

NOTEKŪDEŅU AERĀCIJAS IEKĀRTAS PĀREJAS PROCESA MODELĒŠANA

Transient Process Modelling in Waste Water Aeration Unit

A. Šnīders

LLU TF Lauksaimniecības enerģētikas institūts

J.Čakstes bulv. 5, Jelgava LV-3001

tel.: 3022242, 3080687, e-pasts: sniders@cs.llu.lv, fax: 3027238

Abstract

To minimize the expenditure of electrical energy for communal waste water biological treatment the simulation and investigation of oxygen transfer efficiency in aeration tank have been made. Solved oxygen transfer efficiency η_0 (Fig.1.) is one of the main important factor directly estimating the expenditure of electrical power for waste water aeration. The research object is an aeration tank (Fig.2.) with one input impact –the air blower's capacity L_g (m^3/h), one output controlled parameter – dissolved oxygen concentration C (g/m^3) and several perturbances such as waste water temperature T ($^{\circ}C$), waste water afflux Q (m^3/h) and biological oxygen need L_a (g/m^3) for complete purification. Oxygen's transfer efficiency depends on the waste water temperature, the depth of aerator immersion h (m), air flow intensity λ_d ($m^3/disc.h$) and the air diffuser's density σ_s .

For simulation and practical design of the air blower control system the equations of statics $C=f(L_g, Q, L_a, T, h, \lambda_d, \sigma_s)$ and dynamics $C=f(t)$ have been compiled. That made possible to estimate the static gains for control channel K_a and for perturbances K_q, K_T as well as the time constant of the aeration tank T_a . The analysis prove that the aeration tank is a non-stationary control object with the variable static and dynamic parameters and needs adaptive controller with predication of oxygen consumption. The block diagram for transient process simulation of the oxygen concentration control system have been compiled using model of the actual PID controller and the "Matlab" subprogram "Simulink".

Keywords: *Waste water, aeration, oxygen, concentration, control, transfer function, modelling.*

Ievads

Notekūdeņu bioloģiskās attīrīšanas ietaisēs lielākais elektroenerģijas patērētājs ir aerācijas kompresori, kas nodrošina attīrīšanas procesa nepārtrauktību. Tādēļ aerācijas iekārtu elektriskās piedziņas izvēle un tās ražīguma optimāla regulēšana ir aktuāls tehnisks un ekonomisks jautājums [1, 2].

Lai noteiktu aerācijas iekārtas nepieciešamo ražīgumu un jaudu, kā arī lai realizētu tās optimālu regulēšanu atbilstoši procesa norisei, nepieciešams veikt notekūdeņu aerācijas tvertnes kā automātiskās vadības objekta statisko un dinamisko raksturojumu analīzi un pārejas procesu modelēšanu mainīgas slodzes apstākļos [3].

Ekoloģisko objektu modelēšanā pielieto matemātisko analīzi, aprakstot pārejas procesus tajos ar parastajiem vai parciālajiem diferenciālvienādojumiem [4]. Skābekļa pārneses dinamisko procesu notekūdeņu aerācijas tilpnē var aprakstīt ar viendimensijas modeli, jo membrānas tipa diskveida gaisa difuzori, kas izvietoti pa visu aerācijas zonas laukumu nodrošina vienmērīgu gaisa skābekļa sadali un izlīdzinātu izšķīdušā skābekļa koncentrāciju visā notekūdeņu tilpumā [3, 5].

Notekūdeņu aerācijas tilpnes statiskā vienādojuma sastādīšanas metodika un linearizācija, pielietojot nelineāras daudzfaktoru funkcijas izvīzījumu Teilora rindā ar parciālajiem atvasinājumiem, apskatīta publikācijās [3, 6, 7]. Dotajā darbā veikti statiskā vienādojuma koeficientu precizējumi, izmantojot firmas "Flygt" datus [5], kā arī sastādīts aerācijas zonas viendimensijas modelis nestacionāram režīmam un iegūti tā statiskie un dinamiskie parametri.

Iegūtie aerācijas procesa statiskie un dinamiskie raksturojumi skābekļa koncentrācijas C regulēšanas kanālam $L_g \rightarrow C$ un perturbāciju iedarbes kanāliem $T \rightarrow C$; $q=Q(L_a-L_t) \rightarrow C$

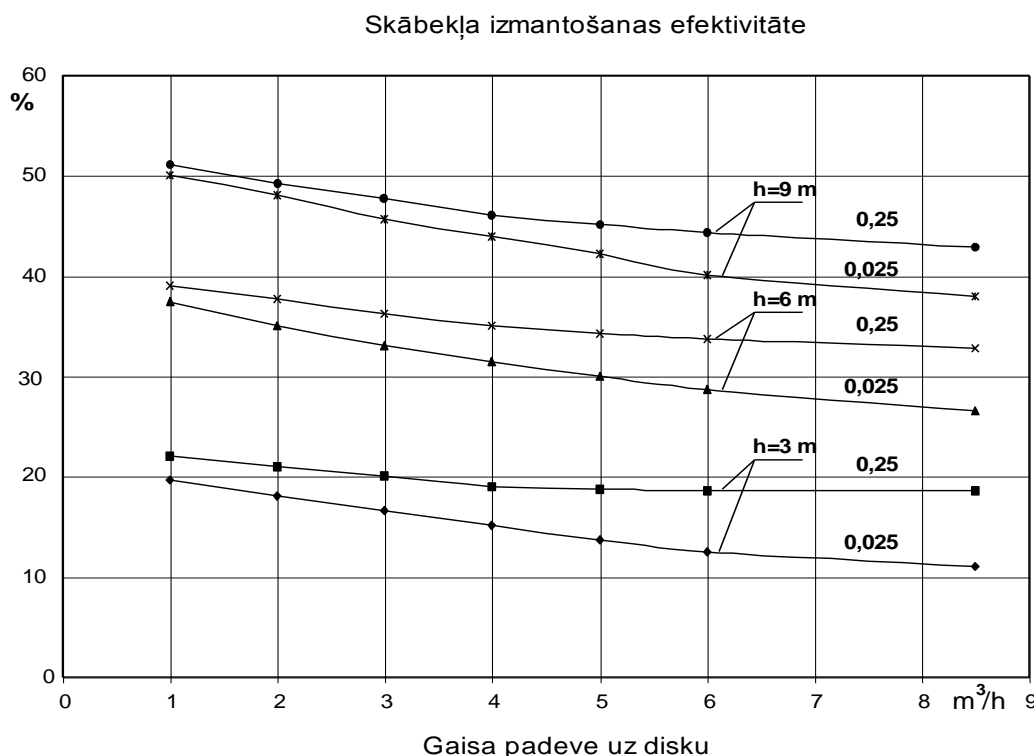
deva iespēju modelēt skābekļa koncentrācijas regulēšanas procesu notekūdeņu aerācijas tvertnē.

Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas automātiskās regulēšanas sistēmas algoritmiskā struktūrshēma sastādīta izmantojot automātiskās vadības teorijas matemātisko aparātu [8, 9], bet pārejas procesu modelēšana un optimizācija veikta izmantojot matemātiskās laboratorijas "Matlab" apakšprogrammu "Simulink"[10].

Gaisa skābekļa izmantošanas efektivitāte

Notekūdeņu attīrīšanas procesā baktērijas patērē ūdenī izšķīdušo skābekli. Skābekļa šķīšana ūdenī notiek laikā, kad gaisa pūslīši no difuzoriem paceļas līdz ūdens virsmai. Līdz ar to gaisa pūtēju pievadītā skābekļa lielākā daļa aizplūst atmosfērā. Lai samazinātu gaisa pūtēju patērēto elektroenerģiju, kas proporcionāla to ražīgumam, būtiski svarīgi ir paaugstināt gaisa skābekļa izmantošanas efektivitāti.

Firmas "Flygt" membrānas tipa diskveida gaisa difuzoru raksturlīknes (1.att.) parāda skābekļa izmantošanas koeficienta η_o atkarību no gaisa padeves daudzuma caur 1 disku λ_d (m^3/h uz disku) pie dažādiem aeratora iegremdēšanas dziļumiem $h = 3,6$ un 9 m un difuzoru izvietojuma blīvuma $\sigma_s = (0,025-0,25)$ uz $1 m^2$ aerācijas virsmas laukuma.



1.att. Gaisa skābekļa izmantošanas efektivitātes koeficients η_o (%) atkarībā no gaisa padeves daudzuma caur vienu disku λ_d (m^3/h), gaisa difuzoru izvietojuma blīvuma $\sigma_s = 0,025-0,25$ un gaisa difuzoru iegremdēšanas dziļuma h (m).

Skābekļa izmantošanas efektivitāti būtiski iespaido aeratora iegremdēšanas dziļums. Robežās no 3 līdz 6 m koeficients η_o palielinās proporcionāli dziļumam h . Zem 3 m skābekļa izmantošanas efektivitāte strauji krītas, jo samazinās gaisa pūslīšu kontakta laiks ar ūdeni. Kontakta laiks samazinās arī palielinot gaisa padevi λ_d caur difuzoriem, jo palielinās gaisa pūslīšu pacelšanās ātrums. Palielinot disku blīvumu σ_s uz $1 m^2$ aerācijas laukumu pie nemainīga summārā gaisa padeves daudzuma koeficienta η_o vērtība paaugstinās divu iemeslu dēļ: pirmkārt, palielinās gaisa pūslīšu skaits, kas kontaktējas ar ūdeni; otrkārt, samazinās to

pacelšanās ātrums. Palielinot disku blīvumu, proporcionāli pieaug kapitālieguldījumi, kurus daļēji var kompensēt ar elektroenerģijas papildus ietaupījumu. Firmas "Flygt" ieteiktais difuzoru blīvums ir 0,6 līdz 6 diskus uz 1 m². Lai noteiktu optimālo risinājumu, nepieciešama ekonomiskā analīze.

Veicot 1.attēla raksturlīkņu regresijas analīzi, iegūta pusempīriskā izteiksme skābekļa izmantošanas koeficienta η_o analītiskai aprēķināšanai:

$$\eta_o = \eta_{o_{\max}} \exp(-k(h)k(\sigma_s)\lambda_d) \quad (1)$$

kur $\eta_{o_{\max}} = 1 - \exp(-0,083 h)$ - η_o maksimālā vērtība atkarībā no gaisa difuzoru

iegremdēšanas dziļuma h ; $k(h) = (0,11 - 0,008h)$ - raksturlīknes $\eta_o = f(\lambda_d)$

korekcijas koeficients pēc difuzoru iegremdēšanas dziļuma h ;

$k(\sigma_s) = \exp(-2,2 \sigma_s)$ - korekcijas koeficients pēc difuzoru blīvuma σ_s .

Iegūto izteiksmi var izmantot notekūdeņu attīrīšanas ietaisņu rekonstrukcijas aprēķinos, lai izvēlētos aerācijas iekārtas piemērotāko tehnisko risinājumu.

Aerācijas tilpnes vienādojumi statistiskā un dinamiskā režīmā

Izmantojot pētījumu rezultātus par skābekļa pārneses efektivitāti notekūdeņu aerācijas procesā, iegūta precizēta izteiksme gaisa pūtēju nepieciešamā ražīguma L_g aprēķināšanai:

$$L_g = \frac{Q(L_a - L_t)}{k_1(h)k_2(T)k_3(\sigma_s, \lambda_d)(C_c - C)} \quad (2)$$

kur $k_1(h) = 5,8[1 - \exp(-0,1h)]$ - korekcijas koeficients pēc gaisa difuzoru iegremdēšanas dziļuma, h ;

$k_2(T) = 0,02T + 0,6$ - korekcijas koeficients pēc notekūdeņu temperatūras, T ;

$k_3(\sigma_s, \lambda_d) = \exp[-(0,11 - 0,008h) \exp(-2,2 \sigma_s) \lambda_d]$ - korekcijas koeficients

pēc difuzoru blīvuma σ_s un gaisa padeves daudzuma caur 1 disku λ_d ;

$C_c = (0,0025 T^2 - 0,3 T + 14,2) (1 + 0,05h)$ - skābekļa šķīdība ūdenī, g/m³;

C - skābekļa koncentrācija notekūdeņos, g/m³;

Q - notekūdeņu pieplūdes daudzums, m³/h;

L_a - bioloģiskais skābekļa patēriņš BSP notekūdeņu pilnīgai attīrīšanai, g/m³;

L_t - paliekošais BSP, g/m³.

No izteiksmes (2) var izteikt izšķīdušā skābekļa koncentrāciju kā funkciju no četriem mainīgiem argumentiem L_g , Q , L_a , T un diviem konstantiem parametriem h un σ_s . Lai vienkāršotu statistiskā vienādojuma linearizāciju un tālāko analīzi, ievadam kompleksu iedarbi $q = Q(L_a - L_t)$ - skābekļa patēriņa intensitāti, g/h.

Skābekļa koncentrācijas automātiskās regulēšanas sistēmas algoritmiskās struktūrshēmas sastādīšanai jānosaka statistiskie pārvades koeficienti regulējošās iedarbes kanālam $L_g \rightarrow C$ un perturbāciju iedarbes kanāliem $q \rightarrow C$ un $T \rightarrow C$. Šai nolūkā nelineāro funkciju $C = f(L_g, q, T)$ izvirza Teilora rindā parciālo atvasinājumu formā pie sākuma nosacījumiem $C=C_o$; $L_g=L_{go}$; $q=q_o$; $T=T_o$ un atmet augstāko kārtu nelineāros atlikumus. Tad iegūst linearizētu statistisko vienādojumu:

$$\Delta C = k_a \cdot \Delta L_g + k_q \Delta q + k_T \Delta T \quad (3)$$

kur

$$k_a = \frac{\partial C}{\partial L_g} = \frac{q_o}{k_1(h)k_2(T_o)k_3(\sigma_s, \lambda_{do})L_{go}^2} -$$

- regulējošās iedarbes kanāla pārvades koeficients, $(\text{g}/\text{m}^3)/(\text{m}^3/\text{h})$;

$$k_q = \frac{\partial C}{\partial q} = \frac{1}{k_1(h)k_2(T_o)k_3(\sigma_s \lambda_{do})L_{go}} \quad -$$

- galvenās perturbācijas- skābekļa patēriņa iedarbes kanāla pārvades koeficients, $(\text{g}/\text{m}^3)/(\text{g}/\text{h})$;

$$k_T = \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{0,02q_o}{k_1(h)k_2^2(T_o)k_3(\sigma_s \lambda_{do})L_{go}} - (0,3 - 0,005T_o)(1 + 0,05h) -$$

- notekūdeņu temperatūras iedarbes kanāla pārvades koeficients, $(\text{g}/\text{m}^3)/^\circ\text{C}$.

Regulējot gaisa padeves daudzumu L_g , visi pārvades koeficienti mainās. Tātad pārejas procesa laikā skābekļa koncentrācijas regulēšanas sistēmas parametri ir nestacionāri, kas apgrūtina tās analīzi. Šo problēmu var daļēji novērst, apskatot sistēmas darbību ierobežotā apgabalā, kurā var pieņemt, ka koeficienti k_a , k_q un k_T ir konstanti.

Skābekļa pārnese nestacionāro procesu aerācijas tilpnē (2.att.) sastāda, pieņemot, ka gaisa sadale pa visu aerācijas laukumu ir vienmērīga un izšķīdušā skābekļa koncentrācija aerācijas tilpumā ir izlīdzināta. Tad iegūst vienkāršotu skābekļa pārnese dinamiskās bilances vienādojumu pie sākuma nosacījumiem $t=0$, $C=C_o$, $q=q_o$, $L_g=L_{go}$:

$$T_a \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = k_a \Delta L_g, \quad (4)$$

kur

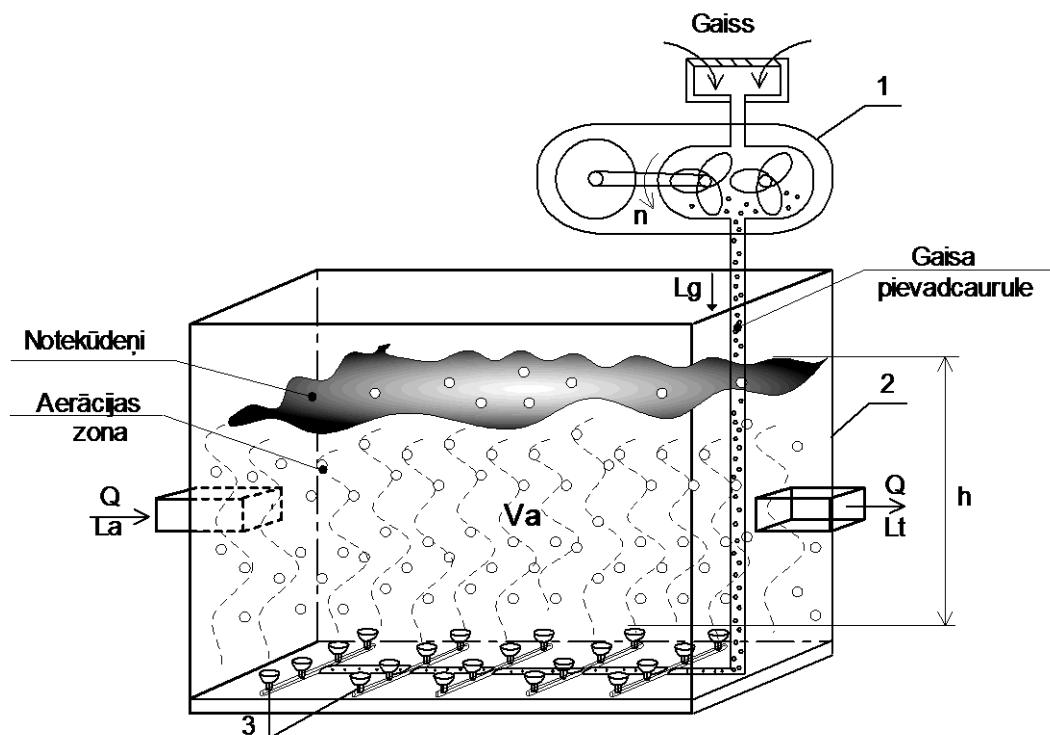
$$T_a = \frac{V_a}{k_1(h)k_2(T_o)k_3(\sigma_s \lambda_{do})L_{go}} \quad -$$

- aerācijas tilpnes laika konstante, kas raksturo pārejas procesa inerci, h;

$$k_a = \frac{q_o}{k_1(h)k_2(T_o)k_3(\sigma_s \lambda_{do})L_{go}^2} \quad -$$

- aerācijas tilpnes statistiskais pārvades koeficients, kas raksturo tās jutību pret regulējošo iedarbi ΔL_g , $(\text{g}/\text{m}^3)/(\text{m}^3/\text{h})$.

Pieņemot, ka attiecība $q_0/L_{g0} \approx \text{const}$, aerācijas tilpnes laika konstante T_a un statistiskais pārvades koeficients k_a mainās gaisa padeves daudzuma regulēšanas laikā. Palielinot gaisa padevi L_g uz aerācijas tilpni, T_a un k_a samazinās. Tas nozīmē, ka samazinās procesa inerce un regulēšanas objekta jutība pret regulējošo iedarbi. Jūtības samazināšanās izskaidrojama ar to, ka palielinot L_g samazinās skābekļa izmantošanas efektivitāte.



2.att. Notekūdeņu aerācijas tehnoloģiskā shēma: 1- gaisa pūtējs; 2- aerācijas tvertne; 3- gaisa difuzori; V_a -aerācijas tilpums, m^3 ; h -difuzoru iegremdēšanas dziļums, m ; Q - notekūdeņu pieplūde, m^3/h ; L_a - notekūdeņu BSP, g/m^3 ; L_t - paliekošais BSP, g/m^3 .

Skābekļa koncentrācijas regulēšanas sistēmas algoritmiskā struktūrshēma

Skābekļa koncentrācijas regulēšanas sistēmas modelī (3.att.) iekļauts proporcionāli – integrālais – diferenciālais (PID) regulators, kura algoritmiskā struktūrshēma sastādīta atbilstoši pārvades funkcijai:

$$W_{PID}(s) = \frac{k_p (T_i s + 1)(T_d s + 1)}{T_i s (T_f s + 1)}, \quad (5)$$

izmantojot “Simulink” bibliotēkas standartblokus, kur k_p – proporcionālās ķēdes pārvades koeficients;
 T_i - integrējošās ķēdes laika konstante, min;
 T_d – diferencējošās ķēdes laika konstante, min;
 T_f – filtru laika konstante, min;
 s – Laplasa operators.

Valējas sistēmas pārvades funkcija :

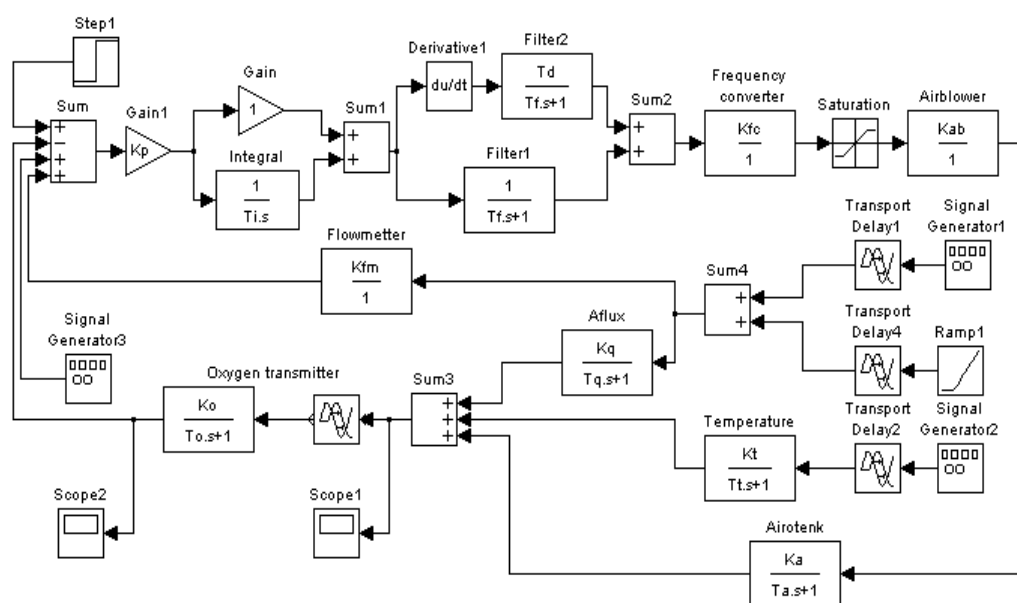
$$W(s) = \frac{k \cdot (T_i s + 1)(T_d s + 1)N(s)}{T_i s (T_f s + 1)(T_a s + 1)}, \quad (6)$$

kur $k = k_p \cdot k_f \cdot k_g \cdot k_a$ – valējas sistēmas pārvades koeficients, $(g/m^3)/V$
 k_f – frekvenču pārvēidotāja pārvades koeficients, Hz/V ;
 k_g – gaisa pūtēja pārvades koeficients, $m^3/min/Hz$;
 $N(s)$ – nelineārā posma (saturation) pārvades funkcija.

Atgriezeniskās saites pārvades funkcija:

$$W_{as}(s) = \frac{k_o \exp(-\tau \cdot s)}{(T_o \cdot s + 1)}, \quad (7)$$

kur k_o – skābekļa koncentrācijas mērpārvēidotāja pārvades koeficients, $V/(g/m^3)$;
 τ un T_o – skābekļa koncentrācijas mērpārvēidotāja transportkavējums un laika konstante, min.



3.att. Skābekļa koncentrācijas regulēšanas sistēmas algoritmiskā struktūrshēma

Slēgtas sistēmas pārvades funkcija:

$$\Phi(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s) \cdot W_{as}(s)},$$

$$\Phi(s) = \frac{k \cdot N(s) (T_i s + 1) (T_d s + 1) (T_o s + 1)}{T_i s (T_f s + 1) (T_a s + 1) (T_o s + 1) + k_o k \cdot \exp(-\tau s) N(s)}, \quad (8)$$

kas apraksta sistēmas galvenā kontūra darbību pie konstantām perturbācijām. Nelineārais posms “Saturation” tiek iekļauts algoritmiskajā struktūrshēmā, lai uzdotu frekvenču pārvēidotāja izejas frekvences izmaiņas robežas, piemēram, $f = 25 \pm 25$ Hz. Šī bloka pārvades funkcija $N(s)$ ir unificēta, tādēļ tā nav jāatsifrē.

Mainīgās perturbācijas Δq un ΔT , kas tieši iespaido izšķīdušā skābekļa koncentrāciju, formē ar signālu ģeneratoriem un padod uz aperiodiskiem inerciāliem posmiem, kas apraksta aerācijas tvertnes reakciju uz skābekļa koncentrācijas izmaiņu perturbāciju iespaidā:

$$W_{\Delta T \rightarrow \Delta C}(s) = \frac{k_t}{T_t s + 1}, \quad (9)$$

kur k_t – temperatūras iedarbes kanāla pārvades koeficients, $(g/m^3)/^\circ C$,
 T_t – temperatūras iedarbes laika konstante, min.

$$W_{\Delta q \rightarrow \Delta C}(s) = \frac{k_q}{T_q s + 1}, \quad (10)$$

kur k_q – skābekļa patēriņa iedarbes kanāla pārvades koeficients, $(q/m^3)/(g/min)$;
 T_q – skābekļa patēriņa iedarbes laika konstante, min.

Secinājumi

Veicot gaisa skābekļa izmantošanas efektivitātes raksturlīkņu regresijas analīzi, iegūta izteiksme skābekļa izmantošanas koeficienta aprēķināšanai atkarībā no notekūdeņu aerācijas iekārtas parametriem un gaisa padeves tehnoloģijas.

Sastādīti notekūdeņu aerācijas tvertnes vienādojumi statistiskam un nestacionāram režīmam, kas dod iespēju modelēt skābekļa pārneses procesu, mainot objekta parametrus, regulējošo iedarbi un galvenās perturbācijas.

Sastādīta notekūdeņu aerācijas procesa automātiskās regulēšanas sistēmas algoritmiskā struktūrshēma skābekļa koncentrācijas pārejas procesa modelēšanai un optimizācijai, izmantojot dinamisko sistēmu modelēšanas datorprogrammu “Simulink”. Ierobežotā apjoma dēļ nav parādīti modelēšanas piemēri. Ar tiem var iepazīties publikācijā [3].

Literatūra

1. Sniders A. The Expenditure of Electrical Energy for Communal sewage purification. Baltic Electrical Engineering review, Vilnius, Nr. 2(6), 1997. pp.29-32.
2. A.Šnīders. Notekūdeņu aerācijas iekārtu elektriskās piedziņas energoekonomika/ 3.Starptautiskās konferences “Vide. Tehnoloģija. Resursi” materiāli. – Rēzekne, Rēzeknes Augstskola, 19.-21.06.2001. 191.-197.lpp.
3. А.Шнидерс. Моделирование и энергоэкономное управление системой аэрации сточных вод / Труды 3-ей Международной научно практической конференции «Экология и сельскохозяйственная техника».- Санкт-Петербург, 05.-06.06.2002.- С.294-302.
4. S.E.Jorgensen. Fundamentals of Ecological Modelling (2nd Edition). – Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1994. – 663 p.
5. Fine Bubble Aeration. – I TT Flygt AB, 1998. – 7p.
6. A.Sniders, U.Skrastins. Identification of the Aeration Tank as the Object of Oxygen Transfer under Static Regime // Proceedings of the LUA/ Latvia University of Agriculture. 1995, Nr. 2(279). pp. 79-85.
7. A.Sniders. Static indices of Waste Water Pneumatic Aeration// Proceedings of the LUA/ Latvia University of Agriculture, 1997. (8). pp. 43-47.
8. Смирнов Д.Н. Автоматическое регулирование процессов очистки природных и сточных вод.- М.: Стройиздат, 1985.- 312с.
9. Carlos A. Smith, Armando B.Corripio. Principles and Practice of Automatic Process Control. – New York: John Willey & Sons, 1997.- 768p.
10. Гультяев А.К. Матлаб 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие.- Санкт-Петербург: Корона принт, 2001.- 400с.