

Katarzyna Majewska-Nowak, Justyna Górna

Przydatność wybranych kationowych środków powierzchniowo czynnych do usuwania nieorganicznych związków fosforu z roztworów wodnych metodą ultrafiltracji micelarnej

Związki fosforu trafiają do środowiska wodnego przede wszystkim w wyniku erozji gleby, wietrzenia skał i rozpuszczania minerałów, a także odprowadzania ścieków lub wraz z opadami atmosferycznymi. Zawartość związków fosforu jest zmienna w zależności od pory roku, a także zależy od stopnia zanieczyszczenia środowiska wodnego. Latem następuje wzmożona aktywność biologiczna glonów i zużywają one więcej fosforu, co powoduje zmniejszenie jego ilości w wodach powierzchniowych. Maksymalne ilości fosforu notuje się w okresie zimowym, przy praktycznym braku produkcji biologicznej.

Usuwanie fosforanów ze ścieków wynika z konieczności ograniczenia nadmiernego rozwoju fitoplanktonu w wodach będących ich odbiornikiem. Z tego też względu ogólna ilość fosforu w ściekach odprowadzanych do odbiornika nie powinna przekraczać $1\div 5 \text{ gP/m}^3$ (w zależności od RLM) [1]. W wodzie przeznaczony do spożycia przeciętne ilości fosforanów nie są szkodliwe dla zdrowia i polskie ustawodawstwo ich nie reguluje. Zdarza się nawet dodawanie fosforanów do wody w celu ochrony przed korozją i wytrącaniem niektórych związków, np. żelaza lub wapnia w sieciach wodociągowych [2, 3]. Z drugiej strony istnieje bezwzględna konieczność usuwania jonów PO_4^{3-} z wody kierowanej do sieci wodociągowej, gdyż traktowane są one jako czynnik decydujący o potencjale wtórnego rozwoju mikroorganizmów i powstawaniu biofilmu w rurociągach [4, 5]. Zalecana zawartość fosforanów w wodach powierzchniowych wykorzystywanych do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia nie powinna przekraczać $0,7 \text{ gPO}_4^{3-}/\text{m}^3$ [6].

Metody usuwania fosforanów ze środowiska wodnego można podzielić na trzy zasadnicze grupy – chemiczne, biologiczne oraz fizyczne [7–10]. Chemiczne usuwanie związków fosforu polega na przekształcaniu rozpuszczalnych fosforanów w nierozpuszczalne sole w procesie strącania za pomocą jonów metali (wapnia, żelaza lub glinu). Główne wady tego procesu to zwiększona ilość wytwarzanego osadu, wzrost zawartości jonów metali w osadzie i wysokie koszty eksploatacyjne [7]. Biologiczne usuwanie związków fosforu ze ścieków opiera się na wykorzystaniu bakterii fosforowych zdolnych do gromadzenia fosforu w swojej masie w większych ilościach niż wynika to z ich zapotrzebowania metabolicznego. Biologiczna defosfatacja nie zawsze jednak gwarantuje stabilną jakość ścieków

oczyszczonych i dodatkowo stwarza niebezpieczeństwo wtórnego uwalniania fosforu w procesach przeróbki osadów [9]. Do metod fizycznych usuwania fosforanów ze środowiska wodnego można zaliczyć techniki membranowe – odwróconą osmozę i elektrodializę – oraz wymianę jonową [11–14]. Metody te stosowane są najczęściej jako trzeci stopień oczyszczania ścieków (odnowa wody) i wymagają wcześniejszego usunięcia zanieczyszczeń powodujących blokowanie membran (fouling) lub degradację jonitów (substancje koloidalne i makrocząsteczki organiczne, a także związki żelaza i manganu).

Procesy membranowe są systematycznie wdrażane zarówno w układach oczyszczania wody, jak i ścieków. W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania niskociśnieniowymi technikami membranowymi, co oczywiście ma związek z oszczędnościami wynikającymi z mniejszego zapotrzebowania na energię. Proces ultrafiltracji (UF) może być wykorzystany do usuwania cząstek koloidalnych, wysokocząsteczkowych substancji rozpuszczonych oraz mikroorganizmów. Transport przez membranę polega głównie na mechanizmie sitowym przy ciśnieniu w zakresie $0,1\div 1,0 \text{ MPa}$. W ultrafiltracji stosuje się membrany asymetryczne, których opór hydrauliczny określony jest praktycznie przez grubość warstwy naskórkowej, wynoszącej zazwyczaj mniej niż $1 \mu\text{m}$ [11, 14]. W procesie tym separowane są cząsteczki o średnicy $1\div 20 \text{ nm}$ lub – alternatywnie – składniki o masie cząsteczkowej powyżej 500 Da [11, 14]. Istotnym parametrem charakteryzującym membrany jest ich graniczna rozdzielczość (cut-off). Parametr ten określa najmniejszy rozmiar cząsteczek (a dokładniej najmniejszą masę molową substancji) zatrzymywanych przez membranę przy określonym współczynniku retencji (zazwyczaj 90%) [11].

Poszukiwania niskociśnieniowego procesu membranowego umożliwiającego separację zarówno zanieczyszczeń organicznych o małej masie cząsteczkowej ($< 500 \text{ Da}$), jak i nieorganicznych składników jonowych doprowadziły do opracowania procesu ultrafiltracji micelarnej (MEUF – micellar enhanced ultrafiltration) [14, 15]. Jest to proces hybrydowy, łączący ultrafiltrację ze zdolnością środków powierzchniowo czynnych (surfaktantów) do tworzenia micel. W metodzie tej zanieczyszczenia mineralne i organiczne o małych rozmiarach są rozpuszczane (solubilizowane) w micelach, zaś zanieczyszczenia jonowe o ładunku elektrycznym przeciwnym do ładunku zastosowanego surfaktantu są wiązane na powierzchni micel [16, 17]. Powstające micelle mają zazwyczaj większy rozmiar od średnicy porów membran stosowanych w ultrafiltracji i zostają

zatrzymane przez membranę. Do permeatu mogą przedostawać się natomiast zanieczyszczenia niezwiązane w micelach oraz monomery zastosowanej substancji powierzchniowo czynnej [14, 15]. Zaletą procesu MEUF jest możliwość stosowania niskich ciśnień oraz duży strumień permeatu (jak w ultrafiltracji), a także bardzo dobra separacja (jak w przypadku odwróconej osmozy). Związki powierzchniowo czynne mają zdolność do agregacji i tworzenia micel. Micelizacja zachodzi wówczas, gdy stężenie surfaktantu przekracza krytyczne stężenie tworzenia micel (CMC – critical micellar concentration). Prawidłowy przebieg procesu MEUF zależy więc od odpowiedniego dobrania surfaktantu oraz jego stężenia [15].

Zastosowanie ultrafiltracji micelarnej do usuwania fosforanów nie jest tematem tak intensywnie badanym, jak wykorzystanie tego procesu do separacji substancji organicznych czy jonów metali. Jak dotąd ukazało się jedynie kilka publikacji o tej tematyce. W pracy [18] wykazano możliwość 95% usunięcia fosforanów ze ścieków modelowych przy wykorzystaniu CTAB (bromek cetylotrimetyloamoniowy). Początkowe stężenie fosforanów wynosiło $95 \text{ gPO}_4^{3-}/\text{m}^3$, zaś stężenie CTAB było znacznie poniżej CMC (0,1 CMC). Jednocześnie autorzy stwierdzili, że zastosowanie innych surfaktantów kationowych (CPC – chlorek cetylopirydynowy lub ODA – octan oktadecyloaminy) nie prowadziło do tak skutecznego usuwania fosforanów i dodatkowo konieczne były duże dawki tych surfaktantów ($>1 \text{ CMC}$). Potwierdzeniem tego ostatniego spostrzeżenia są wyniki badań [19], w których wykazano ponad 90% skuteczność usuwania fosforanów dopiero przy stężeniu CPC powyżej 5 CMC.

Stosowane do tej pory metody usuwania fosforanów mają pewne ograniczenia – przy zastosowaniu metod biologicznych jest to wrażliwość mikroorganizmów na temperaturę i skład roztworu, a przy użyciu metod fizycznych, takich jak wymiana jonowa i odwrócona osmoza – przede wszystkim wysoki koszt prowadzenia tych procesów. W związku z tym celowe są próby podjęcia badań nad usuwaniem związków fosforu w procesie ultrafiltracji micelarnej, jako alternatywy metod konwencjonalnych. Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu właściwości membran celulozowych oraz dwóch surfaktantów kationowych (bromek cetylotrimetyloamoniowy i chlorek cetylopirydynowy) na skuteczność usuwania fosforanów z roztworów modelowych.

Metody badawcze

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem komercyjnych celulozowych membran płaskich firmy Microdyn Nadir. Membrany charakteryzowały się następującymi wartościami granicznej rozdzielczości: 5 kDa, 10 kDa i 30 kDa. Badania wykonano w komorze filtracyjnej Amicon 8400 o całkowitej pojemności 350 cm^3 . Średnica membran była równa 76 mm. W czasie prowadzenia badań zapewniono ciągle mieszanie zawartości komory filtracyjnej. Proces przeprowadzono przy trzech wartościach ciśnienia transmbranowego równych 0,1 MPa, 0,15 MPa oraz 0,2 MPa.

Badania przeprowadzono z użyciem roztworu dwuwodorofosforanu potasu o stężeniu $68 \text{ gKH}_2\text{PO}_4/\text{m}^3$. Zawartość fosforanów w roztworze modelowym wynosiła $15 \text{ gPO}_4^{3-}/\text{m}^3$. Jako kationowe środki powierzchniowo czynne zastosowano bromek cetylotrimetyloamoniowy (CTAB) oraz chlorek cetylopirydynowy (CPC) o następującej charakterystyce [16]:

- CTAB: masa molowa $364,46 \text{ g/mol}$, $\text{CMC}=0,92 \text{ mM}$,
- CPC: masa molowa $358,01 \text{ g/mol}$, $\text{CMC}=0,90 \text{ mM}$.

Eksperymenty zostały przeprowadzone przy stężeniach CTAB i CPC odpowiadających podwójnej, potrójnej i sześciokrotnej wartości krytycznego stężenia tworzenia micel (CMC), czyli odpowiednio: CTAB – $670,6 \text{ g/m}^3$, $1005,9 \text{ g/m}^3$ i $2011,8 \text{ g/m}^3$; CPC – $644,4 \text{ g/m}^3$, $966,6 \text{ g/m}^3$ i $1933,3 \text{ g/m}^3$. Skuteczność badanego procesu oceniono wyznaczając współczynnik retencji jonów fosforanowych. Stężenia badanych substancji zmierzono w próbkach wody przed rozpoczęciem procesu oraz po procesie ultrafiltracji. Oznaczenia zawartości fosforanów (w postaci ortofosforanów) wykonano metodą spektrofotometryczną (wg PN-EN ISO 6878:2006) z wykorzystaniem spektrofotometru firmy WTW model MPM 3000. Do badanych próbek dodano po 1 cm^3 kwasu askorbinowego oraz po 2 cm^3 odczynnika mieszanego, a następnie zmierzono absorbancję przy długości fali 690 nm. Sprawdzone także podatność membran na blokowanie. W tym celu została wyznaczona wartość względnej przepuszczalności membrany J/J_0 (J – strumień objętości permeatu, J_0 – strumień objętości wody destylowanej w przypadku nowej membrany). Wartość strumienia J_0 , wyznaczona przy ciśnieniu transmbranowym równym 0,2 MPa, wynosiła $0,73 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$, $1,32 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ oraz $10,55 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$, odpowiednio przy granicznej rozdzielczości membrany równej 5 kDa, 10 kDa i 30 kDa.

Dyskusja wyników badań

Analizując przebieg usuwania fosforanów z użyciem CTAB stwierdzono, że wraz ze zwiększaniem stężenia surfaktantu wzrastała skuteczność oczyszczania roztworu. Wartości współczynnika retencji fosforanów mieściły się w zakresie $15\div 48\%$ oraz $29\div 53\%$ przy stężeniach surfaktantów równych odpowiednio 2 CMC i 3 CMC. Największe wartości współczynnika separacji fosforanów otrzymano przy dawce CTAB wynoszącej 6 CMC – w zakresie od 49% do 68%. Podwyższenie stężenia CTAB przyczyniło się do wzrostu skuteczności oczyszczania, co wynikało z samej natury procesu MEUF – zwiększenie ilości surfaktantu w oczyszczanym roztworze powodowało proporcjonalne zwiększenie dostępności ładunków dodatnich wiążących micelle z jonami fosforanowymi. Jony fosforanowe pełnią dodatkowo rolę mostków pomiędzy micelami CTAB, co powoduje zwiększenie rozmiarów micel [18]. Jednakże uzyskane wartości stopnia retencji fosforanów były poniżej 90%, co nie zapewnia zadowalającej skuteczności oczyszczania z zastosowaniem procesu MEUF.

Na podstawie otrzymanych wyników nie można stwierdzić jednoznacznej zależności wpływu ciśnienia transmbranowego na skuteczność separacji fosforanów. Podobne wyniki uzyskano w pracy [18] – współczynniki retencji jonów fosforanowych podczas procesu MEUF prowadzonego w zakresie ciśnień transmbranowych $0,1\div 0,4 \text{ MPa}$ (przy stałym stężeniu CTAB) różniły się między sobą o $10\div 20\%$, bez wyraźnej tendencji rosnącej lub malejącej. Można natomiast zaobserwować wyraźny wpływ granicznej rozdzielczości membran na skuteczność procesu MEUF, zwłaszcza przy mniejszych wartościach CMC. W przypadku membrany o największej wartości granicznej rozdzielczości (30 kDa) prowadzenie procesu przy stężeniach CTAB równych 2 CMC i 3 CMC dało najgorsze rezultaty, podczas gdy w przypadku membran o rozdzielczości granicznej 5 kDa i 10 kDa stopień usunięcia fosforanów przy tych stężeniach CTAB był zdecydowanie

wyższy. Prawdopodobnie wielkość porów membran o granicznej rozdzielczości 5 kDa i 10 kDa była na tyle mała, że monomery surfaktantu zostały zatrzymane w warstwie granicznej przy powierzchni membrany. Zwiększone stężenie CTAB sprzyjało powstawaniu micel i lepszej skuteczności procesu. W przypadku membrany o granicznej rozdzielczości 30 kDa rozmiary porów były na tyle duże, że dopiero przy stężeniu CTAB powyżej 3 CMC możliwy był wzrost stopnia agregacji micel, zwiększenie ich rozmiarów i polepszenie skuteczności separacji jonów fosforanowych.

Stosując drugi surfaktant – CPC – odnotowano podobny wzrost skuteczności oczyszczania roztworu wraz ze zwiększaniem stężenia surfaktantu, jak w przypadku CTAB. Uzyskane wartości współczynnika retencji fosforanów wynosiły 33÷59%, 41÷59% i 61÷74%, odpowiednio przy stężeniach CPC równych 2 CMC, 3 CMC i 6 CMC. Mimo wyższego stopnia usunięcia fosforanów (niż w przypadku CTAB), skuteczność procesu MEUF była w dalszym ciągu niezadowalająca, gdyż nie uzyskano wymaganej 90% separacji fosforanów. Charakter zależności otrzymanych w przypadku procesu MEUF z wykorzystaniem CPC był zbliżony do otrzymanych z zastosowaniem CTAB. Najwyższą wartość współczynnika retencji fosforanów (74%) uzyskano stosując membranę o granicznej rozdzielczości 10 kDa i stężeniu CPC równym 6 CMC. Jednak w przypadku membrany o granicznej rozdzielczości 5 kDa już przy stężeniu CPC wynoszącym 3 CMC otrzymano wartości współczynnika retencji powyżej 50%, bez względu na zastosowane ciśnienie transmembranowe.

Otrzymane wyniki, wskazujące na lepszą skuteczność surfaktantu CPC niż CTAB, różniły się od rezultatów badań opisanych w pracy [18], w której wykazano konieczność zastosowania zdecydowanie większych stężeń CPC niż CTAB w celu uzyskania takiej samej skuteczności usuwania jonów fosforanowych. Wydaje się, że takie rozbieżności są możliwe, gdyż mechanizm solubilizacji i separacji w procesie MEUF zależy od bardzo wielu parametrów (m.in. składu i pH separowanego roztworu, obecności innych przeciwjonów i ich stężenia, rodzaju i ładunku membrany). W pracy [18] zastosowano membrany ceramiczne, podczas gdy w prezentowanych testach wykorzystano membrany celulozowe. Oba rodzaje membran mogą charakteryzować się różnym elektrycznym ładunkiem powierzchniowym (dodatnim lub ujemnym) w zależności od pH i składu oczyszczanego roztworu, co w konsekwencji może wpływać na oddziaływania elektrostatyczne pomiędzy micelami surfaktantu, membraną i składnikami jonowymi obecnymi w roztworze.

O przydatności danego surfaktantu do usuwania zanieczyszczeń metodą MEUF decyduje nie tylko wartość współczynnika retencji, ale także wydajność membran UF i ich podatność na blokowanie. Z tego też względu podczas prowadzenia badań wyznaczano wartości względnej przepuszczalności membran (J/J_0), które zestawiono w tabeli 1.

Niestety, membrany celulozowe zastosowane w procesie MEUF okazały się podatne na blokowanie, przy czym zjawisko to występowało szczególnie intensywnie w przypadku membran o granicznej rozdzielczości 30 kDa – przy największym stężeniu surfaktantów przepuszczalność względna tych membran wynosiła zaledwie 0,3÷0,5. Z drugiej strony, właśnie przy stężeniu CTAB i CPC równym 6 CMC uzyskano najlepszą skuteczność usuwania jonów fosforanowych, co wskazuje na zjawisko sorpcji membranowej, czyli wnikanie micel surfaktantów z przyłączonymi jonami PO_4^{3-} w pory membran. Membrany o granicznej

rozdzielczości 5 kDa i 10 kDa okazały się mniej podatne na blokowanie, chociaż przy największym stężeniu surfaktantów i najniższym ciśnieniu strumień objętości permeatu stanowił tylko 40÷60% przepuszczalności wody przez nową membranę. Przy mniejszych dawkach surfaktantów w roztworach modelowych zmniejszenie przepuszczalności membran o granicznej rozdzielczości 5 kDa i 10 kDa nie było już tak duże, co wobec separacji fosforanów w zakresie 40÷50% wskazywało na przenikanie monomerów surfaktantów przez membrany, przy jednoczesnym zatrzymaniu makrocząsteczek micel w masie roztworu.

Badania wykazały, że najbardziej korzystne (ze względów ekonomicznych) do usuwania fosforanów w procesie MEUF jest stosowanie surfaktantu CPC (chlorek cetylopirydynowy) o stężeniu mniejszym niż 6 CMC i membran celulozowych o granicznej rozdzielczości 10 kDa. Jednakże takie parametry procesu MEUF nie prowadziły do uzyskania zadowalającej zawartości fosforanów w permeacie ($<1 \div 2 \text{ gPO}_4^{3-}/\text{m}^3$). Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do dalszych badań w celu zwiększenia skuteczności usuwania fosforanów z roztworów wodnych poprzez dobór kosurfaktantów kationowych i ograniczenie zjawiska blokowania membran.

Tabela 1. Względna przepuszczalność membran (J/J_0) podczas usuwania fosforanów w procesie MEUF
Table 1. Relative membrane permeability (J/J_0) versus membrane cut-off, transmembrane pressure as well as CTAB and CPC concentrations in MEUF process

Względna przepuszczalność membrany (J/J_0)			
ciśnienie MPa	stężenie CTAB		
	2 CMC	3 CMC	6 CMC
graniczna rozdzielczość membrany 5 kDa			
0,1	0,4	0,5	0,4
0,15	0,6	0,7	0,7
0,2	0,9	0,9	1,0
graniczna rozdzielczość membrany 10 kDa			
0,1	0,6	0,4	0,6
0,15	0,8	0,7	0,7
0,2	1,0	1,0	1,0
graniczna rozdzielczość membrany 30 kDa			
0,1	0,4	0,4	0,3
0,15	0,5	0,6	0,3
0,2	0,5	0,6	0,5
ciśnienie MPa	stężenie CPC		
	2 CMC	3 CMC	6 CMC
graniczna rozdzielczość membrany 5 kDa			
0,1	0,4	0,4	0,4
0,15	0,6	0,7	0,6
0,2	0,9	1,0	0,9
graniczna rozdzielczość membrany 10 kDa			
0,1	0,6	0,6	0,5
0,15	0,8	0,9	0,8
0,2	1,0	1,0	1,0
graniczna rozdzielczość membrany 30 kDa			
0,1	0,4	0,4	0,4
0,15	0,5	0,6	0,5
0,2	0,7	0,6	0,5

Wnioski

◆ Proces ultrafiltracji wspomaganey micelami (MEUF) może być wykorzystany do usuwania jonów fosforanowych z roztworów wodnych. Odpowiedni dobór rodzaju i stężenia surfaktantów kationowych, typu membrany i wielkości jej porów oraz ciśnienia transmembranowego decyduje o skuteczności i wydajności tego procesu.

◆ Skuteczność usuwania fosforanów z roztworów modelowych w procesie MEUF z wykorzystaniem membran celulozowych o granicznej rozdzielczości 10 kDa i chlorku cetylopirydynowego (CPC) lub bromku cetylotrimetyloamoniowego (CTAB) wynosiła odpowiednio 40÷75% lub 38÷68% (w zależności od stężenia surfaktantu). Największą skuteczność separacji uzyskano przy największym stężeniu CPC lub CTAB (6 CMC).

◆ Wartość współczynnika retencji fosforanów w procesie MEUF była tym większa, im większe było stężenie surfaktantów kationowych w oczyszczanym roztworze. Jednocześnie wzrost stężenia surfaktantów przyczynił się do intensyfikacji blokowania membran. Ekonomicznie uzasadnione jest stosowanie surfaktantu CPC (chlorek cetylopirydynowy) o stężeniu mniejszym niż 6 CMC i membran celulozowych o granicznej rozdzielczości 10 kDa.

Autorki dziękują firmie Schwander Polska za udostępnienie membran firmy Microdyn Nadir.

LITERATURA

1. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. Dz. U. nr 137, poz. 984.
2. A.L. KOWAL: Ochrona sieci wodociągowej przed korozją i zarastaniem. *Ochrona Środowiska* 1997, vol. 67, nr 4, ss. 3–6.
3. A. SZUSTER: Zastosowanie technologii SeaQuest jako metody ochrony sieci dystrybucji wody pitnej przed korozją i zarastaniem. *Inżynieria Ekologiczna* 2001, nr 4, ss. 83–87.
4. M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ, M. WOLSKA: Skuteczność koagulacji kontaktowej w usuwaniu substancji biogenych z wody. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 2, ss. 3–7.
5. B. KOLWZAN: Analiza zjawiska biofilmu – warunki jego powstawania i funkcjonowania. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 3–14.
6. S.M. RYBICKI: Wpływ obecności związków fosforu na jakość wody do spożycia. *Gaz, woda i technika sanitarna* 2007, nr 9, ss. 36–38.
7. A.L. KOWAL [red.]: *Odnowa wody. Podstawy teoretyczne procesów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
8. K. MIKSCH, J. SIKORA: *Biotechnologia ścieków*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
9. L. PRZYWARA: Warunki i możliwości usuwania fosforanów i fosforu ogólnego ze ścieków przemysłowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Kraków 2006.
10. M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ, M. WOLSKA: Efficiency of ozonation followed by filtration through a biologically active adsorption bed at removing biogenic organic substances from surface water. *Environment Protection Engineering* 2012, Vol. 38, No. 2, pp. 19–28.
11. M. BODZEK, J. BOHDZIEWICZ, K. KONIECZNY: Techniki membranowe w ochronie środowiska. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
12. J. ĆWIKŁA, K. KONIECZNY: Treatment of sludge water with reverse osmosis. *Environment Protection Engineering* 2011, Vol. 37, No. 4, pp. 21–34.
13. A.L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ: *Oczyszczanie wody. Podstawy teoretyczne i technologiczne, procesy i urządzenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
14. M. BODZEK, K. KONIECZNY: Usuwanie zanieczyszczeń nieorganicznych ze środowiska wodnego metodami membranowymi. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2011.
15. K. PROCHASKA, M. BIELSKA, K. DOPIERAŁA: Wybrane fizykochemiczne aspekty filtracji membranowej. *Membrany. Teoria i Praktyka* 2009, z. III, ss. 80–109.
16. C. DAS, M.K. PURKAIT: Micellar-enhanced ultrafiltration and its applications. In: K. MOHANTY, M.K. PURKAIT [Eds.]: *Membrane Technologies and Applications*. CRC Press, Boca Raton 2012.
17. J.F. SCAMEHORN, J.H. HARWELL: Surfactants in the environment. In: R.T. COFFEY [Ed.]: *New Horizons: An AOCS/CSMA Detergent Industry Conference*. AOCS Press, Champaign 1996.
18. R. CAMARILLO, I. ASENSIO, J. RINCON: Micellar enhanced ultrafiltration for phosphorus removal in domestic wastewater. *Desalination and Water Treatment* 2009, No. 6, pp. 211–216.
19. K. BAEK, B.-K. KIM, J.-W. YANG: Application of micellar enhanced ultrafiltration for nutrients removal. *Desalination* 2003, Vol. 156, pp. 137–144.

Majewska-Nowak, K., Górna, J. Usability of Cationic Surfactants for Inorganic Phosphorous Compound Removal from Water Solutions by Micellar Enhanced Ultrafiltration. *Ochrona Środowiska* 2013, Vol. 35, No. 2, pp. 47–50.

Abstract: This paper reports the results of phosphate removal by micellar enhanced ultrafiltration (MEUF) using cellulose membranes. Usability of cationic surfactants for removal of phosphates from aqueous solutions was assessed. Cellulose membranes (Microdyn Nadir) of various cut-off values (5, 10 and 30 kDa) and two cationic surfactants (hexadecyltrimethylammonium bromide, CTAB and hexadecyl-

pyridinium chloride, CPC) were used in the experiments. The surfactant concentration was 2, 3 and 6 CMC (critical micelle concentration). Cellulose membrane with a cut-off value of 10 kDa exhibited the best separation properties – phosphate removal efficacy varied from 40 to 75% and from 38 to 68% for solutions containing CPC and CTAB, respectively. It was observed that increase in surfactant concentration resulted in the improvement in phosphate removal efficacy and in the concurrent worsening of membrane permeability.

Keywords: Water treatment, cellulose membrane, phosphates, hexadecyltrimethylammonium bromide, hexadecylpyridinium chloride.