

137/2007

Raport Badawczy
Research Report

RB/48/2007

**Modelowanie
mechaniczno – biologicznej
oczyszczalni ścieków**

J. Studziński

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk

Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 3810100

fax: (+48) (22) 3810105

Kierownik Pracowni zgłaszający pracę:
doc. dr hab. inż. Jan Studziński

Warszawa 2007

**Modelowanie mechaniczno-biologicznej oczyszczalni
ścieków**

Jan Studziński

1. Wstęp

Prace dotyczące modelowania miejskich oczyszczalni ścieków są prowadzone w Instytucie Badań Systemowych od 1993 r. Ich dotychczasowym wynikiem było m.in. wykonanie modelu fizykalnego dla oczyszczalni ścieków w Rzeszowie i jego kalibracja na podstawie rzeczywistych pomiarów otrzymanych z obiektu w rezultacie przeprowadzonych na nim szarż pomiarowych.

Obecnym celem badań jest opracowanie algorytmów sterowania oczyszczalnią na podstawie jej modelu fizykalnego. W dalszym ciągu obiektem badawczym jest oczyszczalnia w Rzeszowie, która jednak w międzyczasie rozbudowała się o dodatkowe elementy procesu technologicznego, nieobecne tam wcześniej, takie jak komory denitryfikacji i defosfatacji. Jednak, biorąc pod uwagę wcześniejsze doświadczenia, uważa się, że rozbudowany model będzie na tyle skomplikowany, że wykonanie na nim obliczeń kalibracyjnych może być bardzo uciążliwe.

Dlatego przed przystąpieniem do opracowywania algorytmów sterowania dla rozbudowanego obiektu postanowiono opracować wcześniej algorytmy automatycznej identyfikacji modelu na podstawie jego wersji uproszczonej, a więc nie uwzględniającej nowych elementów procesu. Dopiero w dalszej kolejności nastąpi rozbudowa modelu o dodatkowe komory, jego identyfikacja z wykorzystaniem opracowanych algorytmów i docelowe opracowanie algorytmów sterowania.

W przypadku sterowania będzie badana koncepcja dwupoziomowego sterowania predykcyjnego, uwzględniającego zmianę nastaw regulatorów sterujących napowietrzaniem komór z osadem czynnym i stopniami recyrkulacji osadu czynnego i ścieków na górnym poziomie sterowania na podstawie predykcji dopływu ścieków surowych do oczyszczalni oraz uwzględniającego stabilizację procesu przy zadanych nastawach regulatorów na dolnym poziomie sterowania.

W obecnej pracy przedstawia się opis nowego procesu oczyszczania w oczyszczalni w Rzeszowie oraz tworzenie i klasyczna kalibrację modelu uproszczonego oczyszczalni. W dalszym ciągu planuje się powstanie raportów z przedstawieniem algorytmów identyfikacji modelu oczyszczalni, z przedstawieniem rozbudowanego modelu fizykalnego oraz z prezentacją algorytmów sterowania złożonym procesem oczyszczania ścieków miejskich.

2. Opis oczyszczalni w Rzeszowie

Oczyszczalnia ścieków oparta na metodzie osadu czynnego z usuwaniem związków azotu i fosforu została zaprojektowana na przepustowość [1]:

$$Q_{\text{śrd}} = 62500 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{maxd}} = 75000 \text{ m}^3/\text{d}/\text{deszcz}/$$

$$Q_{\text{maxh}} = 3180 \text{ dm}^3/\text{s}$$

W ilości tej ujęto następujące dopływy:

$$Q_{\text{śrd}} = 38\,000 \text{ m}^3/\text{d} \text{ z lewobrzeżnej części miasta}$$

$$Q_{\text{śrd}} = 15\,170 \text{ m}^3/\text{d} \text{ z prawobrzeżnej części miasta}$$

$$Q_{\text{śrd}} = 3680 \text{ m}^3/\text{d} \text{ z osiedla „Staromieście”}$$

Razem $Q_{\text{śrd}} = 56\,850\text{ m}^3/\text{d}$

$Q_{\text{śrd}} = \text{ca } 80\text{ m}^3/\text{d}$ ścieki dowożone

oraz około 10% rezerwy na przyjęcie ścieków z gmin Boguchwała, Raclawówka, Niechorz i Wola Zgłobieńska.

Oczyszczalnia redukuje:

- 96% ładunku zanieczyszczeń wyrażonych poprzez BZT₅, to jest ca. 23 400 kg/d
- 94% ładunku zawiesiny ogólnej to jest ca. 18 800 kg/d.

Ścieki doprowadzone na teren oczyszczalni z pompowni dla prawobrzeżnej i lewobrzeżnej zlewni Rzeszowa, wraz ze ściekami dowożonymi do punktu zlewnego, zostają doprowadzone grawitacyjnie dwoma kanałami do komory wlotowej przed budynkiem krat, do której wprowadzone są również dwa przewody z pompowni „Staromieście”.

Ścieki dowożone taborem asenizacyjnym do punktu zlewnego poprzez stację pomiarową doprowadzane są do kanału ścieków surowych.

Z komory ścieki dopływają do budynku krat trzema kanałami.

Odwodnione na prasce skratki są usuwane do kontenera na zewnątrz budynku przy pomocy dwóch przenośników, przesypywane wapnem chlorowanym i wywożone na składowisko odpadów komunalnych.

Dalej ścieki są oczyszczane na dwóch napowietrzanych piaskownikach. Piasek jest usuwany do klasyfikatora piasku, odwodniony kierowany jest do kontenera lub na lagunę piasku skąd wywożony jest na składowisko odpadów komunalnych.

Po piaskownikach ścieki są doprowadzone do komory przelewowej i do komory rozdziału na osadniki wstępne i dalej do osadników wstępnych.

W komorze przelewowej w okresie deszczowym ścieki są doprowadzone do zbiornika wyrównawczego wód deszczowych.

Zbiornik retencyjny wyposażony jest w 3 mieszadła zatapialne w celu uniemożliwienia sedimentacji i zagniwania ścieków oraz 2 pompy zatapialne o wydajności $Q = 80\text{--}440\text{ l/s}$ do opróżniania zbiornika retencyjnego w ciągu około 4 godzin.

Sedymetacja wstępna następuje w dwóch osadnikach wstępnych o $D = 40\text{ m}$ i $V_{\text{cz}} = 3900\text{ m}^3$ każdy. Osad wstępny jest usuwany do pompowni ślimakowej osadu.

Następnie ścieki spływają do komory defosfatacji o pojemności $V = 2755\text{ m}^3$.

Odływ ścieków z komory defosfatacji wpływa do komór denitryfikacji i nityfikacji. Komory o $V = 5680\text{ m}^3$ każda, wyposażone są w ruszt napowietrzający oraz dwa mieszadła zatapialne. Przegrody dzielą te komory na strefy denitryfikacji i nityfikacji.

Wykonano podział kanału odpływowego w celu recyrkulacji ścieków i doprowadzenia ścieków do komór denitryfikacji o średnicy $D = 40,0\text{ m}$ i $V = 5900\text{ m}^3$ każda, wyposażonych w ruszt napowietrzający.

W komorach tych następuje dalsza pełna nityfikacja ścieków, po czym część ścieków jest recykulowana do komór defosfatacji (stopień recykulacji 90-170%), a część odpływa do komory rozdzielczej ścieków i osadu i dalej na 4 osadniki wtórne.

Do kanału doprowadzającego do komory rozdzielczej jest dozowany koagulant PIX lub siarczan glinu w celu wytrącenia fosforu.

Osadniki wtórne radialne o średnicy $D=42$ m i $V=4600$ m³ każdy są wyposażone w zgarniacze ssawkowo-lewarowe osadu, koryta przelewowe i zbiorcze oraz fartuch ochronny i koryto zbiorcze części pływających

Oczyszczone ścieki z osadników poprzez urządzenie pomiarowe są odprowadzane kanałem do rzeki Wisłok.

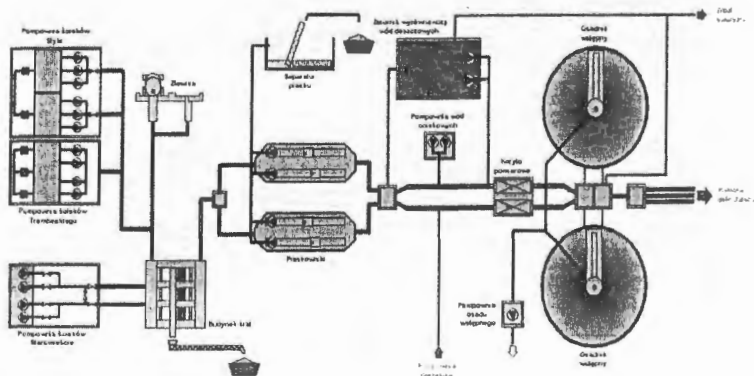
Technologia przeróbki osadów ściekowych zakłada wstępne odwodnienie i zagęszczanie osadu wstępnego na zagęszczaczu i osadu nadmiernego na stacji zagęszczania osadu, jednostopniową mezofilną fermentację osadów w zamkniętych, ogrzewanych komorach fermentacyjnych z instalacją gazową współpracującą ze zbiornikiem gazu i kotłownią.

Osad wstępny z osadników wstępnych jest odprowadzany grawitacyjnie do pompowni ślimakowej, skąd pompowany jest do zagęszczacza grawitacyjnego a następnie pompownią osadu zagęszczonego do WKF.

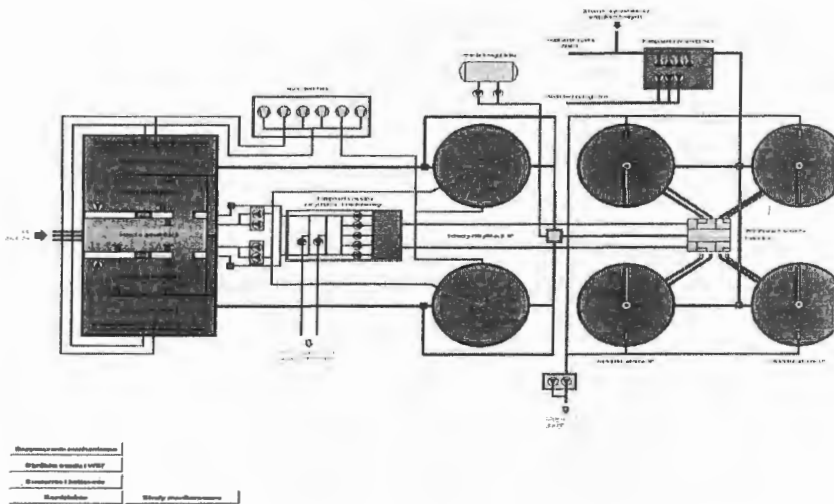
Osad nadmierny jest podawany z pompowni osadu nadmiernego i recykulowanego do stacji mechanicznego zagęszczania osadu i po zagęszczeniu do WKF.

Osad przefermentowany przetłaczany jest na stację odwadniania osadu, gdzie jest odwadniany mechanicznie i higienizowany wapnem.

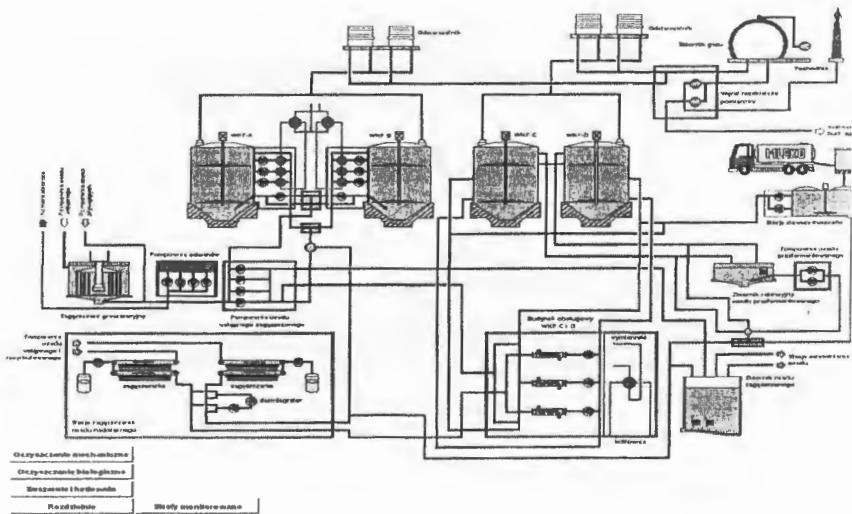
Poletka osadowe stanowią układ rezerwy. Woda nadosadowa i ociekowa zawracana jest przed układ oczyszczania.



Rys. 1. Ciąg oczyszczania mechanicznego w oczyszczalni w Rzeszowie.



Rys. 2. Ciąg oczyszczania biologicznego w oczyszczalni w Rzeszowie.



Rys. 3. Ciąg przeróbki osadu w oczyszczalni w Rzeszowie.

3. Opis systemu kanalizacji w Rzeszowie

Zużycie wody w miastach i aglomeracjach miejsko-przemysłowych jest zmienne w czasie i zależy od wielu czynników [1].

Są to:

- liczba mieszkańców korzystających z sieci wodociągowej
- charakter miasta lub aglomeracji
- standard wyposażenia sanitarnego mieszkań
- straty wody związane ze stanem technicznym sieci zewnętrznych i instalacji wodociagowych
- zamożność mieszkańców i poziom wykształcenia
- rodzaj przemysłu i zmiany w jego rozwoju
- pory roku

Ilość wody, która trafia do odbiorców, stanowi ilość sprzedawanej wody (produkowanej) pomniejszonej o:

- ✓ straty wody w procesach produkcyjnych
- ✓ straty wody na skutek wycieków lub poważniejszych awarii na sieci
- ✓ straty wynikające z błędów pomiarowych.

Ścieki komunalne wprowadzane na oczyszczalnię są mieszaniną:

- ✓ ścieków bytowo-gospodarczych
- ✓ ścieków powstających w zakładach przemysłowych i usługowych
- ✓ wód infiltracyjnych
- ✓ wód deszczowych
- ✓ wód powstających z topnienia śniegu i lodu (wody roztopowe).

Rzeszów jest aglomeracją miejsko - przemysłową o liczbie mieszkańców ok. 170 tys. Posiada system kanalizacji, w skład którego wchodzi kanalizacja sanitarna, stanowiąca ok. 51% całej długości sieci, kanalizacja ogólnospławna, stanowiąca ok. 10%, oraz kanalizacja deszczowa stanowiąca 39%.

Przedstawione poniżej wykresy pokazują bardzo duże różnice pomiędzy ilością produkowanej wody a ilością ścieków. Biorąc pod uwagę brak danych na temat strat wody w sieci i przy założeniu, że teoretycznie winny one wynosić do 20% produkcji wody, obliczone w skali roku różnice byłyby znacznie większe.

Jednocześnie należy zaznaczyć, że analiza ta nie uwzględnia dużych zakładów przemysłowych, szpitali itp. Instytucje te korzystają z własnych ujęć wody lecz ścieki wprowadzane są do kanalizacji miejskiej.

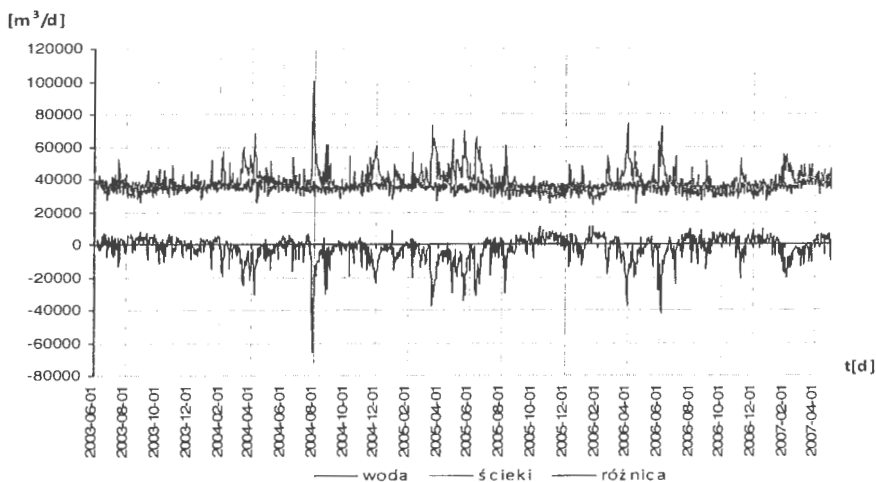
Występowanie znacznie zwiększonej ilości ścieków doprowadzanych do oczyszczalni w stosunku do ilości produkowanej wody ma miejsce szczególnie w czasie opadów atmosferycznych oraz w okresach napływu do sieci kanalizacyjnej wód roztopowych, których

ilości są wartościami zmiennymi i trudnymi do oszacowania, zależnymi od warunków atmosferycznych.

Kanalizacja ogólnospławna wprowadza w ciągu roku w system oczyszczania znaczne ilości wód opadowych i roztopowych, które doprowadzają do przeciążeń hydraulicznych osadników, obniżają zasadowość co pogarsza proces koagulacji kwaśnymi koagulantami, obniżają temperaturę ścieków, obniżają stężenie BZT₅, co powoduje spadek BZT₅/P_{og} i BZT₅/N_{og}. Wszystkie czynniki te powodują zwiększone zużycie energii elektrycznej, co wpływa na wzrost kosztów eksploatacji oczyszczalni.

Tabela 1. Zestawienie ilości produkowanej wody i ilości ścieków dla Rzeszowa.

Rok od 1 VI do 31 V	Produkcja wody X m ³	Ilość ścieków Y m ³	Różnica X – Y m ³
2003/2004	13 136 627	13 806 860	-670 233
2004/2005	12 768 169	15 092 302	-2 324 133
2005/2006	12 668 636	13 438 315	- 769 679
2006/2007	13 140 462	13 427 350	-286 888
Razem	51 713 894	55 764 827	-4 050 933



Rys.4. Rozkład ilości produkcji wody i ścieków dopływających do oczyszczalni w okresie 1.06.2003-30.04.2007

4. Modelowanie oczyszczalni ścieków

Współczesna oczyszczalnia ścieków realizuje oczyszczanie mechaniczno–biologiczne [2, 3].

Oczyszczanie mechaniczne polega na osadzeniu się na dnie zbiorników oczyszczalni stałych cząstek mineralnych i organicznych, które znajdują się w ściekach tworząc w nich zawiesinę. Powstały osad traktuje się jako odpad i po odpowiednim przetworzeniu usuwa się go z oczyszczalni. Sam proces oczyszczania nazywa się *sedymencją*.

Oczyszczanie biologiczne oznacza kilka procesów biochemicznych, które zachodzą pod wpływem różnych kultur mikroorganizmów i bakterii występujących w ściekach i wytwarzających tzw. *osad czynny*. Procesy te, przy pełnym oczyszczaniu biologicznym, prowadzą do dekompozycji i redukcji w ściekach związków organicznych, azotowych, fosforowych i do powstania zawiesiny, która ulega sedymentacji. *Związki organiczne* są związkami węgla organicznego, związki azotowe występują w postaci amoniaku, azotanów i azotanów, a związki fosforowe w postaci fosforanów.

Podstawową sprawą w badaniach procesów oczyszczania i przy tworzeniu modeli matematycznych oczyszczalni jest podział ścieków na *frakcje*, których stężenie i zmianę tego stężenia w czasie opisuje się oddzielnymi równaniami.

Ogólny podział na frakcje można przedstawić jako frakcje *rozpuszczone*, zawarte w cieczy i frakcje *nie rozpuszczone* zawarte w zawieszynie.

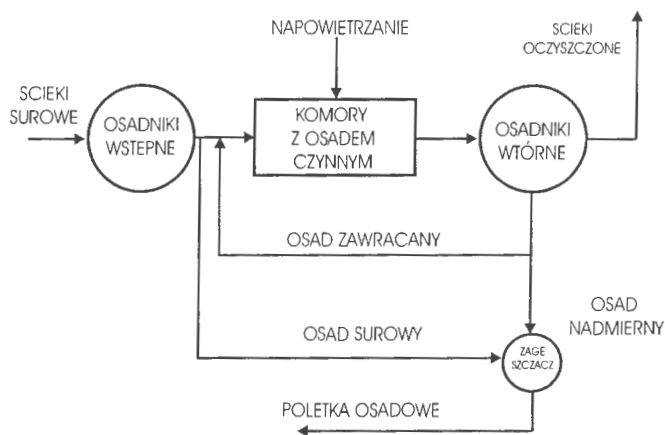
W pracy przyjęto podział ścieków na następujące frakcje:

- zawiesina organiczna, biologicznie łatwo rozkładalna x_1
- zawiesina organiczna wolno rozkładalna x_S
- zawiesina biologicznie łatwo rozkładalna zawierająca azot organiczny x_{ND}
- zawiesina mineralna x_{min}
- rozpuszczone związki organiczne, biologicznie łatwo rozkładalne s_S
- rozpuszczone związki organiczne, biologicznie nierozkładalne s_I
- rozpuszczony azot organiczny, biologicznie łatwo rozkładalny s_{ND}
- azot amonowy (amoniak) s_{NH}
- azotyny i azotany s_{NO}
- zasadowość (stężenie pH) s_{alk}
- biomasa heterotroficzna x_H
- biomasa autotroficzna x_A
- frakcja powstająca z obumierania biomasy x_P
- tlen rozpuszczony w ściekach s_O .

Modelowany proces technologiczny składa się z następujących elementów: dopływu ścieków surowych dostarczanych do oczyszczalni cyklicznie z pompowni ścieków, piaskowników,

osadników wstępnych, aerobowych komór z osadem czynnym, osadników wtórnych, układu recyrkulacji osadu, odpływu ścieków oczyszczonych, systemu gospodarki osadowej.

Jest to dwustopniowy proces oczyszczania ścieków, przy czym pierwszy stopień oczyszczania mechanicznego zachodzi w piaskownikach i osadnikach wstępnych, natomiast drugi stopień, oczyszczania biologicznego zachodzi w komorach z osadem czynnym. Ścieki w komorach są utleniane za pomocą systemu napowietrzania drobno pęcherzykowego. W komorach panują warunki aerobowe, dlatego zachodzące w nich procesy to utlenianie związków węgla i nityfikacja (redukcja związków azotowych w postaci amoniaku i azotynów). Zmieniając stężenie tlenu w komorach oraz ilość i wiek znajdującego się w nich osadu poprzez zmianę stężenia recyrkulacji zewnętrznej, można wpływać na skład osadu czynnego i w konsekwencji na procesy redukcji związków organicznych i nityfikacji, do zatrzymania nityfikacji włącznie. Schemat modelowanej oczyszczalni ścieków w Rzeszowie został schematycznie przedstawiony na rys. 51.



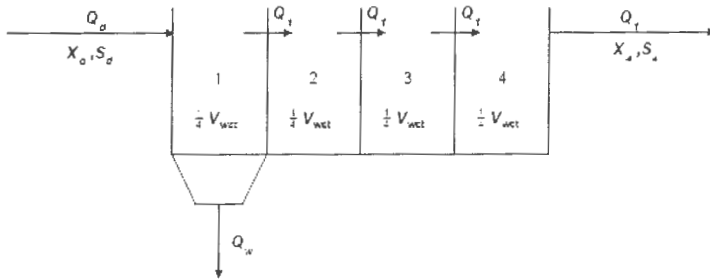
Rys 5. Schemat modelowanej oczyszczalni ścieków w Rzeszowie **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..**

Model osadnika wstępnego

Osadnik wstępny zmienia wejścia procesów biologicznych. Zmniejszają się wartości średnie i zmienność stężeń zanieczyszczeń związanych z zatrzymywanymi zawiesinami. Zmienność stężeń zanieczyszczeń (także rozpuszczonych) zmniejsza się także wskutek pewnego wymieszania w osadnikach o przepływie niedoskonale tłokowym. Dodatkowym skutkiem działania osadnika jest przesunięcie fazowe stężeń na wejściu i wyjściu. Przesunięcie fazowe natężenia przepływu jest niewielkie z uwagi na niewielkie wahania wypełnienia osadnika.

Jako model osadnika wstępnego przyjmuje się najczęściej model komórkowy Jest to ogólnie

przyjęty sposób uwzględniania występującej przy przepływie dyspersji wzdłużnej. W modelu uwzględnia się występowanie stref martwych. Czasami uwzględnia się wahania objętości osadnika spowodowane zmianami spiętrzenia na przelewach przy zmiennym natężeniu dopływu ścieków. Na rys. 6. przedstawiono schemat do modelu komórkowego osadnika wstępnego.



Rys. 6. Schemat do modelu osadnika wstępnego.

Model zmian stężeń zawiesin obejmuje równania:

- dla komórki 1

$$\frac{V}{4} \frac{dx_1}{dt} = Q_{wr}(x_{wr} - x_1) - \frac{V}{4} Ax_1^B$$

- dla komórek $i = 2, 3, 4$

$$\frac{V}{4} \frac{dx_i}{dt} = Q_{wy}(x_{i-1} - x_i) - \frac{V}{4} Ax_i^B$$

Model zmian stężeń zanieczyszczeń rozpuszczonych obejmuje równania:

- dla komórki 1

$$\frac{ds_1}{dt} = \frac{4}{V_{wst}} Q_{wst} (s_d - s_1)$$

- dla komórek $i = 2, 3, 4$

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{4}{V_{wst}} Q_1 (s_{i-1} - s_i)$$

- gdzie: s - stężenie wybranej frakcji zanieczyszczeń w zawiesinie w g/m^3
 s - stężenie wybranej frakcji zanieczyszczeń rozpuszczonych w g/m^3
 Q_d - dopływ ścieków do osadnika w m^3/d
 Q_l - odpływ ścieków z osadnika wstępnego w m^3/d
 Q_w - odpływ osadu z osadnika wstępnego w m^3/d
 A - szybkość usuwania zawiesin w osadniku wstępnym w g/d
 B - wykładnik funkcji
 V_{wst} - objętość czynnika osadnika wstępnego w m^3/d .

Przy uwzględnianiu wahań objętości osadnika, wprowadza się dodatkowe równania:

$$\frac{dV_{wst}}{dt} = Q_d - Q_w - Q_l$$

$$Q_l = c_w h^{3/2}$$

$$h = H_o - \frac{V_{wst}}{A_{wst}}$$

- gdzie: h - wysokość warstwy przelewowej na odpływie w m
 H_o - wysokość osadnika wstępnego (do korony przelewu) w m
 A_{wst} - powierzchnia rzutu poziomego osadnika wstępnego w m^2
 c_w - współczynnik wydatku przelewu w $\text{m}^{3/2}/\text{d}$.

Model przemian związków organicznych i azotu w komorach napowietrzania

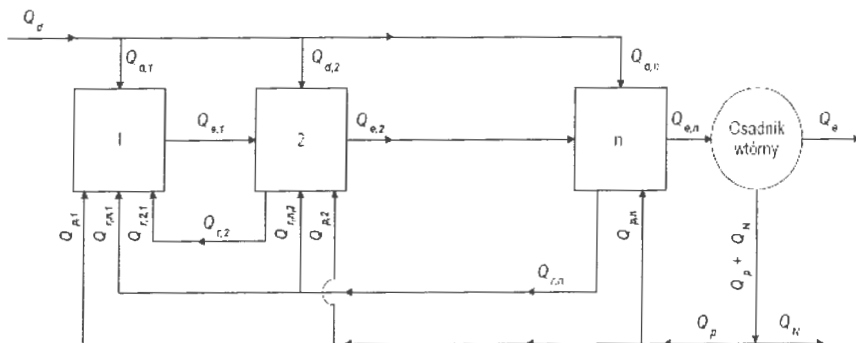
Model procesu osadu czynnego obejmuje opis przemian poszczególnych frakcji zanieczyszczeń w kolejnych komorach układu z uwzględnieniem warunków w nich panujących. Równania modelu dla kolejnych frakcji mają następującą postać ogólną:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{1}{V_{K,i}} (L_{d,c,i} - Q_{e,i}c_i + R_{c,i})$$

$$L_{d,c,i} = Q_{d,i}c_d + Q_{e,i-1}c_{i-1} + Q_{p,i}c_p + \sum_{j=i+1}^n Q_{r,j,i}c_{r,j,i}$$

$$Q_{e,i} = Q_{d,i} + Q_{p,i} + \sum_{j=i+1}^n Q_{r,j,i}$$

- gdzie:
- $L_{d,c,i}$ - sumaryczny ładunek frakcji c dopływający do i -tej komory w g/d
 - V_K - objętość komory osadu czynnego w m^3
 - Q - natężenie przepływu w m^3/d
 - c - stężenie frakcji zanieczyszczeń w g/m^3
 - R_c - wypadkowa szybkość reakcji dla frakcji zanieczyszczeń w $g/m^3 d$
 - i - numer komory osadu czynnego
 - d - dotyczy dopływu ścieków
 - e - dotyczy odpływu ścieków
 - p - dotyczy osadu powrotnego
 - r - dotyczy strumieni recyrkulacji wewnętrznej.



Rys. 7. Schemat do modelu osadu czynnego. 1,2,...,n - kolejne komory o pełnym wymieszaniu.

Związki organiczne rozpuszczone biologicznie nierozkładalne (s_I)

Ta frakcja zanieczyszczeń nie podlega przemianom. W komorach osadu czynnego następuje jedynie wyrównanie wahań stężenia a szybkość reakcji w równaniu zmiany stężenia jest zerowa.

Zawiesiny organiczne biologicznie nierozkładalne (x_I)

Frakcja ta nie ulega przemianom biologicznym a jedynie jest usidlana w kłaczkach osadu czynnego i opuszcza układ z osadem nadmiernym. Szybkość reakcji w równaniu zmiany stężenia jest zerowa ($R_{x,I} = 0$).

Związki organiczne biologicznie łatwo rozkładalne (s_S)

Frakcja łatwo rozkładalna jest przyswajana przez bakterie heterotroficzne (x_{BH}) i utleniana z wykorzystaniem tlenu rozpuszczonego (s_O) lub azotanów (s_{NO}).

Równoległe biegnie produkcja tych związków w wyniku hydrolizy frakcji wolno rozkładalnej (x_S). Odpowiednie szybkości reakcji (w g ChZT/m³ d) wyrażają się następującymi wzorami:

Szybkość związana z przyswajaniem przy wykorzystaniu tlenu

$$R_{s,i}^{(1)} = -\frac{\hat{\mu}_H}{Y_H} \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{o,i}}{K_{OH} + s_{o,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} x_{BH,i}$$

Szybkość związana z przyswajaniem, przy wykorzystaniu azotanów

$$R_{s,i}^{(2)} = -\frac{\hat{\mu}_H}{Y_H} \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{NO,i}}{K_N + s_{NO,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + s_{o,i}} x_{BH,i} \eta_g$$

Szybkość związana z hydrolizą

$$R_{s,i}^{(3)} = k_h \frac{x_{s,i}/x_{BH,i}}{K_x + x_{s,i}/x_{BH,i}} \left(\frac{s_{o,i}}{K_{OH} + s_{o,i}} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + s_{o,i}} \frac{s_{NO,i}}{K_N + s_{NO,i}} \right) x_{BH,i}$$

- gdzie:
- $\hat{\mu}_H$ - max. stałej szybkości przyrostu heterotrofów w 1/d
 - Y_H - współczynnik wydajności przyrostu heterotrofów w g ChZT/g ChZT
 - K_s - stała saturacji w g ChZT/m³
 - K_{OH} - stała saturacji w g O₂/m³
 - K_N - stała saturacji w g N/m³
 - x_{BH} - stężenie biomasy heterotroficznej w g ChZT/m³
 - k_h - stała szybkości hydrolizy x_s w g ChZT/g ChZT d
 - K_x - stała saturacji w g ChZT/g ChZT
 - η_g - wsp. szybkości. przyrostu heterotrofów w warunkach anoksycznych
 - η_h - wsp. szybkości hydrolizy w warunkach anoksycznych.

Związki organiczne wolno rozkładalne (x_S)

Substraty organiczne wolno rozkładalne po doprowadzeniu do komory są bardzo szybko usidlone w kłaczkach osadu czynnego a następnie adsorbowane przez heterotrofy, które prowadzą ich hydrolizę do produktów łatwo rozkładalnych (s_S). Jednocześnie następuje produkcja frakcji x_S w wyniku obumierania biomasy heterotroficznej i autotroficznej. Odpowiednie szybkości reakcji (g ChZT/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z reakcją hydrolizy

$$R_{x,i}^{(1)} = -k_h \frac{x_{s,i}/x_{BH,i}}{K_x + x_{s,i}/x_{BH,i}} \left(\frac{s_{o,i}}{K_{OH} + s_{o,i}} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + s_{o,i}} \frac{s_{NO,i}}{K_N + s_{NO,i}} \right) x_{BH,i}$$

Szybkość związana z obumieraniem heterotrofów

$$R_{x,i}^{(2)} = (1 - f_p) b_H x_{BH,i}$$

Szybkość związana z obumieraniem autotrofów

$$R_{x,i}^{(3)} = (1 - f_p) b_A x_{BA,i}$$

- gdzie: f_p - ułamek frakcji nierozkładalnych z obumierania biomasy
 b_H - stała szybkości obumierania heterotrofów w 1/d
 b_A - stała szybkości obumierania autotrofów w 1/d.

Azot organiczny rozpuszczony biologicznie rozkładalny (s_{ND})

Biologicznie rozkładalny rozpuszczony azot organiczny ulega amonifikacji. Proces ten prowadzą bakterie heterotroficzne. Równoległe biegnie produkcja tej formy azotu w procesie hydrolizy frakcji x_{ND} . Odpowiednie szybkości reakcji (g N/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z amonifikacją

$$R_{x_{ND},i}^{(1)} = -k_a s_{ND,i} X_{BH,i}$$

Szybkość związana z hydrolizą

$$R_{x_{ND},i}^{(2)} = -\frac{X_{ND,i}}{X_{z,i}} R_{x,i}^{(1)}$$

Azot organiczny biologicznie rozkładalny w zawieszynie (xND)

Azot biologicznie rozkładalny w zawieszynie ulega hydrolizie do form rozpuszczonych (s_{ND}), a jednocześnie następuje jego produkcja w wyniku obumierania biomasy. Odpowiednie szybkości reakcji (g N/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z hydrolizą

$$R_{x_{ND},i}^{(1)} = \frac{X_{ND,i}}{X_{z,i}} R_{x,i}^{(1)}$$

Szybkość związana z obumieraniem heterotrofów

$$R_{x_{ND},i}^{(2)} = i_{NV}(1 - f_P)b_H X_{BH,i}$$

Szybkość związana z obumieraniem autotrofów

$$R_{x_{ND},i}^{(3)} = i_{NV}(1 - f_P)b_A X_{BA,i}$$

gdzie i_{XN} - udział azotu w biomacie w g N/g ChZT.

Azot amonowy (s_{NH})

W obecności tlenu rozpuszczonego bakterie nityfikacyjne (x_{BA}) utleniają azot amonowy do azotynów i azotanów. Jednocześnie bieżą: asymilacja amoniaku przez przyrastającą biomasę oraz amonifikacja azotu organicznego (s_{ND}). Odpowiednie szybkości reakcji (g N/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z nityfikacją

$$R_{s_m,i}^{(1)} = -\left(\frac{1}{Y_A} + i_{XN}\right) \mu_A \frac{s_{NH,i}}{K_{NH} + s_{NH,i}} \frac{s_{O,i}}{K_{OA} + s_{O,i}} x_{BA,i}$$

Szybkość związana z asymilacją w warunkach tlenowych

$$R_{s_m,i}^{(2)} = -i_{XN} \mu_H \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{O,i}}{K_{OH} + s_{O,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} x_{BH,i}$$

Szybkość związana z asymilacją w warunkach anoksydacyjnych

$$R_{s_m,i}^{(3)} = -i_{XN} \mu_H \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{NO,i}}{K_N + s_{NO,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + s_{O,i}} x_{BH,i} \eta_g$$

Szybkość związana z amonifikacją

$$R_{s_{NH,i}}^{(4)} = k_a s_{ND,i} x_{BH,i}$$

- gdzie: μ_A - max. stałej szybkości przyrostu autotrofów w 1/d
 Y_A - współczynnik wydajności przyrostu autotrofów w g ChZT/g N
 K_{NH} - stała saturacji w g N/m³
 K_{OA} - stała saturacji w g O₂/m³
 x_{BA} - stężenie biomasy autotroficznej w g ChZT/m³.

Azot azotanowy (sNO)

Stężenie azotanów w ściekach miejskich jest zwykle pomijalnie niskie a powstają one w wyniku nityfikacji amoniaku. Z drugiej strony w warunkach anoksycznych następuje ich denityfikacja. Odpowiednie szybkości reakcji (g N/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z nityfikacją

$$R_{s_m,i}^{(1)} = \frac{\mu_A}{Y_A} \frac{s_{NH,i}}{K_{NH} + s_{NH,i}} \frac{s_{O,i}}{K_{OA} + s_{O,i}} x_{BA,i}$$

Szybkość związana z denityfikacją

$$R_{s_m,i}^{(2)} = -\frac{1-Y_H}{2.86Y_H} \mu_H \frac{s_{S,i}}{K_S + s_{S,i}} \frac{s_{NO,i}}{K_N + s_{NO,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + s_{O,i}} x_{BH,i} \eta_g$$

Zasadowość (sALK)

Zasadowość ulega zużyciu w wyniku nityfikacji i asymilacji azotu amonowego a rośnie w wyniku denityfikacji i amonifikacji. Odpowiednie szybkości reakcji (mol/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z nityfikacją

$$R_{s_{as},i}^{(1)} = - \left(\frac{1}{7Y_A} + \frac{i_{XN}}{14} \right) \hat{\mu}_A \frac{s_{NH,i}}{K_{NH} + s_{NH,i}} \frac{s_{o,i}}{K_{OA} + s_{o,i}} x_{BA,i}$$

Szybkość związana z asymilacją w warunkach tlenowych

$$R_{s_{as},i}^{(2)} = - \frac{i_{XN} \hat{\mu}_H}{14} \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{o,i}}{K_{OH} + s_{o,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} x_{BH,i}$$

Szybkość związana z denityfikacją

$$R_{s_{alk},i}^{(3)} = \left(\frac{1 - Y_H}{14 \cdot 2.86 Y_H} - \frac{i_{XN}}{14} \right) \mu_H$$

$$\mu_H = \hat{\mu}_H \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{NO,i}}{K_N + s_{NO,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + s_{o,i}} x_{BH,i} \eta_B$$

Szybkość związana z amonifikacją

$$R_{s_{o},i}^{(4)} = - \frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \hat{\mu}_A \frac{s_{NH,i}}{K_{NH} + s_{NH,i}} \frac{s_{o,i}}{K_{O_1} + s_{o,i}} x_{BA,i}$$

Tlen rozpuszczony (s_o)

Tlen ulega zużyciu na utlenianie związków organicznych i nityfikację. Odpowiednie szybkości reakcji ($g O_2/m^3 d$) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z utlenianiem związków organicznych

$$R_{s,i}^{(1)} = -\frac{1 - Y_H}{Y_H} \mu_H \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{o,i}}{K_{OH} + s_{o,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} x_{BH,i}$$

Szybkość związana z nityfikacją

$$R_{s,i}^{(2)} = -\frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \mu_A \frac{s_{NH,i}}{K_{NH} + s_{NH,i}} \frac{s_{o,i}}{K_{OA} + s_{o,i}} x_{BA,i}$$

Biomasa heterotroficzna (x_{BH})

Utlenianiu związków organicznych (zarówno z wykorzystaniem tlenu jak i azotanów) towarzyszy przyrost biomasy heterotroficznej. Część komórek bakterii obumiera oraz jest konsumowana przez organizmy wyższe. Odpowiednie szybkości reakcji (g ChZT/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z wykorzystaniem tlenu

$$R_{x_m,i}^{(1)} = \mu_H \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{o,i}}{K_{OH} + s_{o,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} x_{BH,i}$$

Szybkość związana z wykorzystaniem azotanów

$$R_{x_m,i}^{(2)} = \mu_H \frac{s_{s,i}}{K_s + s_{s,i}} \frac{s_{NO,i}}{K_N + s_{NO,i}} \frac{s_{NH,i}}{K_N + s_{NH,i}} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + s_{o,i}} x_{BH,i} \eta_g$$

Szybkość związana z obumieraniem

$$R_{x_{R,i}}^{(2)} = -b_A \cdot X_{BA,i}$$

Biomasa autotroficzna (x_{BA})

Utlenianiu amoniaku (nityfikacji) towarzyszy przyrost biomasy autotroficznej. Część komórek bakterii obumiera oraz jest konsumowana przez organizmy wyższe. Odpowiednie szybkości reakcji (g ChZT/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z nityfikacją

$$R_{x_{R,i}}^{(1)} = \mu_A \frac{S_{NH,i}}{K_{NH} + S_{NH,i}} \frac{S_{O,i}}{K_{OA} + S_{O,i}} X_{BA,i}$$

Szybkość związana z obumieraniem

$$R_{x_{R,i}}^{(2)} = -b_A \cdot X_{BA,i}$$

Biologicznie nierozkładalne produkty obumierania biomasy (x_P)

Część produktów obumierania biomasy jest biologicznie nierozkładalna. Akumulują się one w kłaczkach osadu czynnego i są odprowadzane poza układ z osadem nadmiernym. Przyjmuje się, że frakcji tej nie ma w ściekach surowych. Odpowiednie szybkości reakcji (g ChZT/m³ d) wyrażają się wzorami:

Szybkość związana z obumieraniem heterotrofów

$$R_{x_p,i}^{1,1} = f_p b_H x_{BH,i}$$

Szybkość związana z obumieraniem autotrofów

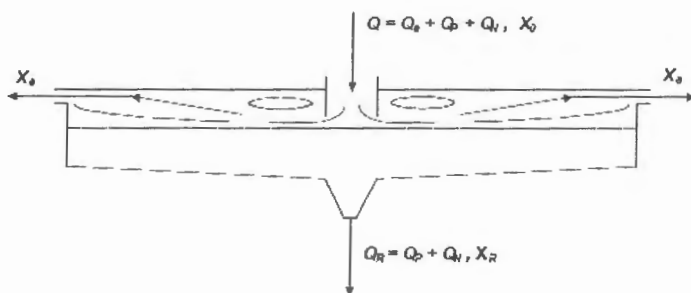
$$R_{x_p,i}^{1,2} = f_p b_A x_{BA,i}$$

Zawiesiny mineralne (x_{min})

Zawiesiny mineralne nie ulegają przemianom biochemicznym a model zmian ich stężenia jest analogiczny do modelu dla frakcji x_I . Szybkość reakcji w równaniu zmiany stężenia jest zerowa ($R_{x_{min},i} = 0$).

Model osadnika wtórnego

Osadnik wtórny odgrywa kluczową rolę w procesie osadu czynnego. Dotyczy to dwóch funkcji tego urządzenia: zagęszczającej i klarującej, które decydują o stężeniu osadu w komorach i ilości zawiesin wynoszonych ze ściekami oczyszczonymi. Oprócz separacji zawiesin osadnik wtórny modyfikuje także stężenie zanieczyszczeń rozpuszczonych (opóźnienie w fazie i częściowe uśrednienie), co może być uwzględnione w modelu. Zwykle przyjmuje się charakter przepływu w osadniku według Dixona, co zilustrowano na rys. 8.



Rys. 8. Charakter przepływu w radialnym osadniku wtórnym.

Większość cieczy zasilającej osadnik płynie do przelewów. W czasie tego ruchu zawiesiny sedymentując opuszczają strumień płynący do wylotu i przez strefę zagęszczania opadają w kierunku dna. W strefie zagęszczania zarówno ciecz jak i zawiesiny poruszają się dół z tym, że prędkość zawiesin jest większa, gdyż do prędkości wywołanej recyrkulacją dodaje się prędkość wynikająca z działania siły grawitacji.

Zakłada się upraszczająco, że stężenia w przekroju poziomym są jednakowe. Jednocześnie przyjmuje się, że zagęszczanie następuje zgodnie z teorią strumienia limitującego. Transport zawiesin do dna osadnika wywołany jest siłą ciężkości, powodującą sedymentację zawiesin z prędkością v , oraz przepływem cieczy z prędkością u , proporcjonalną do natężenia recyrkulacji osadu (QR).

Strumień zawiesin wywołany grawitacją w miejscu (j) strefy zagęszczania, w którym stężenie osadu wynosi X_j , wyraża się wzorem

$$G_{vj} = G_v(X_j) = X_j v_j$$

Strumień wywołany recyrkulacją dany jest wzorem

$$G_{uj} = G_u(X_j) = X_j u$$

natomiast strumień całkowity wzorem

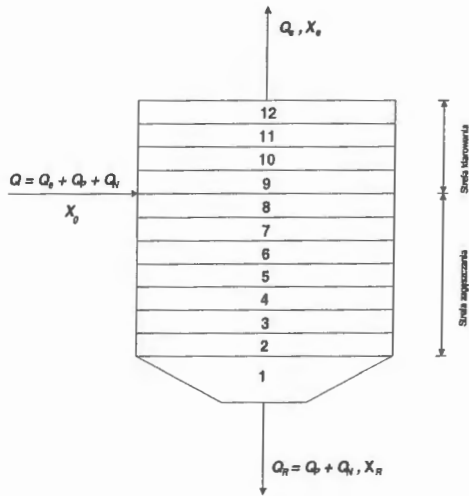
$$G_{\pi} = G_r(X_j) = G_{vj} + G_{vj}$$

Prędkość sedymentacji jest funkcją stężenia osadu i wyraża się wzorem

$$v = v_0 e^{-BX}$$

gdzie: v - prędkość sedymentacji w m/d
 v_0 - współczynnik empiryczny w m/d
 B - współczynnik empiryczny w m³/g.

Warunki mieszania w strefach klarowania i zagęszczania symuluje się przez przyjęcie modeli komórkowych odpowiednio z czterema i ośmioma szeregowo połączonymi komorami (warstwami). Schemat tego podziału przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Schemat podziału osadnika wtórnego.

Bilanse zawiesin dla poszczególnych warstw (j) w strefie zagęszczania są następujące:

- dla $j = 1$

$$\frac{dX_s}{dt} = \frac{1}{H_s} (G_o - G_{r,s} + G_{r,s})$$

$$G_o = \frac{1}{A_{w1}} (Q X_o - Q_r X_r)$$

We wzorze tym $G_{v,9}$ oznacza dodatkowy strumień zawiesin sedymentujących z sąsiedniej warstwy w strefie klarowania.

- dla $j = 7, 6, \dots, 2$

$$\frac{dX_j}{dt} = \frac{1}{H_j} (G_{r,j+1} + G_{r,j})$$

- dla $j = 1$

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{1}{H_1} (G_{r,2} + G_{v,1})$$

Bilanse zawiesin dla poszczególnych warstw w strefie klarowania są następujące:

- dla $j = 9$

$$\frac{dX_o}{dt} = \frac{1}{V_o} [Q_r (X_r - X_{o,r}) + (G_{r,10} - G_{r,9}) A_{w1}]$$

- dla $j = 10, 11$

$$\frac{dX_j}{dt} = \frac{1}{V_j} [Q_e (X_{j-1,\varepsilon} - X_{j,\varepsilon}) + (G_{v,j+1} - G_{v,j}) A_{w,j}]$$

- dla $j = 12$

$$\frac{dX_{12}}{dt} = \frac{1}{V_{12}} [Q_e (X_{11,\varepsilon} - X_{12}) - G_{v,12} A_{w,12}]$$

gdzie:

H_j - wysokość j -tej warstwy na głębokości osadnika w m

V_j - objętość j -tej warstwy na głębokości osadnika w m³.

Model mieszania osadu recykulowanego ze ściekami opuszczającymi osadnik wstępny

Osad recykulowany miesza się w komorze z osadem czynnym ze ściekami opuszczającymi osadnik wstępny. W modelu przyjęto, iż mieszanie tych dwóch strumieni przepływu jest idealne i opisane zależnością:

$$x_i, s_i = \frac{x_{ir}, s_{ir} * Q_r + x_{is}, s_{is} * Q_s}{Q_r + Q_s}$$

gdzie:

x_i, s_i - odpowiednio stężenie zawiesiny lub substancji rozpuszczonej [g/m³]

x_{ir}, s_{ir} - odpowiednio stężenie zawiesiny lub substancji rozpuszczonej w osadzie recykulowanym [g/m³]

x_{is}, s_{is} - odpowiednio stężenie zawiesiny lub substancji rozpuszczonej ściekach opuszczających osadnik wstępny

Q_r - natężenie przepływu osadu recykulowanego [m^3/h]

Q_s - natężenie przepływu ścieków opuszczających osadnik wtórny [m^3/h]

5. Zależności między wartościami mierzonymi i modelowanymi

Wykonane w wyniku szarży na obiekcie pomiary obejmują [2, 3]:

- stężenie tlenu s_o ,
- biologiczne zapotrzebowanie tlenu BZT_5
- zawiesina ogólna x_{og}
- zawiesina mineralna x_{min}
- azot ogólny N_{og}
- azot amonowy s_{NH} .

Przeliczenie wartości mierzonych na wartości modelowane odbywa się na podstawie bilansów związków organicznych i azotowych, i są one następujące:

$$\begin{aligned}s_s &= BZT_{5we} \\s_l &= ChZT_{wy} - 1,47BZT_{5wy} \\x_s &= 0,47BZT_5 \\x_l &= ChZT - 1,47 BZT_5 - s_l \\N_{org} &= N_{og} - s_{NH} \\s_{ND} &= N_{org} * s_s / ChZT \\x_{ND} &= N_{org} * x_s / ChZT\end{aligned}$$

przy czym indeksami we i wy oznaczono we wzorach pomiary BZT_5 i $ChZT$ wykonane w ściekach odpowiednio surowych i oczyszczonych.

Przeliczenie odwrotne, tzn. wartości modelowanych na wartości mierzone, jest następujące:

$$\begin{aligned}ChZT &= XS + SS + XI + SI \\BZT_5 &= (XS + SS) 0.68 \\N_{og} &= N_{org} + s_{NH}\end{aligned}$$

6. Uwagi końcowe

Przedstawiono opis procesu technologicznego w zmodernizowanej oczyszczalni w Rzeszowie oraz postać modelu tej oczyszczalni przed modernizacją. Kolejne etapy dalszej pracy będą dotyczyły:

- ✓ Wykonania kalibracji modelu na podstawie pomiarów zebranych w swoim czasie w oczyszczalni przed modernizacją.
- ✓ Opracowania algorytmów identyfikacji modelu dla zautomatyzowania procesu wyznaczania matematycznego opisu badanego obiektu.
- ✓ Optymalizacji struktury modelu fizykalnego dla ewentualnego jej uproszczenia.
- ✓ Opracowania modelu fizykalnego oczyszczalni rozbudowanego o komory denitryfikacji i defosfatacji.
- ✓ Identyfikacji nowego modelu przy użyciu opracowanych algorytmów obliczeniowych.
- ✓ Opracowania algorytmów sterowania predykcyjnego zmodernizowaną oczyszczalnią ścieków.

Literatura

1. Bartkiewicz L.: *Opis procesu technologicznego w oczyszczalni w Rzeszowie*. Raport MPWiK Rzeszów i IBS PAN, Warszawa 2007.
2. Stachura M.: *Modelowanie i identyfikacji oczyszczalni ścieków*. Raport PW i IBS PAN, Warszawa 2007.
3. Studziński J.: *Symulacja, identyfikacja i sterowanie oczyszczalniami ścieków*. IBS PAN, Warszawa 2004.

