

Marcin Kłos

Zastosowanie analizatora prądu strumieniowego do kontroli procesu koagulacji wymiatającej

Analizator prądu strumieniowego (APS) jest urządzeniem stosowanym w praktyce oczyszczania wody i ścieków już od prawie 50 lat. Obecnie można wyróżnić dwa podstawowe kierunki jego wykorzystania – pierwszy, który jest związany z kontrolą dawki koagulantu w czasie rzeczywistym oraz drugi, kiedy przyrząd ten stosuje się do określania ładunku powierzchniowego koloidów, w tym do badań skuteczności koagulantów i flokulantów [1–4]. Pomimo szeregu badań nad automatyzacją procesu koagulacji z wykorzystaniem APS oraz wielu wdrożeń, nie zawsze wyniki zastosowania tego urządzenia były zgodne z oczekiwaniami. Najczęściej wynikało to z błędnego założenia, że zastosowanie tego urządzenia pozwoli na identyfikację i przeciwdziałanie wszystkim problemom występującym podczas realizacji tego procesu [5, 6].

Z uwagi na to, że na skuteczność koagulacji ma wpływ bardzo wiele czynników (jakość ujmowanej wody, jej zmienność w ciągu doby i roku, dobowe zapotrzebowanie na wodę określające obciążenia hydrauliczne poszczególnych urządzeń) oraz parametrów technologicznych (rodzaj koagulantu i środków wspomagających flokulację, sposób realizacji procesu koagulacji i separacji zawieszin pokoagulacyjnych), zastosowanie APS nie rozwiąże wszystkich problemów technologicznych. Rozwiązania techniczne oraz sposób wykorzystania tego urządzenia pozwalają jedynie na kontrolę dawki koagulantu w sposób pozwalający na dostosowanie jego ilości do zmian jakości ujmowanej wody. Analizator prądu strumieniowego nie pozwala natomiast ani na określenie źródła problemów powodujących zmniejszenie skuteczności koagulacji, ani na ich eliminację. Dlatego też APS powinien być jednym z wielu elementów układu kontroli i sterowania w układzie koagulacji. Uzupełnienie analizatora powinny stanowić urządzenia należące do dwóch grup – pierwsza to zespół urządzeń pozwalających na kontrolę wskaźników jakości ujmowanej wody, które nie są monitorowane przez APS, natomiast druga powinny stanowić elementy kontrolujące skuteczność procesu koagulacji i separacji zawieszin pokoagulacyjnych w zakresie określonego zestawu wskaźników jakościowych.

W artykule przedstawiono wyniki badań nad możliwością sterowania procesem koagulacji pogłębionej, prowadzonej wg mechanizmu koagulacji wymiatającej bez korekty pH. Sterowanie procesem odbywało się w oparciu o pomiar wartości prądu strumieniowego (SCD), jako wskaźnika zmian wartości potencjału elektrokinetycznego oraz jakości wody przed i po koagulacji.

Cel i metodyka badań

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie możliwości zastosowania analizatora prądu strumieniowego do sterowania procesem koagulacji. Wyniki badań [5, 7–9] pokazały, że wykorzystanie tego urządzenia nie zawsze pozwala na uzyskanie największej skuteczności koagulacji, z uwagi na brak możliwości oceny skutków prowadzonych działań w czasie rzeczywistym i korekty parametrów prowadzenia procesu. W celu zwiększenia skuteczności działania systemu przeprowadzono badania nad zastosowaniem układu opartego na APS wraz z elementami pozwalającymi na kontrolę jakości wody (przed i po koagulacji) w czasie rzeczywistym. Wykorzystując wyniki wcześniejszych badań [9, 10], analizator prądu strumieniowego uzupełniono o pomiar mętności (M) i liczby cząstek (LC), jako elementu kontroli ilości i wymiaru cząstek pokoagulacyjnych, oraz absorbancji w nadfiolecie przy długości fali 254 nm (UV) jako wskaźnika ilości zanieczyszczeń organicznych bardzo dobrze korelującego z zawartością ogólnego węgla organicznego w wodzie [11].

Badania przeprowadzono wykorzystując instalację pilotową o wydajności ok. 1 m³/h na stacji oczyszczania wody w rejonie górskim. Instalacja składała się z szybkiego mieszacza hydraulicznego oraz dwusekcyjnej komory flokulacji zablokowanej z osadnikiem z pakietami sedymentacyjnymi [5]. Proces koagulacji prowadzono przy użyciu wstępnie zhydrolizowanego koagulantu glinowego, bez stosowania flokulantu. Do pomiaru liczby cząstek wykorzystano analizator ARTI WPC21 (Hach), mętność wody mierzono metodą nefelometryczną za pomocą mętnościomierza Turbimax W CUS41 (Hach), natomiast absorbancję w nadfiolecie oznaczono sondą UVAS plus sc (Hach). Zakres badań obejmował dwa etapy:

- weryfikację algorytmów uzyskanych podczas analizy procesu prowadzonego w układzie technicznym,
- kontrolę skuteczności usuwania zanieczyszczeń organicznych w procesie koagulacji wymiatającej.

Celem pierwszego etapu badań było sprawdzenie przydatności określonych we wcześniejszych badaniach [9] algorytmów kontroli dawki oraz ocena ich skuteczności, natomiast w drugim etapie dokonano kontroli działania systemu z uwagi na uzyskanie jak największego stopnia usunięcia związków organicznych z wody. Biorąc pod uwagę jakość wody górskiej ujmowanej ze zbiornika zapowego, charakteryzującej się niewielką mętnością (mediana w czasie badań wynosiła 5,1 NTU), wzrost skuteczności usuwania naturalnych substancji organicznych na drodze koagulacji wymiatającej był trudny, ze względu na problem zwiększenia liczby cząstek spowodowany większą dawką

koagulantu. Z tego powodu jako kryterium oceny procesu koagulacji przyjęto skuteczność usuwania substancji organicznych, przy utrzymaniu jak najmniejszej liczby cząstek w wodzie opuszczającej osadnik. Do analizy wyników badań wykorzystano program Statistica 9.1 wraz z pakietem Automatyczne Sieci Neuronowe oraz Zaawansowane Modele Liniowe i Nieliniowe.

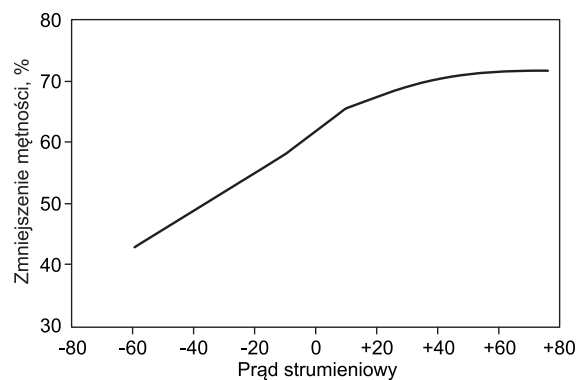
Omówienie wyników badań

Weryfikacja algorytmów kontroli dawki koagulantu

Badania poprzedzające testy pilotowe zostały przeprowadzone w układzie technicznym stacji oczyszczania wody, gdzie wykonano badania pilotowe. Wyniki tych badań pokazały, że możliwe jest prognozowanie wymaganej dawki koagulantu w oparciu o proste zależności uzyskane na drodze regresji nieliniowej [9]. Spośród szeregu zależności, jako najlepsze wytypowano dwie, pozwalające na określenie wymaganej dawki koagulantu na podstawie wybranych wskaźników jakości ujmowanej wody. W tabeli 1 zestawiono parametry modeli regresyjnych przetestowanych w układzie technicznym stacji oraz pilotowym układzie badawczym, w odniesieniu do wymaganych dawek ustalonych w klasycznych testach naczyniowych.

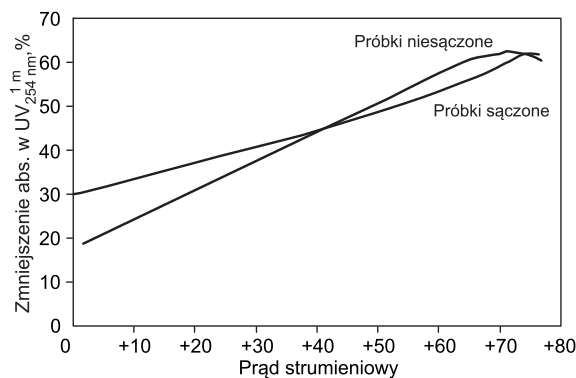
Zastosowanie algorytmów prognozowania dawki w układzie technicznym pozwoliło na uzyskanie stabilnej pracy układu pilotowego. Wyliczone dawki koagulantu podwyższały wartość prądu strumieniowego z ok. -40 (w przypadku ujmowanej wody) do przedziału od +50 do +55. Mętność wody opuszczającej osadnik wynosiła $1,5 \div 2,5$ NTU, a stopień usunięcia związków organicznych (absorbancja w nadfiolecie) wynosił około 50%, zarówno w próbkach niesączonych, jak i sączonych. Analiza danych pokazała, że nie były to jednak optymalne dawki koagulantu. Biorąc pod uwagę wartość prądu strumieniowego, jako stopnia neutralizacji potencjału elektrokinetycznego cząstek, na rysunkach 1 i 2 przedstawiono skuteczność usuwania związków organicznych oraz klarowania wody w funkcji tego parametru.

Analizując te zależności można zauważyć, że najlepszą skuteczność klarowania wody uzyskano przy wartości prądu strumieniowego w przedziale od +50 do +60 (rys. 1), przy czym dalsze zwiększanie wartości tego parametru nie miało już praktycznie wpływu na zmianę stopnia zmniejszenia mętności wody. W przypadku absorbancji w nadfiolecie zależność przedstawiała się nieco inaczej. Badając próbki niesączone największy stopień oczyszczenia wody odnotowano, kiedy dawka koagulantu była większa i zapewniła wzrost wartości prądu strumieniowego do +70. Po przekroczeniu wartości +72 odnotowano spadek skuteczności oczyszczania wody mierzony tym wskaźnikiem.



Rys. 1. Zależność stopnia sklarowania wody od wartości prądu strumieniowego

Fig. 1. Relationship between the extent of water clarification and the stream current value



Rys. 2. Zależność stopnia usuwania substancji organicznych (absorbancja w nadfiolecie) od wartości prądu strumieniowego

Fig. 2. Relationship between the extent of organic matter removal (UV absorbance) and the stream current value

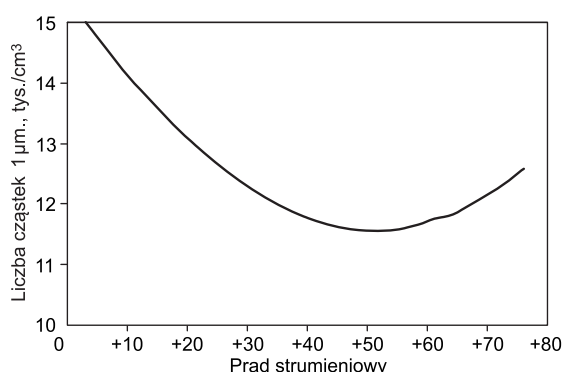
W badaniach próbek sączonych zależność ta przedstawiała się podobnie, jak w przypadku próbek niesączonych, z tym, że maksimum stopnia usunięcia wystąpiło przy wartości prądu strumieniowego +75 (rys. 2). Różnica ta wynikała z faktu, że po przekroczeniu wartości prądu strumieniowego +55 nastąpił znaczący wzrost liczby drobnych cząstek o wymiarach ok. 1 μ m (rys. 3).

Uzyskane dane potwierdziły wcześniejsze obserwacje, że podczas koagulacji wymiatającej następuje znaczący wzrost liczby drobnych cząstek powstałych na skutek działania koagulantu. Cząstki te trudno ulegają agregacji i powodują problemy z ich separacją nawet na etapie filtracji pospiesznej [7, 8]. Dlatego też, biorąc pod uwagę kwestię kontroli procesu pod względem uzyskania maksymalnego stopnia usunięcia zanieczyszczeń organicznych, jako dodatkowe kryterium jego skuteczności należy wprowadzić liczbę cząstek w wodzie po procesie koagulacji.

Tabela 1. Parametry modeli regresyjnych do prognozowania dawki koagulantu
Table 1. Parameters of regression models for predicting the coagulant dose

Układ	Formuła modelu regresji	Parametry estymacji	RMSE
Techniczny	$D_{Al} = B_1[UV] + B_2[M]$	$R=0,996$; $R^2=0,993$; skorygowany $R^2=0,992$ błąd standardowy estymacji – 3,12	3,81
	$D_{Al} = B_1[UV] + B_3 \log[LC]$	$R=0,996$; $R^2=0,992$; skorygowany $R^2=0,991$ błąd standardowy estymacji – 3,29	3,12
Pilotowy	$D_{Al} = B_1[UV] + B_2[M]$	$R=0,979$; $R^2=0,959$; skorygowany $R^2=0,958$ błąd standardowy estymacji – 6,19	6,02
	$D_{Al} = B_1[UV] + B_3 \log[LC]$	$R=0,985$; $R^2=0,970$; skorygowany $R^2=0,969$ błąd standardowy estymacji – 5,26	5,09

UV – absorbancja w nadfiolecie, M – mętność, LC – liczba cząstek o wymiarze ok. 1 μ m



Rys. 3. Zależność liczby cząstek o wymiarze ok. 1 μm od wartości prądu strumieniowego

Fig. 3. Relationship between the number of ~1 μm particles and the stream current value

Kontrola usuwania zanieczyszczeń organicznych

Analiza wyników przedstawionych w tabeli 1 potwierdziła, że zależności opracowane z wykorzystaniem testów naczyniowych pozwoliły na skuteczną kontrolę i sterowanie procesem koagulacji wymiatającej. Jednak skuteczność usuwania zanieczyszczeń organicznych z wody nie była zadowalająca. Spowodowane to było ograniczeniami, które niosła za sobą przyjęta metodyka testów laboratoryjnych. Do jej podstawowych ograniczeń należy zaliczyć traktowanie dawki koagulantu jako zmiennej nieciągłej, czas trwania koniecznych testów w stosunku do szybkości zmian jakości ujmowanej wody oraz brak jasnych kryteriów wyboru dawki koagulantu [6–9]. Skutkiem tego była sytuacja, w której wybrana dawka koagulantu z reguły mieściła się w zakresie dawek skutecznych, jednak nie była właściwą dawką w czasie między wykonywaniem testów naczyniowych. Dodatkowym elementem wpływającym niekorzystnie na skuteczność procesu był brak możliwości uwzględnienia działania poszczególnych urządzeń w ocenie końcowej skuteczności koagulacji i separacji zawieszin pokoagulacyjnych. W celu eliminacji tych problemów zdecydowano się na zmianę sposobu sterowania dawką koagulantu. Nowy algorytm postępowania był następujący:

- na podstawie jakości ujmowanej wody (absorbancja w nadfiolecie, mętność lub liczba cząstek o wymiarze ok. 1 μm) oraz parametrów hydraulicznych (strumień objętości, obciążenie hydrauliczne osadnika) określa się możliwą do osiągnięcia skuteczność procesu przy przyjętym kryterium oczyszczania wody, tj. usunięciu związków organicznych lub zawieszin (mętność wody, liczba cząstek),

- przy określonej spodziewanej skuteczności procesu koagulacji szacuje się wartość prądu strumieniowego, przy której nastąpi spodziewane osiągnięcie założonej skuteczności układu technologicznego,

- analizator utrzymuje zadaną wartość prądu strumieniowego, korygując dawkę koagulantu.

Do utrzymania stabilnej pracy systemu, w oparciu o powyższy schemat postępowania, ważne jest uwzględnienie dwóch elementów, tj. weryfikacji osiągnięcia założonej skuteczności pracy układu oraz określenia częstości i warunków brzegowych korekty dawki koagulantu w zależności od zmian jakości ujmowanej wody.

W celu określenia wpływu tych elementów na skuteczność i stabilność pracy systemu sterowania przeprowadzono testy, w czasie których system pracował w trybie półautomatycznym. W tym trybie algorytm działania nie był

przystosowany do pracy bezpośrednio w sterowniku, lecz wymagana wartość prądu strumieniowego była wyliczana i zadawana zewnętrznie do APS jako wartość docelowa i utrzymywana przez układ sterujący systemem. Wyniki przeprowadzonych testów pokazały, że skuteczność zastosowanego drugiego ze sposobów prognozowania dawki koagulantu była większa niż w przypadku, gdy szacowanie opierało się bezpośrednio na wskaźnikach jakości ujmowanej wody. Wartości prądu strumieniowego kształtowały się od +65 do +75, a stopień usunięcia zanieczyszczeń organicznych (absorbancja w nadfiolecie) zarówno w próbkach sączonych, jak i niesączonych był większy średnio o ok. 12% i kształtował się w zakresie 60–65%. Weryfikacja założonych efektów wykazała, że rzeczywisty stopień usunięcia zanieczyszczeń organicznych był o około 5% mniejszy niż zakładany. Próby korekty dawki koagulantu w celu osiągnięcia założonego stopnia zmniejszenia absorbancji w nadfiolecie nie przyniosły pozytywnych rezultatów. Po zmniejszeniu dawki koagulantu skuteczność oczyszczania wody zmalała, a jej zwiększenie spowodowało co prawda nieznaczny spadek absorbancji próbek sączonych, ale jednocześnie zauważono znaczący wzrost liczby cząstek opuszczających osadnik, co skutkowało tym, że absorbancja próbek niesączonych pozostawała bez zmian. Wyniki te po raz kolejny potwierdziły, że stosując koagulację wymiatającą w oczyszczaniu wody o małej mętności należy liczyć się z problemami spowodowanymi prowadzeniem tego procesu w warunkach przesylenia wody produktami hydrolizy, które są widoczne w postaci drobnych niezaglomerowanych cząstek.

W czasie testów określono również warunki, w których powinna być ponownie szacowana możliwa do osiągnięcia skuteczność procesu, a na jej podstawie wymagana wartość prądu strumieniowego. Wyniki badań wykazały, że w przypadku wody ujmowanej przez stację pilotową nie można było określić ram czasowych, kiedy powinna nastąpić rekalkulacja założeń do prognozowania dawki koagulantu. Było to spowodowane znaczną dynamiką zmian jakości ujmowanej wody. Dlatego też po przeprowadzeniu szeregu symulacji określono jednostkową wartość zmian absorbancji w nadfiolecie oraz liczby cząstek w ujmowanej wodzie, przy której powinna być uruchomiona procedura ponownego szacowania dawki koagulantu. Wartości te wyniosły odpowiednio 1,1 (absorbancja w UV_{254nm}^{1m}) oraz 1300 cząstek o wymiarze ok. 1 μm. Przedział czasu, w którym powinny być analizowane zmiany tych wskaźników wyniósł 120 min. Oznacza to, że jeśli w czasie 2 h nastąpiła zmiana jednego ze wskaźników o powyższą wartość, wówczas należy na nowo oszacować wartość prądu strumieniowego i wprowadzić go do systemu jako wymagany poziom, który APS powinien utrzymywać. Wyniki pracy układu oczyszczania wody wg powyższych warunków pokazały, że przyjęte parametry działania systemu sterowania dawką koagulantu pozwoliły na jego stabilną pracę przez ponad 6 tygodni, tj. przez cały czas prowadzenia badań. Niemniej jednak, pomimo wyników znacząco lepszych niż w układzie technicznym, nie udało się na drodze sterowania dawką koagulantu rozwiązać problemu wzrostu liczby drobnych cząstek w wodzie po procesie koagulacji i separacji zawieszin. Pojawiały się one za każdym razem, gdy przekroczono wartość prądu strumieniowego +60.

Na drodze testów stwierdzono, że najlepszym rozwiązaniem, pozwalającym na eliminację tego problemu, jest wprowadzenie recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego. Po zastosowaniu recyrkulacji oraz wpracowaniu całego układu

zdołano nie tylko wyeliminować to zjawisko, ale także znacząco zmniejszyć liczbę cząstek o wymiarze ok. 1 µm do 8500÷10500.

Wnioski

♦ Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że rozbudowa systemu sterowania dawką koagulantu w czasie rzeczywistym, opartego na analizatorze prądu strumieniowego, opartego na pomiarze zawartości związków organicznych (absorbancji w nadfiolecie przy długości fali 254 nm) oraz zawiesin, ze szczególnym uwzględnieniem cząstek o wymiarze ok. 1 µm, pozwala na znaczne rozszerzenie jego możliwości technologicznych. Zastosowanie dodatkowych urządzeń pomiarowych pozwoliło nie tylko na zwiększenie dokładności prognozowania dawki koagulantu, ale umożliwiło sprawniejszą kontrolę skuteczności oczyszczania wody oraz szybszą reakcję na pojawiające się nieprawidłowości w układzie technologicznym.

♦ O skuteczności technologicznej układu sterowania procesem koagulacji decydowała jakość przyjętych algorytmów prognozowania dawki koagulantu. Analiza danych doświadczalnych pokazała, że zastosowanie prostych modeli regresyjnych wdrożonych wg następującej procedury:

– prognozowanie tzw. optymalnej dawki koagulantu na podstawie jakości wody surowej w określonych interwałach czasowych determinowanych kinetyką zmian badanych wskaźników jakościowych,

– stabilizacja dawki za pomocą analizatora prądu strumieniowego,

– analiza skuteczności procesu na podstawie założonych kryteriów oparta o pomiar określonych wskaźników w czasie rzeczywistym oraz w przypadku braku spełnienia założeń wprowadzenie korekty dawki koagulantu,

pozwoło na uzyskanie stabilnych warunków pracy układu koagulacji, lecz prowadzonej jedynie w oparciu o mechanizm neutralizacji ładunku i agregacji zawiesin pokoagulacyjnych. W przypadku konieczności zastosowania mechanizmu koagulacji wymiatającej konieczna była modyfikacja procedury wg następującego scenariusza:

– określenie wymaganego stopnia zmniejszenia wartości określonego wskaźnika na podstawie jakości ujmowanej wody w danych przedziałach czasu wynikających z kinetyki zmian badanych wskaźników jakości wody,

– prognozowanie wymaganej wartości prądu strumieniowego oraz stabilizacja dawki przez analizator prądu strumieniowego,

– analiza skuteczności procesu koagulacji na podstawie założonych kryteriów oparta na pomiarze określonych

wskaźników jakości wody w czasie rzeczywistym oraz w przypadku braku spełnienia założeń – wprowadzenie korekty dawki koagulantu.

♦ W trakcie prowadzenia procesu koagulacji wymiatającej pojawiały się duże ilości niezaglomerowanych cząstek. Wyniki doświadczeń pokazały, że dobrym sposobem na ich aglomerację i usunięcie w osadniku była recyrkulacja osadu pokoagulacyjnego. Proces ten może być bardziej skuteczny i znacznie ekonomiczniejszy niż stosowanie wysokocząsteczkowych flokulantów organicznych.

LITERATURA

1. H. BERNHARDT, H. SCHELL: Control of flocculants by use of a streaming current detector. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua* 1993, Vol. 42, pp. 239–251.
2. F. BERNAZEAU, P. PIERRONE, J.P. DUGUET: Interest in using a streamline current detector for automatic coagulant dose control. *Water Supply*, 1992, Vol. 10, No. 4, pp. 87–96.
3. K.S. DENTEL: Use of streaming current detector in coagulation monitoring and control. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua* 1995, Vol. 44, pp. 70–79.
4. K.S. DENTEL, A.V. THOMAS, K.M. KINGERY: Evaluation of the streaming current detector. I. Use in jar tests. *Water Research* 1989, Vol. 23, No. 4, pp. 413–421.
5. M. KŁOS: Sterowanie dawką koagulantu jako element optymalizacji procesu koagulacji. W: M.M. SOZAŃSKI [red.]: *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód – zagadnienia współczesne*. PZITS Oddział Wielkopolski, Poznań 2010, t. I, ss. 385–396.
6. T.-H. HAN, E.-S. NAHM, K.-B. WOO, C.J. KIM, J.-W. RYU: Optimization of coagulant dosing process in water purification system. Proc. of the 36th SICE Annual Conference, Tokushima 1997, pp. 1105–1109.
7. M. KŁOS, J. GUMIŃSKA: Badania nad określeniem stopnia spolimeryzowania wstępnie zhydrolizowanych koagulantów glinowych. *Ochrona Środowiska* 2007, vol. 29, nr 2, ss. 27–31.
8. M. KŁOS, J. GUMIŃSKA: Wykorzystanie pomiaru liczby cząstek do optymalizacji dawki koagulantu w oczyszczaniu wód powierzchniowych. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 3, ss. 25–28.
9. M. KŁOS, J. GUMIŃSKA: Zastosowanie sterowania dawką koagulantu w czasie rzeczywistym w celu zwiększenia skuteczności procesu koagulacji. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 71–76.
10. H.R. MAIER, N. MORGAN, C.W.K. CHOW: Use of artificial neural networks for predicting optimal alum doses and treated water quality parameters. *Environmental Modelling & Software* 2004, Vol. 19, No. 5, pp. 485–494.
11. M. SWIDERSKA-BRÓŹ, M. WOLSKA: Usuwanie frakcji ogólnego węgla organicznego z wody powierzchniowej w procesie koagulacji. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 1, ss. 9–12.

Kłos, M. Use of the Stream Current Analyzer for the Control of Sweep Coagulation. *Ochrona Środowiska* 2012, Vol. 34, No. 2, pp. 15–18.

Abstract: Efforts at improving the coagulation effect during water treatment require that the coagulation process should be conducted according to the underlying assumptions of enhanced coagulation. A sine qua non condition for achieving this is the switch from the mechanism of adsorption–destabilization of the pollutants to the mechanism governing sweep coagulation. A side-effect of such a switch is the risk that excessive amounts of residual coagulant and post-coagulation suspended solids will appear in the effluent from the settling tank. In this paper presented are the results of investigations into a procedure of coagulant dose

control in real time. In the procedure use is made of a stream current analyzer, which not only significantly improves the efficiency of the coagulation process, but also minimizes the proportion of fine particles in the post-coagulation suspended solids. The study has produced the following findings. The development of the procedure by including measurements of organic matter content (UV absorbance at 254 nm) and suspended solids (with major focus on particle size of ~1 µm) had a beneficial effect on the technological performance of the control system, as well as on the accuracy of predicting the coagulant dose.

Keywords: Sweep coagulation, coagulant dose control, pre-hydrolyzed coagulant, stream current analyzer, prediction, water control.