

Stanisław A. Rybicki

EFEKTYWNOŚĆ OCZYSZCZANIA WÓD O WYSOKIEJ MĘTNOŚCI W URZĄDZENIACH DO KOAGULACJI KONWENCJONALNEJ

Rzeka Rudawa od przeszło 700 lat jest wykorzystywana dla zaopatrzenia Krakowa, a to z uwagi na dobrą kiedyś jakość wody, wypływającą z jurajskich źródeł oraz niewielką odległość od centrum zabudowy. Powierzchnia dorzecza liczy zaledwie 328 km², charakteryzuje się urozmaiconą rzeźbą, połowa terenu ma nachylenie powyżej 5%. Występują tu typowe zjawiska krasowe, przy czym są one maskowane pokrywą lessową. Gleby tego typu dominują w całej zlewni, prócz tego występują rędziny (7%), bielice i szczyrki (15%). Lasy zajmują około 21% powierzchni, łąki 5%, na terenie uprawne przypada 65% [1].

Wykorzystanie gospodarcze tego obszaru to przede wszystkim uprawa i hodowla. W zlewni są położone 44 wsie, jedno miasto (Krzeszowice) i jedno osiedle typu miejsko-przemysłowego (Zabierzów), razem około 60 tys. mieszkańców. Istnieje tu kilka dużych ferm trzody chlewnej, duże gospodarstwo ogrodnicze (kilkanaście hektarów szklarni, ogrzewanych mazutem).

Przez obszar dorzecza biegnie bardzo uczęszczana droga klasy międzynarodowej (E-22), znajduje się tu lotnisko i kilkanaście stacji benzynowych. Znaczna część tych obiektów powstała po ustanowieniu strefy ochronnej ujęcia (co miało miejsce we wrześniu 1955 roku), która obejmuje całą zlewnię. W połowie lat siedemdziesiątych rozpoczęto duże roboty ziemne przy budowie autostrady ze Śląska do Krakowa. Spowodowało to zwiększenie częstotliwości występowania mętności w wodzie rzecznej oraz pojawienie się bardzo wysokich stężeń zawieszin. Szacunkowo oznaczoną maksymalną zawartość podaje się na 75 kg w 1 m³ wody, przy czym jest to wartość przybliżona. W trakcie nadejścia fali zmętnień, nie ma możliwości oznaczania zawiesziny w sposób precyzyjny, jest ona określana w sposób przybliżony. Woda o takiej mętności dopływa do obiektów zaprojektowanych wiele lat temu, dla znacznie niższych stężeń mętności i co równie ważne — dla stacji o niższej przepustowości.

W niniejszych rozważaniach przedstawiono efektywność działania (w warunkach eksploatacyjnych) urządzeń do usuwania mętności, mianowicie komór flokulacji i osadników pokoagulacyjnych. Podstawą oceny były wyniki badań prowadzonych w warunkach eksploatacyjnych.

Charakterystyka urządzeń do koagulacji

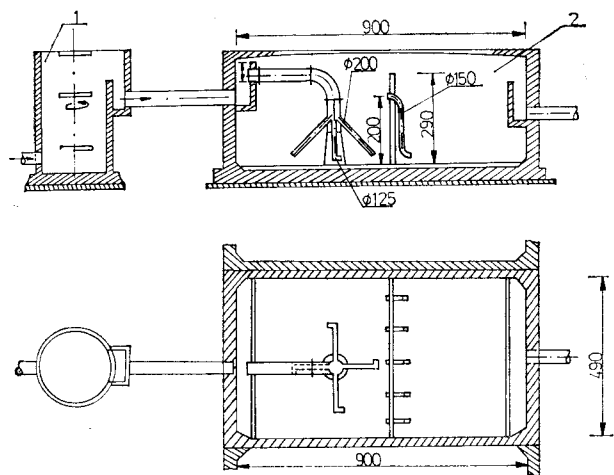
Stacja uzdatniania wody „Rudawa” została zaprojektowana na przełomie lat 1954/1955 i prawie równoległe zrealizowana, w terminie 17 miesięcy. Wydajność urządzeń dostosowana pierwotnie do wartości najniższego przepływu, wynosiła wtedy 55 tys. m³/d (0,34 m³/s). Następnie rozbudowano filtry pospieszne i pompownie do wydajności 78 tys. m³/d (tj. około 0,9 m³/s) mimo, że przepływ minimalny, który wystąpił w 1955 roku miał natężenie równe 0,75 m³/s. Przy sprzyjającej jakości wody (tj. wtedy, kiedy nie trzeba prowadzić koagulacji) stacja ta dostarcza nawet 100 tys. m³/d (1,13 m³/s). Wobec dość szczegółowego przedstawienia charakterystyki stacji „Rudawa” [2], w szeroko rozpowszechnionych materiałach Konferencji Poznańskiej, poniżej podano jedynie bardzo skrótowy jej opis.

Woda z ujęcia dopływa grawitacyjnie do granic stacji uzdatniania, tu jest pompowana do mieszaczy szybkich, skąd płynie do komór flokulacji, poziomych osadników pokoagulacyjnych i filtrów pospiesznych. Po dezynfekcji chlorem woda jest przetrzymywana w zbiorniku wody czystej, skąd jest czerpana przez pompy wody czystej i tłoczona bezpośrednio do sieci. Zakład umieszczony 30 lat temu w odległości 2 km od zabudowy miejskiej, w chwili obecnej jest w znacznej mierze przez nią otoczony.

Stacja uzdatniania, a przede wszystkim zespół urządzeń do koagulacji i sedymentacji, zostały zaprojektowane w zasadzie do usuwania jedynie podwyższonej mętności. Dla określenia parametrów do wymiarowania urządzeń przeprowadzono badania, według współczesnej metody, w skali laboratoryjnej. Ich rezultatem było oznaczenie ilości zawieszin, które pod wpływem określonej dawki koagulantu opadają po 6 i 36 minutach. Kolejnym krokiem było obliczenie prędkości opadania zawieszin, a następnie długości osadnika. Metody i przyjmowane parametry były zgodne z zaleceniami zawartymi w dostępnej, współczesnej literaturze specjalistycznej [3, 4]. W wyniku badań przyjęto maksymalną dawkę siarczanu glinu równą 80 g/m³, dostosowaną do stwierdzonego w trakcie badań wody największego stężenia mętności (około 2500 g/m³). Rzeczywistość przekroczyła jednak najśmielsze oczekiwania. Już w kilka lat po uruchomieniu wystąpiła mętność rzędu 20 tys. g w 1 m³. Przebudowano wtedy urządzenia dawkujące tak, że mogą one zapewnić dawkę

około 250 g/m³, przy czym stosuje się roztwór 5‰. Od lat mętność permanentnie przekracza kilkanaście tysięcy gramów w 1 m³, a zdarzają się też mętności rzędu kilkudziesięciu kilogramów w 1 m³. Są to wartości orientacyjne m. innymi wobec małej dokładności, jaka ma miejsce przy oznaczaniu mętności w stężeniach powyżej 1000 g/m³. Rozwiązania techniczne urządzeń są charakterystyczne dla okresu lat pięćdziesiątych. Siarczany glinu składowany jest na sucho, rozdrabniany przy pomocy kruszarki i następnie rozpuszczany w wodzie za pomocą wirujących bębnow drewnianych o perforowanych ścianach. Porcje koagulantu, wprowadzanego do bębna dobiera się tak, by zapewnił on 5‰ stężenie w zbiorniku roztworowym, którego pojemność wynosi 8 m³. Dawkowanie roztworu koagulantu następuje przez opróżnienie zbiornika w odpowiednim tempie, kontrolowanym przy pomocy łaty wodowskazowej, umieszczonej w zbiorniku i regulowanym zaworem na rurociągu odprowadzającym.

Mieszacze szybkie to 4 zbiorniki okrągłe każdy o pojemności 10 m³, o prawidłowych rozwiązaniach hydraulicznych (ruch wody po przekątnej). Silnik napędowy ma tylko 2,8 kW, co daje 0,28 kW/1 m³, a więc wartość daleko niższą jak w nowoczesnych urządzeniach [6]. Czas zatrzymania wynosi od 60 s (projektowany) do 43 s (faktycznie osiągany). Rurociąg z mieszaczy do komór flokulacji ma długość 10 m. Komory flokulacji, pierwotnie wybudowano z mieszadłami poziomymi mechanicznymi o napędzie łańcuchowym. Po kilku latach zamieniono te urządzenia (wniosek racjonalizatorski) — sposób rozwiązania przedstawiono szkicowo na rys. 1.



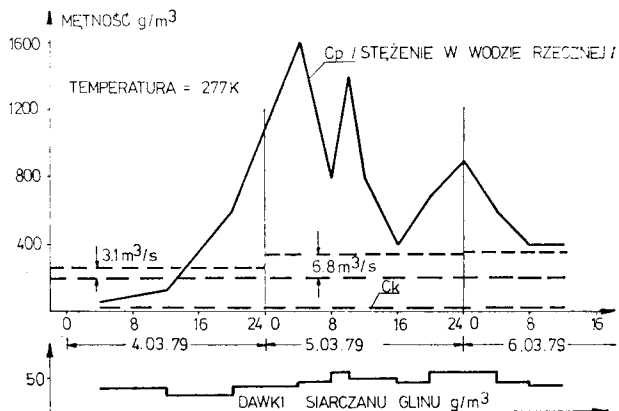
Rys. 1 Schemat mieszacza szybkiego i komory flokulacji

Są to urządzenia typu hydraulicznego. Komorę podzielono na 2 części. W pierwszej woda jest wprowadzana w ruch wirowy, przy czym prędkości wylotowe wynoszą od 1,5 m/s do 2,0 m/s, następnie płynie po przekątnej do odpływu, który umieszczono w ścianie przegrodowej. W drugiej części komory nie ma urządzeń do mieszania, jest tylko zapewniony przepływ podobny jak w pierwszej. Czas zatrzymania w obu częściach wynosi od 30 do 20 min. Rurociągi doprowadzają wodę z komór flokula-

cji do osadnika pokoagulacyjnego ma długość 30 m i średnicę 500 mm, prędkości w nim występujące wynoszą od 0,37 m/s do 0,53 m/s. Wartości te mieszczą się w strefie hydrotransportu i flokulacji [7] ale dalece odbiegają od aktualnych zaleceń podawanych przez przepisy innych krajów [8]. Osadnik pokoagulacyjny ma długość roboczą 81 m, szerokość komór w świetle 4,80 m, wysokość od 2,9 m do 3,2 m, spadek dna 0,005. Od ukończenia budowy w 1955 r. istnieje 9 komór osadnika, łączna pojemność wynosi 10 150 m³, a powierzchnia rzutu poziomego równa się 3500 m². Obciążenie jednostkowe wynosi od 0,67 m³/m²·h do 0,96 m³/m²·h. Wlot do osadnika wyposażono w ściankę perforowaną, odprowadzenie przewidziano przelewem.

Doświadczenia eksploatacyjne

W trakcie prawie trzydziestoletniej eksploatacji załoga wypracowała określony sposób postępowania przy pojawieniu się wody o wysokiej mętności. Oprócz zwiększania dawek siarczany glinu (jednak rzadko stosując wartość graniczną wynoszącą 250 g/m³, która wynika z możliwości technicznych urządzeń), zmniejsza się także natężenie przepływu w osadnikach. Jest to równoznaczne z obniżeniem wydajności zakładu uzdatniania, ale nie ma innych możliwości, gdyż pojemność zbiornika wody czystej jest tu niewielka. W praktyce, przy obniżeniu wydajności o około 30‰ i stosowaniu dawki koagulantu w granicach 150—200 g/m³, zupełnie dobre rezultaty osiąga się przy mętności w odpływie rzędu 10 000 g/m³. Obciążenie osadnika wynosi wtedy 0,7 m³/m²·h, a teoretyczny czas zatrzymania sięga 4,2 godziny (wg projektu miał być równy 4,5 godziny). Przy obniżeniu przepływu do połowy usuwa się, w zadowalającym stopniu mętność rzędu 20 kg/m³. Sposoby te okazały się niewystarczające przy najwyższych mętnościach wody rzecznej, tj. 75 kg/m³. Poziom mętności w odpływie sięgał wtedy 400—500 g/m³, przy obniżonej wydajności urządzeń do koagulacji, wynoszącej 0,5 m³/s. Charakterystyczny przebieg fali zmętnień wody rzecznej C_p o często spotykanym stężeniu przedstawiono na rys. 2, przy czym podano tam również stężenia mętności w odpływie C_k, natężenie przepływu w



Rys. 2 Przebieg zmian fali zmętnień i dawki siarczany glinu w badanym okresie

rzece (3,1—6,8 m³/s) i stosowane dawki siarczany glinu.

Mętność odpływu mieści się zwykle w przedziale 40—80 g/m³, a mętność wody przefiltrowanej w ostatnich 12 latach średnio wynosiła 0,45 g/m³ a maksymalnie 4,5 g/m³. Stopień usuwania mętności osiągany w praktyce można więc uznać za wysoki.

Ocena efektywności urządzeń do usuwania mętności

Ocena efektywności działania urządzeń wymaga ustalenia kryterium porównawczego. W niniejszych rozważaniach postanowiono przyjąć, jako kryterium efektywności wartość dawki siarczany glinu, zastosowanej dla obniżenia konkretnej wartości mętności do wymaganych granic (40—80 g/m³). W pierwszej kolejności porównano dawki zastosowane z obliczonymi wg wzoru $D_k = 3,5 \cdot M^{-0,5}$, gdzie D_k = dawka koagulanta, M — mętność w g/m³ [6]. Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 1, przy czym wyodrębniono dwie grupy wyników — dla niskiej temperatury (około 277 K) i temperatury średniej (287 K).

Tabela 1

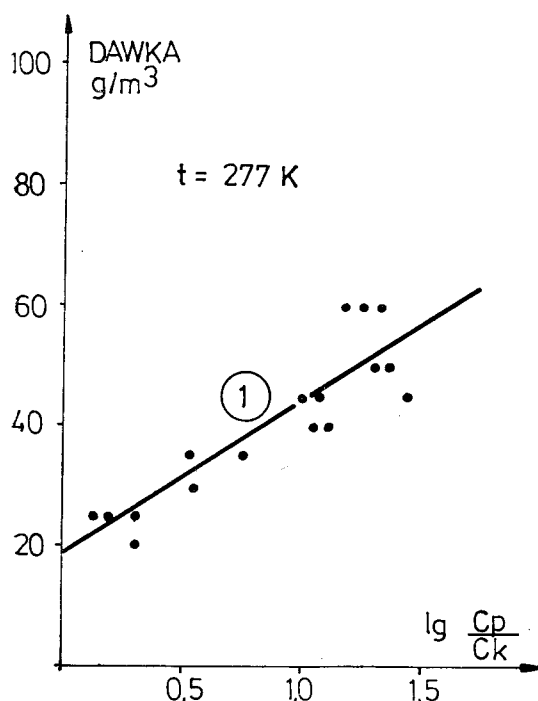
MĘTNOŚĆ WODY W DOPŁYWIE I ODPLYWIE Z OSADNIKA ORAZ WIELKOŚCI DAWKI RZECZYWISTEJ I OBLICZONEJ WG WZORU EMPIRYCZNEGO

Data	Godzina	Mętność g/m ³		Dawka	
		dopływ	odpływ	rzeczyw.	wg wzoru empirycznego
3.03.79	20	40	30	—	—
4.03.79	12	120	50	25	38
4.03.79	20	600	50	40	86
5.03.79	4	1600	45	45	140
5.03.79	8	800	35	60	99
5.03.79	10	1400	35	50	131
5.03.79	12	800	40	50	99
5.03.79	20	700	45	60	93
5.03.79	24	900	45	60	105
25.06.79	21.30	90	60	—	—
26.06.79	0.30	280	60	15	59
26.06.79	2.30	10000*	60	100	350*
26.06.79	4.30	9000*	60	200	330*
26.06.79	6.30	9000*	60	200	330*
26.06.79	8.30	16000*	80	150	443*
26.06.79	12.30	2000	80	100	156
26.06.79	14.30	2000	80	100	156
26.06.79	18.30	2000	80	100	156
26.06.79	22.30	2000	80	70	156
27.06.79	0.30	1000	60	70	111

* Wynik o niskim stopniu dokładności. W pierwszej serii badań temperatura wody wynosiła około 277 K, a w drugiej 290 K.

Z porównania kolumn 6 i 7 wynika, że dawki zastosowane w eksploatacji są wyraźnie niższe. Być może przyjęty wzór empiryczny ustalono dla innych warunków, których nie znamy. Na rys. 3 przedstawiono wykres uzależniający dawkę koagulanta od zlogarytmowanego ilorazu C_p i C_k , przy czym w dopływie występują wartości od 120—1600 g/m³, a w odpływie od 30 do 60 g/m³.

Obliczone równanie dla regresji liniowej wykazało dobrą korelację, poziom istotności dla współczynnika korelacji był niższy od 0,001. Gorszą korelację uzyskano dla wody o wyższej temperaturze, gdy rozważano oddzielnie podobne współzależności dla wysokich stężeń



Rys. 3 Zależności efektywności usuwania mętności i dawki koagulanta dla okresu o niskiej temperaturze wody

Tabela 2

DAWKI KOAGULANTA WG RÓWNAŃ REGRESYJNYCH

Zbiór danych	Dawka wg równań regresyjnych	Współcz. korelacji	Poziom istotn. współcz. korelacji
28/29.01 i 4/6.03.1979	$D = 13,4 + 25,4X_1$	0,886	0,001
26.05.1979 r.	$D = -22,7 + 63,1X_1$	0,811	0,05
26.05, 18.06 i 26.06.1979 r.	$D = 68,9 + 2,8X_1$	0,015	powyżej 0,1
26.06.1979 r.	$D = -26,7 + 70,8X_1$	0,755	0,001
Lp2+Lp3			
Cp: 1 tys. do 2 tys.	$D = -540 + 189 \cdot X_2$	0,798	0,15
Cp: 10 tys. do 20 tys.	$D = -352 + 131 \cdot X_2$	0,883	0,001
Cp: 10 tys. do 20 tys.	$D = -66 + 107 \cdot X_2$	0,880	0,001

D = dawka techniczna (14%) siarczany glinu, g/m³

$X_1 = \lg \frac{C_k}{C_p}$, $X_2 = \lg C_p$; C_p — mętność wody w dopływie do osadnika, g/m³

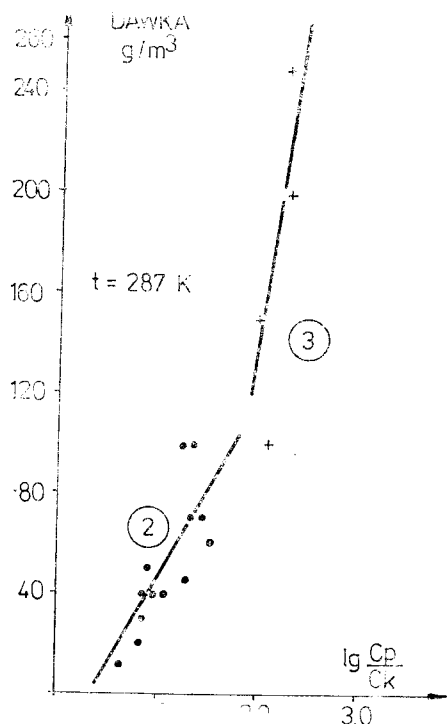
C_k — stężenie w odpływie, g/m³

Numeracja równań odpowiada numeracji prostych na rysunkach.

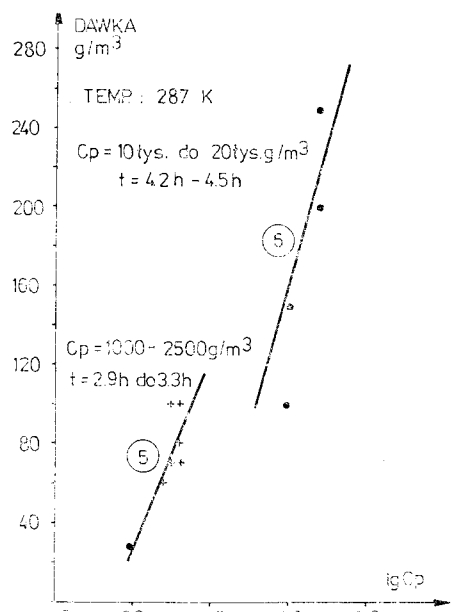
(tab. 2), natomiast dopasowanie dla całego zbioru było dobre. Porównując przebieg prostej na rys. 3 i 4 nie obserwujemy korzystnego wpływu wzrostu temperatury wody na przebieg sedymentacji.

Wynikać to może z odmienności przyczyn wywołujących mętność wody rzecznej w poszczególnych okresach. Zwraca się uwagę na inne parametry przepływu wody przy wysokich mętnościach (prosta 3 na rys. 4), w porównaniu ze stosowanymi przy mętnościach niższych. Na rys. 5 przedstawiono zależność zlogarytmowanej wartości mętności w dopływie i wielkości dawki (dla niższych stężeń prosta 5 i stężeń wyższych prosta 6).

Ten drugi zbiór wymaga względnie niższych dawek koagulantu. Dodać należy, że przy wysokich dawkach siarczanu glinu przebieg procesu



Rys. 4 Zależność efektywności usuwania mętności i dawki dla okresu o średniej temperaturze wody, przy stężeniach mętności rzędu 1 tys.—2 tys./m³, (prosta 2) oraz 10 tys. g/m³ do 20 tys. g/m³, (prosta 3)



Rys. 5 Zależność mętności wody dopływającej i dawki koagulantu dla okresów o średniej temperaturze, dla Cp od 1 tys. g/m³ do 2,5 tys. g/m³ (prosta 5) oraz dla Cp od 10 tys. g/m³ do 20 tys. g/m³ (prosta 6)

S. A. Rybicki On the efficiency of treating high-turbidity water in the system for conventional coagulation

The efficiency of clarifying highly turbid surface water is analyzed in this paper. The characterization of the treatment plant is given, and the possible treatment of water displaying various turbidity levels

koagulacji nie jest poprawny, pojawiają się bowiem w wodzie po filtrach znaczne stężenia wolnego CO₂ (około 10—15 g CO₂/m³). W wodzie rzecznej, która ma zasadowość około 4 mval/dm³ nie występuje CO₂.

Wnioski

1. Zaprojektowane i zrealizowane przed 30 laty konwencjonalne urządzenia do koagulacji wody są z powodzeniem wykorzystywane dla usuwania znacznie wyższych mętności niż przewidywano przy projektowaniu, mimo że pracują one z wydajnością wyższą od projektowanej, a przebieg procesu koagulacji nie zawsze jest prawidłowy.
2. Dawki koagulantu niezbędne dla usuwania wysokich mętności są niższe niż obliczone z wzoru empirycznego. Wynikać to może z innych warunków i odmiennego przebiegu procesu w stosunku do modeli teoretycznych.
3. Wydaje się, że istotną rolę w sprawniej sedymentacji odgrywa tu znaczna wysokość warstwy wody i dobra stabilność osadnika (L:H = 28, L:B = 17).
4. Prawidłowość dawkowania koagulantu, w trakcie eksploatacji wymaga nieprzerwanej pracy stacji pilotującej. Przebieg koagulacji i sedymentacji zależy od wielu czynników, trudnych do prognozowania i skorelowania.

LITERATURA

1. S. POLAK, S. KRZANOWSKI, J. MIGALA: Wpływ aktualnego zagospodarowania zlewni na stan czystości wód rzeki Rudawy. Materiały na konferencję naukowo-techniczną „Rolnicze zagospodarowanie zlewni rzeki Rudawy a jakość jej wód”, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Rolnictwa, Oddział w Krakowie i inni, Kraków 1979 r., ss 1—51.
2. S. RYBICKI: Stacja uzdatniania wody Rudawa dla wodociągu miasta Krakowa, Materiały IX Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej w Poznaniu, Wydawnictwo PZiTS Nr 441, Poznań 1984 r. t. I ss 1—22.
3. W. A. KLIACZKO, A. A. KASTALSKI: Oczyszczanie wody, Moskwa 1950 r.
4. W. F. KOZINOW: Oczyszczanie pitnej i technicznej wody, Moskwa 1952 r.
5. Die neue Kompaktflockunganlage der Landeswasserversorgung, Zweckverband Landeswasserversorgung, Prospekt.
6. E. M. GROCHULSKA-SEGAL, A. L. KOWAL, M. M. SOZANSKI: Modelowanie i optymalizacja wybranych procesów w systemach technologicznych uzdatniania wody. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, seria: Monografie — 20, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985 r.
7. SNiP II-31-74 Строительные нормы и правила. Част II. Нормы проектирования. Глава 31. Водоснабжение. Moskwa 1976.

is considered. The data obtained indicate that the coagulant doses required for the removal of high turbidity levels are lower than it might have been expected from some empirical formulae which are valid for lower concentrations. The coagulant doses required for an effective treatment were determined by making use of the regression equations derived from experimental data which had been obtained for an actual river water and for actual technological parameters.