

Dr inż. Jan Studziński, dr inż. Lucyna Bogdan, doc. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski
Instytut Badań Systemowych PAN Warszawa
Prof. dr hab. inż. Janusz Łomotowski
Akademia Rolnicza Wrocław
Prof. dr hab. inż. Ryszard Szetela
Politechnika Wrocławska

Komputerowe wspomaganie decyzji technologicznych w biologicznej oczyszczalni ścieków

Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki uzyskane podczas prac badawczych prowadzonych w oczyszczalni w Rzeszowie w ramach realizacji projektu celowego. Omówiono trzy zagadnienia: planowanie i wykonanie czynnego i biernego eksperymentu pomiarowego; wyznaczenie modeli dynamiki przepływu na podstawie wyników eksperymentu czynnego; opracowanie modeli procesów na podstawie wyników eksperymentu biernego i obliczonych parametrów w modelach dynamiki przepływu.

Computer aided technological decisions making in a biological wastewater treatment plant

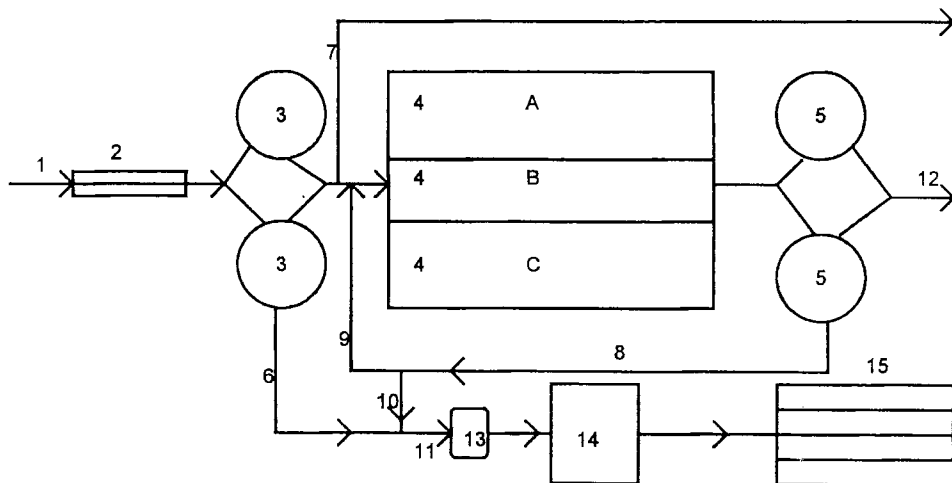
Abstract: In the paper some results of a research project realized in the wastewater treatment plant in Rzeszow are presented. Three problems which have been solved are described in more details: planning and execution of active and passive experiments, development of the flow dynamic models using the data from the active experiment, development of the technological process models of using the data from the passive experiment and the parameters of the flow dynamic models.

1. WPROWADZENIE

W pracy omówiono wybrane zagadnienia związane z opracowaniem systemu komputerowego wspomaganie decyzji technologicznych dla rzeczywistego obiektu - mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków w Rzeszowie. Zamierzone funkcje systemu są następujące: minimalizacja kosztów energii elektrycznej zużywanej w obiekcie, poprawa skuteczności redukcji zanieczyszczeń w oczyszczanych ściekach, usprawnienie i ułatwienie pracy technologów. Kolejne etapy budowy systemu to: opomiarowanie obiektu, zebranie danych pomiarowych charakteryzujących obiekt, wyznaczenie modeli objętości czynnych zbiorników oczyszczalni, opracowanie modeli procesu technologicznego oczyszczania ścieków i ich kalibracja oraz opracowanie komputerowego systemu wspomaganie decyzji technologicznych weryfikowanych na podstawie modeli procesu. Etap pierwszy ma charakter techniczny i nie będzie tu omawiany, natomiast badania związane z etapem ostatnim nie są jeszcze zakończone, dlatego w referacie ograniczono się do przedstawienia tylko trzech pozostałych etapów badań.

2. WYKONANIE EKSPERYMENTÓW POMIAROWYCH

W oczyszczalni przeprowadzono dwa eksperymenty: czynny i bierny. Z eksperymentu czynnego otrzymano pomiary umożliwiające opracowanie modeli dynamiki przepływu ścieków przez oczyszczalnię. Z eksperymentu biernego otrzymano pomiary umożliwiające opracowanie modelu procesu technologicznego. Do modelowania procesu są niezbędne również parametry modeli dynamiki przepływu. Zebranie pomiarów wymagało opracowania szczegółowych planów eksperymentów [3]. Schemat oczyszczalni jest pokazany na rys. 1.



Rys. 1. Schemat oczyszczalni ścieków w Rzeszowie; 1 - dopływ ścieków, 2 - piaskowniki, 3 - osadniki wstępne, 4 - komory napowietrzania, 5 - 2 osadniki wtórne, 6 - osad surowy, 7 - kanał awaryjny, 8 - osad zawracany, 9 - recykulacja zewnętrzna, 10 - osad nadmierny, 11 - osad zmieszany, 12 - odpływ ścieków, 13 - zagęszczacz grawitacyjny, 14 - WKF, 15 - poletka osadowe.

Ustalenia planu eksperymentu biernego były następujące:

- eksperyment trwa 14 dni;
- pomiary są zdejmowane w czterech punktach procesu: przed osadnikami wstępnymi (ścieki surowe), po osadnikach wstępnych (ścieki oczyszczone mechanicznie), po komorach napowietrzania, po osadnikach wtórnych (ścieki oczyszczone biologicznie);
- w każdym punkcie pomiarowym mierzy się stężenie dziewięciu parametrów: tlen rozpuszczony, BZT₅, ChZT, zawiesina ogólna, zawiesina mineralna, azot ogólny, azot amonowy, fosfor ogólny, fosfor ortofosforanowy;
- pomiary wymienionych parametrów w ściekach surowych są wykonywane co 2 godziny przez cały okres eksperymentu, natomiast pomiary tych parametrów w pozostałych punktach procesu są wykonywane raz na dobę dla prób zlewanych;
- w cyklu dwuminutowym są mierzone automatycznie następujące natężenia przepływów: dopływ ścieków surowych, odpływ ścieków oczyszczonych, osad surowy, osad zawracany, osad nadmierny, przepływ awaryjny.

Ustalania planu eksperymentu czynnego były następujące:

- jako znacznika używa się soli kuchennej;
- punktem wprowadzania znacznika jest przepompownia główna ścieków;
- stężenia chlorków w ściekach są mierzone w pięciu punktach procesu: przed osadnikami wstępnymi, po osadnikach wstępnych, po komorach napowietrzania, po osadnikach wtórnych, w zbiorniku z osadem recyrkulowanym;
- sygnał wymuszający ma kształt funkcji odcinkami stałej (co 60 min wsypuje się do ścieków 100 kg soli, przy czym czas wsypywania wynosi kilka minut);
- całkowity czas trwania wymuszenia wynosi 20 godz.;
- czas trwania eksperymentu wynosi 72 godz.;
- krok próbkowania pomiarów wynosi 1 godz.

W wyniku eksperymentów czynnego i biernego wykonano odpowiednio 360 i 1.890 analiz laboratoryjnych oraz zebrano 60.480 pomiarów natężenia przepływu.

2. MODELE MATEMATYCZNE DYNAMIKI PRZEPIYWU

Na podstawie pomiarów z eksperymentu czynnego oraz automatycznych pomiarów przepływów opracowano modele matematyczne dynamiki przepływu w następujących zbiornikach oczyszczalni: osadnikach wstępnych, komorach osadu czynnego i osadnikach wtórnych [1].

Do opisu zbiorników zastosowano równania różniczkowe zwyczajne o zmiennych współczynnikach, wyprowadzone na podstawie bilansów masy i opisujące proces idealnego mieszania. Są to równania pierwszego rzędu o zmiennych współczynnikach, w których zmienną niezależną jest czas, zmienną zależną jest stężenie chlorków w ściekach, natomiast zmiennymi parametrami są przepływ ścieków i objętość czynna zbiornika. Równania te przekształcono do postaci szczególnej, dostosowanej do modelowania zbiorników oczyszczalni. Po transformacji otrzymano równania różniczkowe o stałych współczynnikach, w których zmienną niezależną jest przepływ ścieków, zmienną zależną stężenie chlorków, natomiast stałym parametrem jest szukana objętość czynna zbiornika. Równanie początkowe opisujące model zbiornika jest następujące:

$$V(t) \frac{dc(t)}{dt} = q_{we}(t) \{-c(t) + r(t)\} \quad (1)$$

gdzie: $q_{we}(t)$ - natężenie dopływu, $r(t)$ - stężenie znacznika w dopływie, $c(t)$ - stężenie znacznika w odpływie, $V(t)$ - objętość zbiornika. Przyjmując założenie $V(t) = \text{const}$ oraz wprowadzając zmienną:

$$\xi(t) = \int_{t_0}^t q_{we}(\tau) d\tau \quad (2)$$

otrzymuje się z (1) nowe równanie:

$$V \frac{dc(\xi)}{d\xi} = r(\xi) - c(\xi) \quad (3)$$

którego rozwiązanie analityczne jest funkcją:

$$c(\xi) = Ce^{-\frac{\xi}{V}} + \frac{1}{V} \int_{\xi_0}^{\xi} e^{-\frac{\xi-\tau}{V}} r(\tau) d\tau \quad (4)$$

Dla odcinkami stałego sygnału wejściowego można funkcję (4) przedstawić w postaci dyskretnej:

$$c(\xi_n) = e^{-\frac{\Delta}{V}} c(\xi_{n-1}) + (1 - e^{-\frac{\Delta}{V}}) r(\xi_n) \quad (5)$$

gdzie $\xi_n - \xi_{n-1} = \Delta$. Stosując podstawienia: $c_n = c(\xi_n)$, $c_{n-1} = c(\xi_{n-1})$, $r_n = r(\xi_n)$, $a = e^{-\frac{\Delta}{V}}$, $b = 1 - e^{-\frac{\Delta}{V}}$, oraz przyjmując, że stężenia w odpływie ze zbiornika są obciążone błędem, tzn. $y_n = c_n + \varepsilon_n$, otrzymuje się z (5) równanie różnicowe z dwoma parametrami:

$$y_n = ay_{n-1} + br_n + \varepsilon_n - a\varepsilon_{n-1} \quad (5)$$

Wykorzystując liniową zależność między a i b można przekształcić równanie (5) do postaci z jednym parametrem:

$$z_n = au_n + v_n \quad (6)$$

gdzie: $v_n = \varepsilon_n - a\varepsilon_{n-1}$, $y_n - r_n = z_n$ oraz $y_{n-1} - r_{n-1} = u_n$.

Tablica 1. Obliczone objętości czynne zbiorników oczyszczalni; a - parametr w równaniu modelu, σ_a - błąd estymacji, V - objętość czynna obliczona na podstawie a , V_g - objętość geometryczna zbiornika, % - objętość czynna jako procent objętości geometrycznej.

Rodzaj zbiornika	a	σ_a	$V [m^3]$	$V_g [m^3]$	%
Osadniki wstępne	0,77	$\pm 0,03$	5.676	7.820	73
Komory napowietrzania	0,72	$\pm 0,04$	11.246	13.500	83
Osadniki wtórne (klarowanie)	0,61	$\pm 0,05$	4.723	-	42,8
Osadniki wtórne (sedymentacja)	0,80	$\pm 0,03$	6.303	-	57,2
Osadniki wtórne (łącznie)	-	-	11.026	11.060	100

Celem modelowania jest obliczenie objętości czynnej każdego zbiornika oczyszczalni. Wykonano obliczenia stosując kilka metod identyfikacji i przeprowadzając analizę porównawczą wyników. W obliczeniach użyto następujących metod: najmniejszych kwadratów, uogólnionej sumy kwadratów (Clarke'a), największej wiarygodności (do estymacji parametrów w równaniu (5)) oraz regresji liniowej (do estymacji parametru w

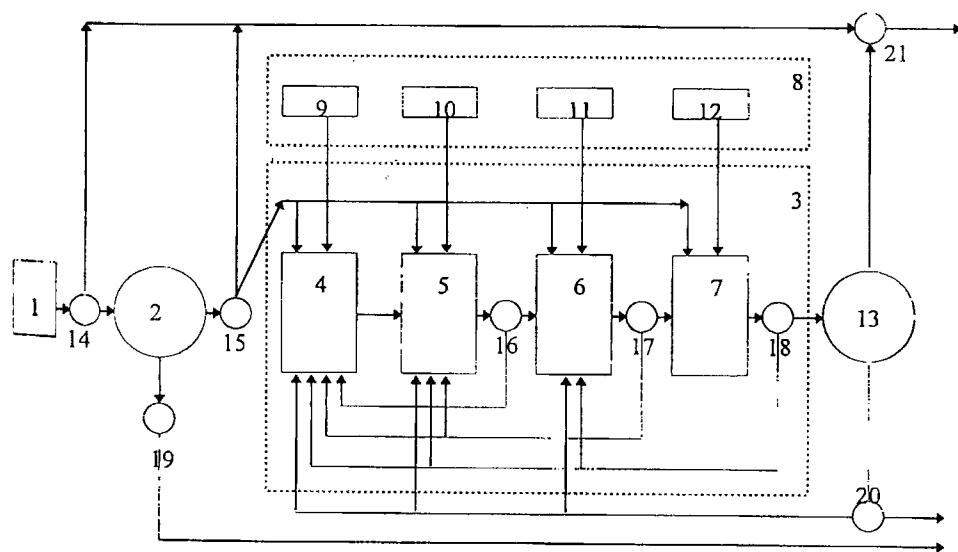
równaniu (6)). Przy modelowaniu osadników wtórnych rozdzielono zbiornik osadnika na dwie części: część osadową (zagęszczania i sedimentacji osadu) i część ściekową (klarowania ścieków). W części osadowej wyjściem z obiektu jest strumień osadu zawracanego, natomiast w części ściekowej wyjściem z obiektu jest strumień ścieków oczyszczonych biologicznie. Najlepsze wyniki obliczeń osiągnięto za pomocą metody regresji liniowej, która okazała się najmniej podatna na zakłócenia pomiarowe (tabl. 1).

3. MODELE MATEMATYCZNE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH

Model oczyszczalni jest przeznaczony dla celów symulacji, optymalizacji i sterowania. Ma on budowę modułową, tzn. poszczególne moduły modelu są samodzielnymi modelami poszczególnych obiektów lub układów funkcjonalnych oczyszczalni. W modelu oczyszczalni uwzględniono jedynie procesy redukcji związków organicznych i azotowych zachodzące w ściekach, bez redukcji związków fosforowych.

Opracowano następujące moduły obiektów względnie układów oczyszczalni [4] (rys. 2):

- moduł dopływu ścieków surowych do oczyszczalni
- moduł osadnika wstępnego
- moduł komory napowietrzania (z osadem czynnym)
- moduł osadnika wtórnego
- moduł układu napowietrzania
- moduł układu recyrkulacji osadu czynnego.



Rys. 2. Schemat modelu procesu technologicznego; 1 - dopływ ścieków, 2 - osadnik wstępny, 3 - komora napowietrzania (moduły 4, 5, 6 i 7), 8 - układ napowietrzania, 9, 10, 11, 12 - regulatory w układzie napowietrzania, 13 - osadnik wtórny, 14, 15 - węzły ścieków surowych i oczyszczonych mechanicznie, 16, 17, 18 - węzły ścieków zawracanych z modułów 5, 6 i 7, 19, 20 - węzły osadu surowego i recyrkulowanego, 21 - węzeł odpływu ścieków.

Własności poszczególnych modułów są następujące:

W module dopływu ścieków wejściami są natężenie dopływu oraz stężenia zanieczyszczeń. Zadaniem modułu jest modelowanie ilości i stanu ścieków dopływających do osadnika wstępnego. W module dopływu uwzględnia się łącznie 13 składników zanieczyszczeń:

- ChZT ogólne
- ChZT związków rozpuszczonych wolnorozkładalnych biologicznie
- ChZT związków rozpuszczonych łatworozkładalnych biologicznie
- ChZT związków rozpuszczonych nierozkładalnych biologicznie
- ChZT związków w zawiesinie nierozkładalnych biologicznie
- azot azotanowy
- azot ogólny
- azot amonowy
- azot organiczny rozpuszczony rozkładalny biologicznie
- azot organiczny w zawiesinie rozkładalny biologicznie
- zawiesina ogólna
- zawiesina mineralna
- zasadowość.

W module osadnika wstępnego przyjęto model komorowy zbiornika złożony z czterech komór połączonych ze sobą szeregowo. Parametrami modelu są objętość czynna zbiornika i stężenia zanieczyszczeń w ściekach te same, co w module dopływu. Zadaniem modułu jest modelowanie zmienności stężeń zanieczyszczeń w ściekach dopływających do komory z osadem czynnym. Stężenia zanieczyszczeń w osadniku wstępnym zmniejszają się wskutek sedymentacji zawiesin tworzących osad surowy na dnie osadnika (oczyszczanie mechaniczne). Zmiana stężeń następuje także w wyniku procesu mieszania ścieków i dyspersji wzdłużnej (model komorowy umożliwia modelowanie zjawiska dyspersji wzdłużnej). Dla każdej frakcji zanieczyszczeń i każdej komory osadnika formułuje się równania zmiany stężeń, przy czym są to równania różniczkowe zwyczajne pierwszego rzędu, wyprowadzone na podstawie bilansów masy. Równania są dwóch rodzajów: dla zanieczyszczeń zawartych w zawieszinie:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{n}{V} \cdot \left[Q_{i-1} \cdot (x_{i-1} - x_i) - \frac{k_{s,i} \cdot x_i}{\bar{x}_i} \right] \quad (7)$$

oraz dla zanieczyszczeń rozpuszczonych w ściekach:

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{n}{V} \cdot [Q_{i-1} \cdot (s_{i-1} - s_i)] \quad (8)$$

gdzie: n - liczba komór w modelu, i - numer komory, Q_{i-1} - natężenie ścieków dopływających do i -tej komory, V - objętość czynna osadnika, x_{i-1}, x_i - stężenie wybranej frakcji zanieczyszczenia w zawieszinie, \bar{x} - sumaryczne stężenie zawiesin, $k_{s,i}$ - szybkość usuwania zawiesin w i -tej komorze, s_{i-1}, s_i - stężenie wybranej frakcji zanieczyszczenia rozpuszczonego.

W module komory z osadem czynnym (napowietrzania) przyjęto model złożony z czterech zbiorników połączonych ze sobą szeregowo (co ponownie pozwala modelować zjawisko dyspersji wzdłużnej). Model opisuje przemiany związków organicznych i azotowych

zachodzące w kolejnych zbiornikach pod wpływem osadu czynnego i napowietrzania (oczyszczanie biologiczne). Czynnikiem decydującymi o przemianach są tlen i bakterie (biomasa), więc również te czynniki (tlen rozpuszczony, biomasa heterotroficzna, biomasa autotroficzna) uwzględniono dodatkowo w module komory jako parametry, oprócz parametrów już występujących w modułach dopływu i osadnika wstępnego. Opis matematyczny modelu komory jest w postaci równań różniczkowych zwyczajnych, przedstawiających zmiany stężenia poszczególnych frakcji zanieczyszczeń zachodzące w czterech zbiornikach komory. W równaniach uwzględnia się następujące procesy biochemiczne zachodzące w komorze:

- tlenowy przyrost bakterii heterotroficznych z asymilacją amoniaku,
- tlenowy przyrost bakterii heterotroficznych z asymilacją azotanów,
- anoksydacyjny przyrost bakterii heterotroficznych z asymilacją amoniaku,
- anoksydacyjny przyrost bakterii heterotroficznych z asymilacją azotanów,
- tlenowy przyrost autotrofów,
- obumieranie heterotrofów,
- obumieranie autotrofów,
- amonifikacja związków organicznych rozpuszczonych zawierających azot,
- hydroliza związków organicznych trudno rozkładalnych,
- hydroliza związków organicznych trudno rozkładalnych zawierających azot.

W module osadnika wtórnego przyjęto model warstwowy zbiornika złożony z 12 warstw. Osadnik wtórny odgrywa główną rolę w procesie oczyszczania biologicznego, realizując dwa zadania: zagęszczania osadu i klarowania ścieków (oczyszczanie mechaniczne). Zadania te decydują o stężeniu osadu w komorze napowietrzania oraz o ilości zawieszin wynoszonych ze ściekami z oczyszczalni. Model osadnika jest podzielony na dwie strefy: klarowania i zagęszczania (sedymentacji), przy czym strefa klarowania składa się z 4 warstw a strefa zagęszczania z 8 warstw. W module osadnika wtórnego występują takie same parametry, jak w module komory z osadem czynnym (z wyjątkiem tlenu rozpuszczonego, który nie jest uwzględniany). Zmienność w czasie każdego parametru w każdej z 12 warstw osadnika jest opisana równaniem różniczkowym zwyczajnym.

Moduł układu napowietrzania uwzględnia możliwość doprowadzania powietrza do każdego z 4 zbiorników komory z osadem czynnym. Każdy zbiornik posiada autonomiczny układ sterowania napowietrzaniem i ścieki w każdym zbiorniku mogą być natleniane niezależnie i na dowolnym poziomie stężenia tlenu.

Moduł układu recyrkulacji osadu czynnego uwzględnia możliwość zawracania osadu z osadnika wtórnego i wprowadzania go w zadanych proporcjach do każdego z 4 zbiorników komory napowietrzania (recyrkulacja zewnętrzna). Dodatkowo moduł ten umożliwiał zawracanie części ścieków z poszczególnych zbiorników komory napowietrzania i wprowadzania ich do zbiorników, umieszczonych wcześniej w ciągu technologicznym procesu (recyrkulacja wewnętrzna).

Na podstawie pomiarów z eksperymentów czynnego i biernego przeprowadzono dopasowanie modelu procesu technologicznego do obiektu (kalibracja modelu) [5]. Polegało ono na takiej zmianie wartości wybranych współczynników w równaniach modelu, aby na wyjściu modelu uzyskać parametry ścieków zgodne z wartościami zmierzonymi w oczyszczalni. Ze względu na

dużą złożoność modelu i dużą liczbę zmienianych współczynników nie stosowano żadnych formalnych metod identyfikacji. Częściowe wyniki kalibracji przedstawiono w tabl. 2.

Tablica 2. Wyniki kalibracji modeli dla obiektów oczyszczalni w Rzeszowie.

Parametr	Jednostka	Pomiar	Wynik kalibracji	Błąd w %
Osadniki wstępne				
Zawiesina ogólna	g s.m./m ³	163	162	0,6
BZT ₅	g O ₂ /m ³	186	188	1
Azot amonowy	g N/m ³	29,3	26,3	10
Azot ogólny	g N/m ³	39,3	32,0	19
Zasadowość	val/m ³	8,3	7,9	5
Komory napowietrzania				
Biomasa	g s.m./m ³	3815	3890	2
Wiek osadu	doba	10,2	10,0	2
BZT ₅	g O ₂ /m ³	18	18,3	2
Azot amonowy	g N/m ³	26,3	24,2	8
Azot ogólny	g N/m ³	32,1	26,1	12
Zasadowość	val/m ³	7,9	7,7	3
Osadniki wtórne				
Zawiesina ogólna	g s.m./m ³	19	19	0
BZT ₅	g O ₂ /m ³	19	23	21
Azot amonowy	g N/m ³	24,9	24,2	3
Azot ogólny	g N/m ³	28,1	26,9	4
Zasadowość	val/m ³	8,1	7,7	5
Osad recyркуlowany	g s.m./m ³	5719	6090	6

W wyniku obliczeń otrzymano model dobrze odzwierciedlający proces technologiczny realizowany w oczyszczalni w Rzeszowie. Szczególnie dobre dopasowanie do obiektu uzyskano w przypadku komór napowietrzania i osadników wtórnych, gdzie błędy dopasowania dotyczące większości badanych parametrów nie przekraczały kilku procent. Nieco gorsze wyniki dopasowania w przypadku modelu osadnika wstępnego są spowodowane nieprawidłową pracą tych urządzeń w czasie wykonywania pomiarów.

LITERATURA

1. Bogdan L., Nahorski Z.: Estymacja objętości czynnych zbiorników w oczyszczalni ścieków w Rzeszowie. Raport 17/7/96, IBS PAN, Warszawa 1996.
2. Łomotowski J.: Wstępne opracowanie wyników badań szarzy pomiarowej wykonanej w oczyszczalni ścieków w Rzeszowie dla potrzeb symulacji komputerowej pracy osadu czynnego. Raport 20/10/96, IBS PAN, Warszawa 1996.
3. Studziński J., Skaskiewicz A.: Opis systemu wizualizacji pomiarów i szarzy pomiarowej w oczyszczalni Rzeszów. Raport 15/5/96, IBS PAN, Warszawa 1996.
4. Szetela R.: Modelowanie matematyczne oczyszczalni ścieków. Raport 8/5/95, IBS PAN, Warszawa 1995.
5. Szetela R.: Kalibracja modelu symulacyjnego dla oczyszczalni ścieków w Rzeszowie. Raport 22/2/97, IBS PAN, Warszawa 1997.