

Jolanta Maćkiewicz

KOAGULACJA W OSADZIE ZAWIESZONYM

W procesie koagulacji w osadzie zawieszonym występują zjawiska, obserwowane zarówno w koagulacji objętościowej, jak i w złożach fluidalnych. W związku z tym, w badaniach nad osadem zawieszonym wyróżnia się kierunki technologiczne i hydrauliczne. Powiązanie tych kierunków daje pełny obraz przebiegu procesu.

W ujęciu technologicznym na uwagę zasługują efekty oczyszczania wody zależnie od stosowanych koagulantów, pH wody, a także potencjału elektrokinetycznego cząstek.

Zagadnienia hydrauliki osadu zawieszonego obejmują: prędkość przepływu wody przez warstwę osadu zawieszonego, strukturę osadu zawieszonego oraz parametry określające warunki flokulacji w osadzie zawieszonym.

Koagulanty

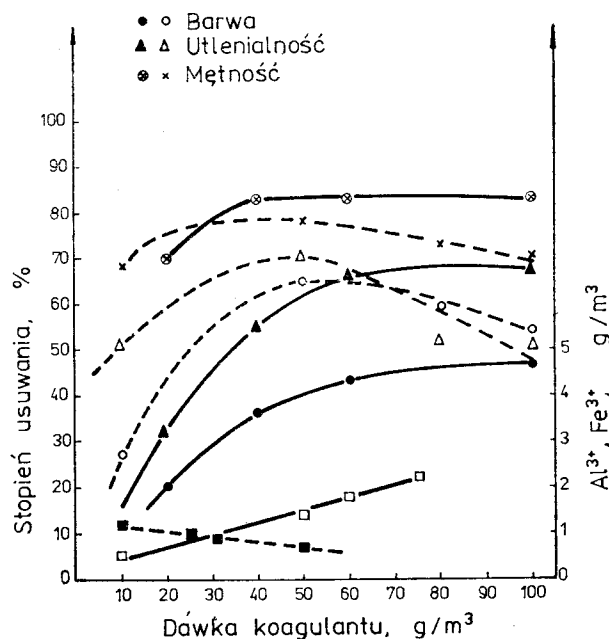
Prowadzenie koagulacji w osadzie zawieszonym umożliwia zmniejszenie dawek koagulantu, dochodzące nawet do 40%, w porównaniu do zużycia koagulantu w układzie objętościowym [1]. O ile przydatność siarczanu glinowego w tym procesie jest bezdyskusyjna, to stosowanie soli żelaza do oczyszczania wody jest wciąż kontrowersyjne, głównie ze względu na gorsze efekty usuwania barwy, bądź nawet podwyższanie jej w wyniku chelatującego działania soli żelaza. Za stosowaniem soli żelaza do koagulacji przemawiają uzyskiwane efekty usuwania zanieczyszczeń organicznych. Ponadto sole żelaza dają cięższe kłaczkowate osady niż siarczan glinowy, co korzystnie wpływa na proces prowadzony w osadzie zawieszonym. Trudniejsze jest jednakże wytworzenie osadu zawieszonego przy użyciu soli żelaza, a przede wszystkim bardzo istotne jest zachowanie reżimu pH.

Efektywność usuwania zanieczyszczeń z wody odrzańskiej w procesie osadu zawieszonego określono stosując jako koagulanty siarczan glinowy i siarczan żelazowy (rys. 1).

Przy prędkości przepływu 0,8 mm/s uzyskano lepsze efekty usuwania mętności, gdy stosowano siarczan glinowy, natomiast usuwanie barwy i utlenialności było efektywniejsze, gdy stosowano siarczan żelazowy. Optymalna dawka siarczanu glinowego wynosiła 40÷60 g/m³, przy czym zwiększenie dawki do 100 g/m³ nie zmieniło efektów oczyszczania wody. Optymalna dawka siarczanu żelazowego wynosiła 40÷50 g/m³, lecz zwiększenie dawki tego koagulantu

powodowało obniżenie efektów oczyszczania wody. Obniżenie prędkości przepływu do 0,6 mm/s spowodowało poprawę skuteczności siarczanu glinowego oraz pogorszenie skuteczności siarczanu żelazowego.

Jak wynika z uzyskanych efektów, siarczan żelazowy okazał się konkurencyjnym koagulantem w stosunku do siarczanu glinowego. Nie mniej jednak stosowanie go w praktyce jest dość kłopotliwe, z uwagi na wąski przedział dawek optymalnych. O skuteczności procesu koagulacji decyduje także ilość pozostałych w wodzie jonów koagulantu. Wraz ze wzrostem dawki koagulantu obserwowano zmniejszenie ilości żelaza pozostałego (gdy stosowano chlorek żelazowy) i wzrost stężenia glinu (gdy stosowano siarczan glinowy), szczególnie przy wyższych prędkościach przepływu wody w osadzie zawieszonym [2]. A zatem przy ustalaniu dawki optymalnej koagulantu należy się kierować nie tylko efektami usuwania zanieczyszczeń, lecz także ilością pozostałego koagulantu w postaci jonowej, który przedostaje się na filtry. Zjawisko to może mieć niekiedy korzystny wpływ na proces filtracji, powodując tzw. impregnację złoża filtracyjnego, co zwiększa efekty oczyszczania i wydłuża cykl filtracji. Może mieć miejsce także zjawisko niekorzystne, zwłaszcza przy przedawkowaniu koagulantu, gdy warstwa osadu zawieszonego nie jest stabilna, a rozdział faz bardzo rozmyty, co w rezultacie prowadzi do wynoszenia kłaczków i do zablokowania powierzchni filtrów.



Rys. 1 Efekty koagulacji (— siarczan glinowy, — — — siarczan żelazowy)

Odczyn wody

Optymalny odczyn procesu koagulacji różni się często od naturalnego odczynu wody. Zachowanie optymalnego pH podczas koagulacji prowadzi do zwiększenia efektów oczyszczania wody, a także, co jest bardzo istotne, do wydłużenia cyklu filtracji, nawet do 100% [1]. Optymalny odczyn zależy od rodzaju koagulantu oraz od rodzaju wody [3]. Ustalono, że dla koagulacji domieszek wody z Bobru siarczanem glinowym optymalne pH wynosiło 6,7÷7,5 i nie różniło się od odczynu naturalnego, natomiast dla wody z Odry było niższe od naturalnego i wynosiło ≤6,3. Dla chlorku żelazowego ustalony zakres optymalnego pH dla wody z Odry wynosił 5,0÷6,5.

Potencjał elektrokinetyczny

Wartości potencjału elektrokinetycznego zależą od dawki koagulantu. Stwierdzono, że usuwanie domieszek w procesie osadu zawieszonego zachodzi przy wyższych wartościach ζ niż w koagulacji objętościowej (tab. 1). Wskazuje to, iż proces osadu zawieszonego wymaga mniejszej destabilizacji układów koloidalnych, niż proces klasyczny.

Tabela 1
OPTIMALNY POTENCJAŁ ELEKTROKINETYCZNY USUWANIA
ZANIECZYSZCZEŃ (mV)

Wskaźnik	Koagulacja objętościowa	Osad zawieszony
Mętność	—10,0	—16,0
Barwa	— 5,0	—10,0
Utlenialność	— 5,0	—10,0

Jest to bezpośrednio związane ze stosowaniem niższych dawek koagulantu, co znajduje potwierdzenie w praktyce. Można wnioskować, że uzyskane zadowalające efekty oczyszczania przy niższych dawkach koagulantu, są wynikiem zwiększonego działania sorpcyjnego kłaczków osadu zawieszonego.

Prędkość przepływu wody

Działalność badawcza zmierza do ustalenia jak największych prędkości przepływu wody w osadzie zawieszonym, przy jednoczesnym utrzymaniu stabilności warstwy osadu. W tabeli 2

Tabela 2
PRĘDKOŚĆ PRZEPŁYWU WODY PRZES WARSZTĘ OSADU
ZAWIESZONEGO (mm/s)

Rodzaj koagulantu	wg [4]	wg [2]
Siarczan glinowy	0,6 ÷ 1,3	0,6 ÷ 0,8
Siarczan glinowy + krzemionka aktywna	1,2 ÷ 2,5	1,0
Siarczan żelazowy	0,8 ÷ 2,0*	0,8 ÷ 1,0

* + Cl₂

zestawiono wartości prędkości przepływu, uzyskane dla osadu zawieszonego w badaniach własnych oraz porównano je z danymi literaturowymi. W praktyce prędkości przepływu powyżej 1 mm/s są trudne do osiągnięcia.

Prędkość przepływu zmienia się także w zależności od temperatury wody, co jest wynikiem zmiany jej lepkości. Zmiana temperatury wody w zakresie 0÷20°C powoduje 17,5% różnicę prędkości przepływu, a co za tym idzie, taki sam spadek wydajności w okresie zimowym. Różnicę tę można skompensować zwiększając gęstość kłaczków do ok. 1,5% [3], co można uzyskać stosując obciążniki kłaczków. Fakt stosowania polielektrolitów dla poprawy jakości wody uzdatnianej w okresie niskich temperatur jest znany z praktyki eksploatacyjnej i został wyjaśniony teoretycznie. Jednakże zagadnienia tego nie wiązano z wydajnością urządzenia klarującego.

Struktura osadu

Współczynnik kohezji

Struktura osadu zawieszonego podczas przepływu wody powinna być jednolita. W przypadku rozmywania warstwy lub jej sedymentacji następuje pogorszenie efektów oczyszczania. Parametrem charakteryzującym właściwości struktury osadu jest współczynnik kohezji. Badania określające wartość współczynnika kohezji prowadzono na osadzie zawieszonym wytworzonym za pomocą siarcznanu glinowego, zapewniając ekspansję osadu w zakresie prędkości 0,15÷2,8 mm/s. Ustalono, że przy prędkościach 1,0÷1,2 mm/s występowało wypłukiwanie zawiesin z osadu zawieszonego, natomiast przy prędkościach 2,5÷2,8 mm/s obserwowano rozerwanie struktury osadu.

Ustalona wartość współczynnika kohezji dla siarcznanu glinowego wynosiła 0,27÷0,32 mm/s [5]. Osad o właściwej strukturze charakteryzują wartości współczynnika kohezji 0,33÷0,42 mm/s. Stąd wniosek, że badania prowadzono w osadzie o nie najlepszej jakości. Współczynnik kohezji jest parametrem osadu łatwo wyznaczalnym w badaniach modelowych, natomiast w urządzeniach technicznych nie jest określany. Dlatego też znaleziono zależność opisującą współczynnik kohezji na podstawie uwodnienia osadów, w postaci:

$$k = v \left(\frac{U - U_0}{1 - U} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

w której:

k — współczynnik kohezji,
v — prędkość przepływu wody,
U — uwodnienie osadu,
U₀ — uwodnienie osadu przy ekspansji E=1.

W badaniach stwierdzono, że uwodnienie osadu jest stałe prawie na całej głębokości (odchyle-

nia występują jedynie w warstwie przydennej) i wynosi $99,3 \div 99,9\%$ w zakresie prędkości $0,8 \div 1,1$ mm/s [5].

Powierzchnia właściwa i ściśliwość osadu

Powierzchnię właściwą osadu zawieszonego wyznaczono metodą glicerynową [5] i wynosiła ona $290 \text{ m}^2/\text{g}$ prawie na całej głębokości osadu. W warstwie przydennej była mniejsza i wynosiła $70 \text{ m}^2/\text{g}$. Ściśliwość osadu wyznaczono na podstawie oporu osadu (tab. 3).

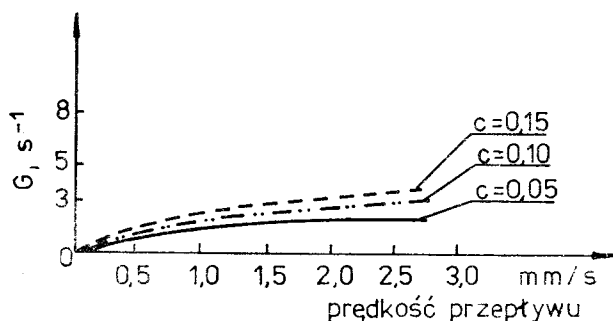
Tabela 3

ŚCIŚLIWOŚĆ OSADU ZAWIESZONEGO	
Urządzenie; koagulant	Ściśliwość
Klarownik modelowy, woda z Bobru; siarczan glinowy	$0,67 \div 0,87$
Klarownik techniczny w Lubachowie, woda ze zbiornika zaporowego; siarczan glinowy	0,79
Klarownik modelowy, woda z Odry; siarczan żelazowy	0,97

Jak do tej pory znajomość powierzchni właściwej i ściśliwości osadów jest mało przydatna do usprawnienia procesu osadu zawieszonego.

Warunki flokulacji

Warunki flokulacji opisuje gradient prędkości ruchu cieczy. Wartości gradientu prędkości w osadzie zawieszonym są niskie, do 3 s^{-1} (rys. 2) [3]. Świadczy to o korzystnych warunkach przebiegu procesu flokulacji.



Rys. 2 Gradient prędkości ruchu cieczy

Analiza gradientu prędkości z jednej strony wskazuje na niecelowe stosowanie osadników z zawieszonym osadem dla wód o niskim poziomie zanieczyszczenia (gęstość kłaczków zbliża się do 0), gdyż wówczas gradient prędkości ruchu cieczy zmierza do 0 i flokulacja w ogóle nie zachodzi, z drugiej zaś — na celowość stosowania obciążników, dla zwiększenia wartości gradientu prędkości ruchu cieczy w celu poprawy efektów koagulacji tych wód.

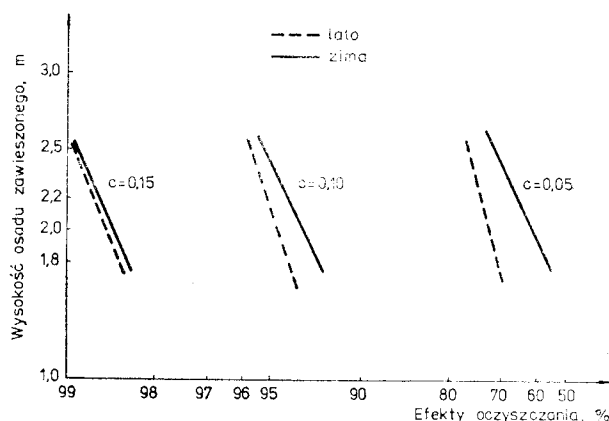
Znajomość gradientu prędkości pozwala rozwiązać równanie flokulacji:

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = \left(-\frac{\alpha}{\pi} G \cdot c \cdot t \right) \quad (2)$$

w którym:

- N_t — ilość cząstek po czasie t ,
- N_0 — początkowa ilość cząstek,
- α — współczynnik określający ilość zderzeń, prowadzących do trwałego połączenia cząstek,
- c — zawartość kłaczków,
- G — gradient prędkości ruchu cieczy,
- t — czas flokulacji ($t = h/v$),
- h — wysokość warstwy osadu zawieszonego,
- v — prędkość przepływu wody,

na podstawie którego wyznaczono wysokość warstwy osadu zawieszonego w zależności od efektów oczyszczania i zawartości kłaczków (rys. 3).



Rys. 3 Wysokość warstwy osadu zawieszonego w funkcji efektów oczyszczania i zawartości kłaczków w osadzie zawieszonym

Z przedstawionej zależności wynika, iż zadowalające efekty oczyszczania wody można uzyskać przy zachowaniu zawartości kłaczków w osadzie $0,10 \div 0,15$ i wysokości warstwy osadu $2,0 \div 2,5$ m. Dotychczas w praktyce wysokość warstwy osadu zawieszonego nie przekraczała 2,5 m, jednakże nie zwracano uwagi na zawartość kłaczków w osadzie. Stąd też wielokrotnie pojawiały się problemy eksploatacyjne urządzeń z zawieszonym osadem, zwłaszcza w okresach niskiego poziomu zanieczyszczenia wód, bądź w przypadku stosowania tych urządzeń dla oczyszczania wód miękkich.

Wartości gradientu prędkości, przy których uzyskuje się zadowalające efekty oczyszczania, różnią się niewiele od tych, przy których następuje zniszczenie struktury warstwy. W tym przypadku gradient prędkości jako kryterium flokulacji jest niewystarczającym parametrem dla prowadzenia procesu. Za parametr uzupełniający ocenę procesu przyjęto naprężenia styczne, wyznaczone z równowagi sił oporu i ścinania w warstwie osadu. Obliczone wartości naprężeń stycznych wynosiły [3]: $0,44 \text{ N/m}^2$ — przy właściwej pracy osadu zawieszonego oraz $1,5 \text{ N/m}^2$ — przy rozrywaniu struktury osadu. Przy zwiększonej wytrzymałości kłaczków, którą można osiągnąć stosując polielektrolity, wartość charakteryzująca rozrywanie struktury osadu będzie większa, co pozwoli na zwiększenie efektywności procesu.

Wnioski

1. Wykazano przydatność stosowania zarówno siarczynu glinowego jak i żelazowego w procesie osadu zawieszonego. Dla właściwego przebiegu procesu określono: optymalne dawki koagulantów, zakresy pH wody, wartości potencjału elektrokinetycznego cząstek oraz prędkości przepływu wody przez warstwę osadu zawieszonego.

2. Podano zależność określającą współczynnik kohezji w powiązaniu z uwodnieniem osadu, co pozwala określić ten parametr w urządzeniach technicznych z osadem zawieszonym.

3. Na podstawie równania flokulacji wyznaczono niezbędne wysokości warstwy osadu zawieszonego zebrane od efektów usuwania zanieczyszczeń i zawartości kłaczków w osadzie.

4. Określenie współczynnika kohezji dla osadu zawieszonego, a także zależności wynikających z równania flokulacji, przyczyni się do usprawnienia projektowania procesu koagulacji w urządzeniach z osadem zawieszonym.

LITERATURA

1. A. L. KOWAL, J. MAĆKIEWICZ: Technological aspects of sludge blanket coagulation. *Environment Protection Engineering*, No 1—4, 1982.
2. R. BROŻNIAK, J. MAĆKIEWICZ: Koagulacja solami żelaza w osadzie zawieszonym. *Mat. konf. „Zagadnienia Zaopatrzenia w Wodę Miast i Wsi”*, PZITS, Poznań 1986.
3. J. MAĆKIEWICZ: Flokulacja w procesach koagulacji i filtracji wód. PWN, Warszawa 1987.
4. I. TESÁŘIK: Flow in sludge-blanket clarifiers. *Saint. Eng. Div.*, No 10, 1967.
4. J. MAĆKIEWICZ, M. M. SOZAŃSKI: Hydrauliczna i technologiczna ocena procesu koagulacji w warstwie osadu zawieszonego. *Mat. konf. „Wysokoefektywne Metody Oczyszczania Ścieków”*, Politechnika Krakowska, Kraków 1981.

SLUDGE-BLANKET COAGULATION

Taking into account the specific character of the sludge-blanket coagulation, two aspects of the process — technological and hydraulic — should be investigated. The technological aspect includes estimation of technological effects as a function of the following parameters: type and dose of coagulant, pH of wa-

ter, and zeta potential of particles. The hydraulic aspect involves estimation of the treatment efficiency as a function of the following factors: flow rate of water, structure of the sludge blanket, and flocculation conditions. An approach combining both aspects may contribute to the improvement of the sludge-blanket coagulation process. In this paper, optimum process parameters have been determined.