez złoża trójwarstwowe węglowo-antracytowo-piaskowe.

Gęstość kłaczków w funkcji ich składu określano według literatury [3], natomiast uwodnienie obliczano z zależność podanej w tabeli 1. W zależności tej gęstość fazy stałej w kłaczkach przyjęto równą $\rho_s = 2400 \text{ kg/m}^3$ [3]. Istotne różnice pomiędzy gęstościami kłaczków i ich uwodnieniami wynikają głównie z obecności lub braku zawieszin w domieszkach koagulowanej wody.

Interpretacja wyników badań

Efekty procesu filtracji i długość cyklu filtracyjnego zależą od pojemności złoża. Właściwości zawiesiny pokoagulacyjnej, a w szczególności ograniczona wytrzymałość jej struktury i wynikająca stąd ściśliwość kłaczków, powodują iż niezbędnym jest określenie masy kłaczków zatrzymanych w złożu filtracyjnym. Z tych względów, obok parametrów charakteryzujących właściwości filtracyjne zawiesiny, wyznaczono także pojemność masową złoża. Pojemność masową złoża filtracyjnych określano masą fazy stałej, zatrzymaną w jednostkowej objętości złoża w cyklu filtracji. W celu wyznaczenia pojemności masowej dokonano bilansu masowego, polegającego na pomiarze zawartości zawieszin w dopływie i odpływie z filtrów.

Wartości pojemności masowej złoża oraz poszczególnych warstw w złożach zestawiono w tabeli 2 i 3.

Stwierdzono, że pojemność masowa badanych złoża dwu- i trójwarstwowych zależała od prędkości filtracji, uziarnienia warstw i składu wody uzdatnianej oraz wahała się w zakresie od $2,06 \text{ kg/m}^3$ do $10,11 \text{ kg/m}^3$.

Kompleksowy wpływ uziarnienia warstw i prędkości filtracji na pojemność masową złoża filtracyjnych oraz ich wzajemne oddziaływanie

uniemożliwiają indywidualną ocenę wpływu tych czynników na wartość pojemności masowej. Przy właściwie dobranym uziarnieniu warstw wzrost prędkości filtracji z $5,0 \text{ m/h}$ do 15 m/h powodował zwiększenie pojemności masowej złoża filtru (tabela 2). Przy zbyt dużym uziarnieniu warstwy piasku, przekraczającym zalecaną w technologii [3] wartość $d_{10} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ dla filtracji wód po koagulacji, wzrost prędkości filtracji powyżej 10 m/h powodował spadek pojemności masowej złoża (tabela 3).

Możliwość oceny wpływu składu wody na pojemność masową badanych złoża wynikała z dużej rozpiętości pomiędzy właściwościami filtrowanej zawiesiny pokoagulacyjnej. Przy ocenie wpływu składu wody na pojemność masową złoża filtracyjnych, należy wyszczególnić dwa charakterystyczne skrajne przypadki. Pierwszy obejmujący wody o znacznej zawartości zawieszin i dużej mętności i drugi, w którym woda charakteryzowała się podwyższoną barwą, brakiem zawieszin i minimalną mętnością. Podczas filtracji koagulowanych domieszek tych wód wystąpiły znaczne różnice w pojemnościach masowych złoża wielowarstwowych pomimo niewielkich różnic w ich pojemnościach objętościowych [4].

Filtracja wód o znacznej ilości zawieszin prowadziła do bardzo dużych pojemności masowych, kilkakrotnie przekraczających wartości otrzymane dla przypadku drugiego (brak zawieszin, niska mętność i podwyższona barwa), pomimo, że różnice w pojemnościach objętościowych dla tych przypadków nie przekraczały wartości $21,5\%$ [4]. W ocenie ściśliwości kłaczków zaniechyszczeń zatrzymanych w złożach filtracyjnych, posługując się klasyczną definicją współczynnika ściśliwości, wyprowadzono poniższe równanie:

$$\frac{\Delta p_z - \Delta p_o}{V_M \Delta H v_f \eta} = a_{Ro} \left(\frac{\Delta p_z}{\Delta H} \right)^s \quad (1)$$

określające sposób wyznaczania wartości s i a_{Ro} .

Umożliwia ono określenie wartości s i a_{Ro} zarówno w odniesieniu do całego złoża jak i na poszczególnych jego głębokościach. Uzyskane z obliczeń wartości współczynników ściśliwości

Tabela 2

WARTOŚCI POJEMNOŚCI MASOWEJ						
Prędkość filtracji v_f m/h	Wysokość warstwy m	Rodzaj warstwy złoża	Uziarnienie warstw złoża		Pojemność masowa warstwy kg/m ²	Pojemność masowa złoża kg/m ²
			$d_{10} \cdot 10^{-3}$ m	WR		
5,0	0,3	węgiel	1,1	1,4	0,7832	2,6877
	0,3	antracyt	1,3	1,5	2,6877	
	0,4	piasek	0,7	1,5	1,4663	
10,0	0,3	węgiel	1,1	1,6	0,7409	3,0958
	0,3	antracyt	1,3	1,5	0,4456	
	0,4	piasek	0,7	1,5	1,9093	
15,0	0,3	węgiel	1,1	1,6	1,2806	5,1008
	0,3	antracyt	1,3	1,5	0,5643	
	0,4	piasek	0,7	1,5	3,2628	

WARTOŚCI POJEMNOŚCI MASOWEJ WYZNACZONE W OPARCIU
O DANE [2]

Prędkość filtracji v_f , m/h	Wysokość warstwy m	Rodzaj warstwy złoża	Uziarnienie warstw złoża		Pojemność masowa warstwy kg/m ²	Pojemność masowa złoża kg/m ²
			$d_{10} \cdot 10^{-3}$ m	WR		
5,0	0,3	węgiel	1,0	2,6	0,6512	2,0601
	0,3	antracyt	1,08	1,56	0,7060	
	0,4	piasek	0,80	1,5	0,7026	
10,0	0,3	węgiel	1,0	2,6	1,1684	3,7771
	0,3	antracyt	1,08	1,56	1,0464	
	0,4	piasek	0,80	1,5	1,5623	
15,0	0,3	węgiel	1,0	2,6	0,6976	2,1350
	0,3	antracyt	1,08	1,56	0,5789	
	0,4	piasek	0,80	1,5	0,8385	

dla badanych wielowarstwowych złożów filtracyjnych pod koniec cyklu filtracji wynosiły $s \in <0,177; 0,785>$ natomiast wartości oporu właściwego osadu zmieniały się w przedziale $\alpha_{Ro} \in <6,89 \cdot 10^{-3}; 1,32 \cdot 10^{-8}>$. Wartości parametrów s i α_{Ro} zależały od prędkości filtracji oraz od składu zawiesiny zatrzymywanej w złożu. Wzrost prędkości filtracji powodował wzrost wartości współczynnika ściśliwości kłaczków osadu w złożu do momentu gdy osad był w złożu zatrzymywany. W przypadku dużych wartości prędkości filtracji ($V_f=15$ m/h), przy których wartość s malała, stwierdzono wypłukiwanie kłaczków zawiesiny [4]. Dla kłaczków osadu, powstających w wyniku koagulacji domieszek wód zawierających znaczne ilości zawieszin, wartości współczynnika ściśliwości były niskie. W przypadku kłaczków powstających podczas koagulacji wód barwnych, pozbawionych zawieszin wartości współczynnika ściśliwości były znacznie wyższe. Uzasadnia się to większą sztywnością struktury kłaczków utworzonych z $Al(OH)_3$ + zawieszina w porównaniu z $Al(OH)_3$ + barwa. Im mniejszą wartość osiąga współczynnik ściśliwości kłaczków osadu zatrzymanych w danym złożu tym większą pojemność masową posiada to złożo. Kłaczki osadów o dużym współczynniku s , w miarę wzrostu strat ciśnienia, ulegają ścisłaniu, przez co zmniejsza się ich objętość i są łatwiej transportowane w złożu, a następnie wypłukiwane. Pojemność masowa zależy zatem nie tylko od uziarnienia, ale także od właściwości filtracyjnych zawiesiny pokoagulacyjnej, określonych za pomocą parametrów s i α_{Ro} .

Znajomość wartości współczynnika ściśliwości i oporu właściwego, a także wyników bilansu masowego i energetycznego umożliwiła wyprowadzenie wzorów, pozwalających na wyznaczenie podstawowych parametrów projektowych procesu filtracji, a mianowicie prędkości filtracji i czasu trwania cyklu filtracyjnego.

Prędkość filtracji należy obliczać z poniższej zależności:

$$V_f = \frac{\left(\frac{\Delta p_z}{H}\right)^{1-s}}{V_M \alpha_{Ro} \eta} \quad (2)$$

natomiast czas trwania cyklu filtracyjnego ze wzoru:

$$T = \frac{V_M^2 \alpha_{Ro} H^{2-s} \varepsilon \eta}{(\Delta p_z)^{1-s} \Delta C} \quad (3)$$

Wartości parametrów zawartych we wzorach (2) i (3), uzyskane eksperymentalnie przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4
ZESTAWIENIE NIEKTÓRYCH PARAMETRÓW PROCESU FILTRACJI

Parametry procesu	Jedn.	Złożo dwuwarstwowe	Złożo trójwarstwowe
Δp_z	N/m ²	17 · 10 ²	4 · 10 ² —29 · 10 ²
H			
V_M	kg/m ²	10,11	2,1—5,1
α_{Ro}	m/kg	1,32 · 10 ⁸	6,89 · 10 ² —4,73 · 10 ⁷
s	—	0,117	0,421—0,785
ε	—	0,43—0,58	0,32—0,48
ΔC	g/m ³	30,2—154,8	3,2—47,1

Przykładowo dla następujących średnich wartości parametrów:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p_z}{H} &= 10 \cdot 10^3 \frac{N}{m^3} \\ H &= 1,0 \text{ m} \\ V_M &= 5,0 \text{ kg/m}^2 \\ \alpha_{Ro} &= 7 \cdot 10^6 \text{ m/kg} \\ s &= 0,5 \\ \eta_{20^\circ} &= 1,0 \cdot 10^{-3} \frac{Ns}{m^2} \\ \varepsilon &= 0,4 \\ \Delta C &= 8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

wyznaczono wartość prędkości filtracji równą $v_f=10,3$ m/h, natomiast cykl filtracyjny dla powyższych danych będzie trwał $T=24,3$ h. Bardzo istotnym parametrem wpływającym na długość cyklu filtracyjnego jest różnica stężenia zawieszin w dopływie i odpływie z filtra. Przy przyjęciu 2-krotnie większej wartości ΔC , czas trwania cyklu filtracyjnego skracą się także 2-krotnie. Wzory (2) i (3) można zatem bezpośrednio wykorzystać w projektowaniu filtrów pospiesznych wielowarstwowych.

Wnioski

1. Pojemność masowa wielowarstwowych złóż filtracyjnych zależy w znacznym stopniu od składu uzdatnianej wody oraz granulometrii złóż.
2. Ścisłość kłaczków osadu w złożach filtracyjnych zależy od składu uzdatnianej wody, granulometrii złóż, prędkości filtracji i prawie wcale nie zależy od czasu trwania procesu.
3. Stwierdzono istnienie korelacji pomiędzy pojemnością masową złóż a wartością współczynnika ścisłości kłaczków zawiesiny zatrzymanych w złożach. Im mniejszą wartość osiąga współczynnik ścisłości tym większą pojemność masową posiada to złożo.
4. Wyprowadzone w pracy wzory na prędkość filtracji i czas trwania cyklu filtracyjnego wiążą ze sobą pojemność masową złóż oraz ścisłość kłaczków i mogą być wykorzystane w projektowaniu filtrów wielowarstwowych.

Oznaczenia

H — wysokość złoża filtracyjnego, m
s — współczynnik ścisłości
T — czas trwania cyklu filtracyjnego, h
 U_{kl} — uwodnienie kłaczków, %
 v_f — prędkość filtracji, m h⁻¹
 V_M — pojemność masowa, kg m⁻³

WR — współczynnik nierównomierności uziarnienia,

$$WR = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

α_R, α_{Ro} — opór właściwy kłaczków, m kg⁻¹

$\frac{\Delta p}{\Delta H}, \frac{\Delta p_o}{\Delta H}, \frac{\Delta p_z}{\Delta H}$ — przyrost strat hydraulicznych na jednostkę wysokości złoża, złożo czyste, złożo zanieczyszczone, Nm⁻³

ΔC — różnica stężenia zawiesiny na dopływie i odpływie filtru, g/m³

ε — porowatość złoża

η — współczynnik lepkości dynamicznej, N sm⁻²

ρ — gęstość wody, g m⁻³

ρ_{kl} — gęstość kłaczków, g m⁻³.

LITERATURA

1. E. M. GROCHULSKA-SEGAL, A. L. KOWAL, M. M. SOZAŃSKI: Modelowanie i optymalizacja wybranych procesów w systemach technologicznych uzdatniania wody. Prace Nauk. Inst. Inż. Ochr. Środow. PWr. Nr 51. Wrocław 1985.
2. S. BIŁOZOR: O mechanizmie koagulacji barwnych domieszek wód w złożach filtrów wielowarstwowych. Praca doktorska Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr. Wrocław, 1981.
3. A. L. KOWAL: Technologia wody, Arkady, 1977.
4. E. M. GROCHULSKA-SEGAL: Analiza zjawisk procesu filtracji pospiesznej w złożach wielowarstwowych. Praca doktorska, Wrocław, 1983.

E.M. Grochulska-Segal

The effect of the properties of precipitation suspension on the design of filter beds

Making use of the physicochemical composition of raw water and of the coagulant doses, the composition and properties of precipitation suspensions were determined. The paper also includes the characteriza-

tion of such precipitation suspensions the composition and properties of which have been determined from the data reported in the literature. Criteria for estimating the filtering properties of the precipitation suspension in the bed (i.e., compressibility and resistivity) are given. Methods of determining the compressibility coefficient and resistivity values for the suspension flocs retained in the bed, are proposed. The differences in the parameter values should be attributed to the varying composition of the water to be treated.