

Karol Kuś

WPLYW GRADIENTU PRĘDKOŚCI NA PRACĘ OSADNIKÓW KONTAKTOWYCH

Powszechnie przyjęto, że proces koagulacji przebiega w dwóch następujących po sobie etapach, tj. etapie destabilizacji koloidów i etapie ich aglomeracji. Krótki czas destabilizacji koloidów pozwala założyć, że o szybkości koagulacji decydują warunki i sposób przeprowadzenia procesu kłaczkowania, stąd też rozróżnia się:

- koagulację perikinetyczną zachodzącą na skutek ruchów Browna,
- koagulację ortokinetyczną, wywołaną gradientem prędkości cząstek.

Udział tych procesów zmienia się w czasie i zależy od średnicy cząstek, które z upływem czasu koagulacji coraz bardziej różnią się rozmiarami. Np. dla cząstek od 1 μm i gradientu $G=1\text{s}^{-1}$, udział obu procesów jest jednakowy, później wpływ koagulacji ortokinetycznej rośnie [1].

Z równania koagulacji ortokinetycznej wynika, że na formowanie się kłaczków decydujący wpływ ma gradient prędkości wywołany mieszaniem [2, 3]:

$$J_{\text{grad}} = \frac{4}{3} (R_{ij})^3 \cdot u_i \cdot u_j \cdot G \quad (1)$$

gdzie:

- J_{grad} — liczba zderzeń w efekcie gradientu prędkości,
- R_{ij} — średnica zderzeń,
- u_i, u_j — liczba poszczególnych cząstek,
- G — gradient prędkości.

Liczba zderzeń i efektywność koagulacji rośnie bardzo szybko wraz z gradientem prędkości do pewnej wielkości granicznej, po przekroczeniu której następuje zniszczenie cząstek kłaczkowatych. Również przedłużenie czasu mieszania przyczynia się do wzrostu liczby zderzeń, czemu towarzyszy zwiększenie czasu działania sił niszczących poszczególne cząstki. Wynika stąd, że efekt kłaczkowania zależy przede wszystkim od gradientu prędkości wywołanego mieszaniem i czasu tego mieszania. Oba te parametry stanowią charakterystyczną wielkość bezwymiarową (będącą ich iloczynem) powszechnie znaną jako liczba Campa:

$$\text{Ca} = \bar{G} \cdot t \quad (2)$$

gdzie:

- Ca — liczba Campa
- $\bar{G}$ — średni gradient prędkości
- t — czas mieszania.

Zwiększenie tych parametrów możliwe jest tylko w określonym przedziale, wynikającym z odporności hydraulicznej cząstek kłaczkowatych oraz postępującego procesu ich starzenia się.

Średni gradient prędkości mieszania wyznacza się pośrednio poprzez wcześniejsze określenie ilości energii rozproszonej w danej objętości wg wzoru [4]:

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (3)$$

gdzie:

- $\bar{G}$ — średni gradient prędkości,
- P — moc włożona w mieszanie,
- V — objętość mieszanej cieczy,
- μ — współczynnik lepkości dynamicznej.

W przypadku osadników kontaktowych z zawieszonym osadem moc włożoną w mieszanie utożsamia się z mocą niezbędną do przewyciężenia straty ciśnienia wywołanej przepływem wody przez warstwę osadu zawieszonego i wyznacza ze wzoru [3, 4]:

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot Dh, \quad (4)$$

gdzie:

- Q — natężenie przepływu wody
- ρ — gęstość wody
- g — przyspieszenie ziemskie
- Dh — strata ciśnienia wywołana przepływem wody.

Strata ciśnienia wywołana przepływem wody równoważy ciężar kłaczków stanowiących warstwę zawieszonego osadu oraz straty miejscowe na skutek tarcia. Zakładając, że straty miejscowe są stałe dla danej konstrukcji urządzenia ($Q=\text{const.}$), a zmianie ulega ciężar i koncentracja kłaczków, to:

$$Dh = \frac{C(\rho_k - \rho)l}{\rho} \quad (5)$$

gdzie:

- C — koncentracja kłaczków w osadzie zawieszonym
- ρ_k — gęstość kłaczków
- l — wysokość warstwy osadu.

Trudności w bezpośrednim oznaczeniu gęstości kłaczków powodują, że wyznacza się gęstość warstwy osadu zawieszonego ze wzoru:

$$\rho_{wo} = (1 - C)\rho + C \cdot \rho_k \quad (6)$$

i obliczoną z niego wielkość ρ_k podstawia się do wzoru (5) na Dh.

Strata ciśnienia wywołana przepływem wody jest wówczas funkcją gęstości warstwy osadu zawieszonego, jej wysokości i gęstości wody:

$$Dh = \frac{(\rho_{wo} - \rho) \cdot l}{\rho} \quad (7)$$

W rezultacie tych przekształceń wzór na średni gradient prędkości przyjmuje następującą postać:

$$G = \sqrt{\frac{g(\rho_{wo} - \rho)}{\mu \cdot t}} \quad (8)$$

z której wynika, że zależy on od gęstości cząstek wysokości warstwy osadu oraz czasu przepływu wody przez tę warstwę. Większa koncentracja zawieszin w warstwie osadu zawieszonego stwarza większe prawdopodobieństwo ich zderzeń oraz wzrost gradientu prędkości, a przez to lepsze warunki dla przebiegu koagulacji ortokinetycznej. Wynika stąd, że dla tej samej wody przy jednakowych dawkach reagentów i w zbliżonych warunkach ich dozowania, typ osadnika kontaktowego nie ma większego znaczenia, jak również przewidywane obciążenia tej grupy urządzeń powinny być zbliżone do siebie. Jest to możliwe wówczas, kiedy flokulacja w warstwie osadu zawieszonego nie jest wywołana energią turbulencji. W przypadku np. akcelatora, gdzie nie występuje zjawisko osadu zawieszonego, a cząsteczki kłaczkowate znajdują się w ciągłej wędrówce, na skutek wewnętrznej cyrkulacji, szczególną rolę pełni mieszało. Jego zadanie sprowadza się do zapewnienia odpowiedniej intensywności mieszania, wymaganej wydajności pompowania i odpowiedniej krotności recyrkulacji osadu. Stąd efekt procesu mieszania i flokulacji w akcelatorze zależy znacznie od konstrukcji i parametrów eksploatacyjnych mieszała, rzutujących na stopień wykorzystania energii wprowadzonej do układu.

Konstrukcja i geometria komór wolnego mieszania związana jest z szeregiem czynników fizycznych wpływających na proces flokulacji. Wynika to np. z równania kinetyki dla procesu prowadzonego metodą jar testu [2]:

$$\frac{n_o}{n_T} = \exp \left(\frac{k \cdot a^3 \cdot \alpha_o \cdot \varphi}{\pi} \cdot G \cdot t \right) \quad (9)$$

gdzie:

n_o , n_T — liczba pierwotnych cząstek koloidalnych w jednostce objętości wody oraz po czasie t ,

α_o — współczynnik uwzględniający skuteczność łączenia się cząstek,

φ — objętość względna kłaczków (stosunek objętości kłaczków do objętości suspensji, w której te kłaczkki się znajdują),

k , a — wielkości uwzględniające rzeczywiste rozmiary koagulowanych cząstek.

W równaniu tym właśnie gradient prędkości jest parametrem, który uwzględnia czynnik kształtu i eksploatacji reaktora oraz mieszała. Przeprowadzone badania modelowe [5] wpływu konstrukcji mieszała i geometrii reaktora na efekt flokulacji wykazały, że zarówno gradienty prędkości oraz maksymalne prędkości obwodowe mieszadeł zależą nie tylko od wytrzymałości mechanicznej kłaczków. Parametry te zależą ponadto od kształtu reaktora i mieszała oraz charakteru cyrkulacji cieczy w komorze [6]. W warunkach przewagi cyrkulacji osiowej lub okrężnej, dopuszczalne prędkości obwodowe mieszadeł turbinowych i śmigłowych mogą dochodzić do 1—1,2 m/s przy średnim gradientie prędkości $G=100-130 \text{ s}^{-1}$ [5]. Natomiast przy typowej cyrkulacji promieniowej niszczenie kłaczków może być zapoczątkowane po przekroczeniu prędkości 0,4 m/s, ($G=70 \text{ s}^{-1}$).

Dobre wymieszanie wody w trakcie flokulacji może znacznie skrócić czas procesu w porównaniu do stanu bez mieszania. Jest to jeden z istotnych czynników, decydujących o szybkości aglomeracji cząstek kłaczkowatych obok składu jonowego wody, mętności, zasadowości, temperatury, rodzaju i dawek reagentów oraz czasu flokulacji.

Z badań przeprowadzonych przez Campa [7] wynika, że przy stałej szybkości obrotowej wirnika mieszała i niezmiennym kształcie naczyń, gradient prędkości mieszania rośnie w miarę zwiększania temperatury cieczy. Natomiast przy niskich temperaturach i małych gradientach poprawa efektu flokulacji możliwa jest między innymi na drodze mechanicznej, tzn. poprzez wzrost szybkości obrotów mieszała. Ponadto na efektywność procesu koagulacji wody w obniżonych temperaturach ma wpływ dawka koagulantu i flokulantu oraz pH wody. W niskich temperaturach wody zdolność destabilizacyjna koagulantów obniża się, a liczba zderzeń cząstek kłaczkowatych maleje. Miara zdolności destabilizacyjnych koagulantów jest potencjał elektrokinetyczny [8, 9]. Badania wpływu odczynu wody na zmianę potencjału elektrokinetycznego wykazały, że dla każdej temperatury wody istnieje optymalny odczyn procesu koagulacji, w którym potencjał ζ osiąga najmniejszą wartość, zaś największe obniżenie potencjału ζ następuje przy najwyższej temperaturze (a najmniejsze — przy najniższej) [8, 9]. Zmniejszona zdolność destabilizacyjna koagulantu jest przyczyną znacznych trudności w prowadzeniu koagulacji w obniżonych temperaturach wody. Wymaga to wyższych dawek koagulantu lub destabilizacji domieszek wody polielektrolitami. Zmiana potencjału ζ wywołana polielektrolitami kationowymi przebiega podobnie, jak w przypadku siarczanu glinowego (lecz przy mniejszych dawkach). Natomiast polielektrolity niejonowe nie zmieniają wartości potencjału ζ , zaś anionowe — zwiększają [9]. Te same badania określiły

również wpływ potencjału ζ na początek kłaczkowania w zależności od gradientu prędkości ruchu cieczy. Wynika stąd, że przy niskich wartościach potencjału, kłaczkowanie zachodzi już po czasie około 1 minuty i nie zależy od gradientu prędkości (są to okresy lata, kiedy temperatura wody jest wyższa, a koagulacja mało wrażliwa na zmiany intensywności mieszania). Przy wyższych wartościach potencjału ζ pojawienie się kłaczków zależy od intensywności mieszania, czemu towarzyszy zwiększony gradient prędkości i skrócony czas flokulacji. Stan ten dotyczy warunków zimowych, kiedy gradient prędkości ruchu cieczy jest mniejszy, a mieszanie mechaniczne poprawia skuteczność koagulacji.

Na uwagę zasługują wyniki badań przeprowadzonych w ZSRR [10, 11], gdzie w osadnikach kontaktowych o jednostajnym natężeniu przepływu zastosowano mieszadło mechaniczne. Prędkość obwodowa łopatek mieszadła wynosiła 0,6–0,7 m/s przy zawiesinie w wodzie surowej 150–300 mg/dm³ oraz 0,4–0,5 m/s przy zawartości zawiesiny 20–50 mg/dm³. W okresach niskich temperatur wody stosowano górne wartości podanych prędkości. Badania przeprowadzono w przedziale temperatur 274–294 K. Uzyskano następujące wyniki: zwiększoną koncentrację osadu zawieszonego, 1,5–2,0 krotnie wyższy efekt klarowania i większą wydajność klarowania o 25–30%. Szczególnie interesujące są wyniki pracy tych osadników kontaktowych w okresie zimowym, kiedy temperatura wody surowej spadła do 274 K. Prędkość wznoszenia wody w strefie klarowania, przy której osad utrzymywał się w stanie złoża zawieszonego wynosiła wówczas około 1,0 mm/s. Takich efektów nie udało się uzyskać na pozostałych klarownikach pracujących bez mieszadeł. Wynika stąd, jak znaczny wpływ na przebieg procesu koagulacji w osadnikach kontaktowych wywiera mieszanie mechaniczne. Jest ono czynnikiem zwiększającym liczbę zderzeń cząstek kłaczkowatych poprzez odpowiednio utrzymywany gradient prędkości i zdolność destabilizacyjną koagulantów, zwłaszcza w okresach obniżonych temperatur wody. Wędrowka cząstek kłaczkowatych na skutek mieszania i recyrkulacji osadu zwiększa ich koncentrację oraz sprzyja całkowitemu wykorzystaniu dodawanych reagentów, przez co koszty eksploatacyjne tych urządzeń są mniejsze. Również nagłe zmiany składu wody surowej wyrównywane są przez nadmiar chemicznie aktywnego osadu. Przewaga osadników kontaktowych z mieszaniem i recyrkulacją osadu nad pozostałymi grupami tych urządzeń jest znaczna. Istnieje bowiem możliwość dostosowywania w pewnym zakresie intensywności mieszania i krotności recyrkulacji do składu wody surowej, a zwłaszcza zaś do temperatury, co w naszej strefie klimatycznej ma duże znaczenie. Urządzenia te są eksploatacyjnie elastyczniejsze, technologicznie i hydraulicznie sprawniejsze, a pod względem zużycia reagentów oszczędniejsze w porównaniu z osadnikami kontaktowymi o jednostajnym natężeniu przepływu jak i o przepływie pulsacyjnym.

Wnioski

1. O szybkości aglomeracji cząstek kłaczkowatych obok składu jonowego wody, mętności, zasadowości, temperatury, rodzaju i dawki reagentów oraz czasu flokulacji, decyduje efektywne wymieszanie wody w trakcie flokulacji.
2. Liczba zderzeń cząstek kłaczkowatych i efektywność koagulacji rośnie wraz z gradientem prędkości do pewnej wielkości granicznej, po przekroczeniu której następuje niszczenie tych cząstek. Efekt kłaczkowania zależy przede wszystkim od gradientu prędkości wywołanego mieszaniem i czasu tego mieszania.
3. W przypadku osadników kontaktowych z osadem zawieszonym średni gradient prędkości zależy od koncentracji cząstek kłaczkowatych, ich gęstości, wysokości warstwy osadu zawieszonego oraz czasu przepływu wody przez tę warstwę.
4. Na efektywność procesu koagulacji wody w obniżonych temperaturach ma wpływ nie tylko dawka koagulantu i flokulantu oraz pH wody, ale również gradient prędkości wywołany mieszaniem. W okresach tych zdolność destabilizacyjna koagulantów obniża się, co utrudnia kłaczkowanie. Mieszanie mechaniczne jest tutaj czynnikiem zwiększającym liczbę zderzeń cząstek kłaczkowatych poprzez odpowiednio utrzymany gradient prędkości i zdolność destabilizacyjną koagulantów.

LITERATURA

1. T. R. CAMP: American Society of Civil Engineers, 1953, 9, s. 283.
2. H. S. HARRIS, W. I. KAUFMAN, R. B. KRONE: Orthokinetic Flocculation in Water Purification. Journal of the Sanitary Engineering of Civil Engineers, ASCE, 1966, 12, s. 95–111.
3. M. BŁĄŻEJEWSKI, J. GRZYBEK: Badania nad optymalizacją procesu koagulacji w urządzeniach z zawieszonym osadem. IKS, Poznań, 1976, maszynopis.
4. I. TESARIK, J. VOSTRCHL: Influence des facteurs hydrauliques et chimiques sur la coagulation orthocinétique. La Tribune du Cebedeau, 1969, 309–310, s. 369–373.
5. J. UMINSKI: Wpływ niektórych typów mieszadeł i reaktorów na wyniki wolnego mieszania w procesie koagulacji zanieczyszczeń wody. Archiwum Ochrony Środowiska, PAN, Ossolineum, 1980, 2, s. 89–123.
6. J. SIERADZON: Technologiczne aspekty szybkiego mieszania w akceleratorach. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1977, 4, s. 122–123.
7. T. R. CAMP: Floc Volume Concentration. JAWWA, 1968, 6.
8. A. L. KOWAL, J. MACIEWICZ: The Effect of Water Temperature on the Course of Alum Coagulation of Colloidal Particles in Water. Environment Protection Engineering, 1975, T1, 1, 63.
9. J. MACIEWICZ: Rola potencjału elektrokinetycznego w wybranych procesach oczyszczania wody. Archiwum Ochrony Środowiska, PAN, Ossolineum, 1980, 2, s. 63–74.
10. A. I. PACIUKOW: Issledowanie raboty osvetlitiela s mechanicheskoy mieszałkoj. Wodosnabzhenije i Sanitarnaja Technika, 1977, 4, s. 24–26.
11. A. I. PACIUKOW: Osvetlitel s mechanicheskoy mieszałkoj. Wodosnabzhenije i Sanitarnaja Technika, 1980, 4, s. 30–32.

The effect of the velocity gradient on the operation of the contact settling tanks

The average velocity gradient of sludge blanket clarifiers depends on the concentration and density of the floc particles, on the depth of the sludge blanket

layer and on the duration of water flow through this layer. Higher concentrations of suspended solids in the sludge blanket create favourable conditions for collision and increase the velocity gradient, thus improving the course of orthokinetic coagulation. Contact settling tanks involving mixing and recirculation of sludge have the advantage of fitting the intensity of mixing and the number of recirculations to the composition of raw water, and specifically to water temperature.