



Latvijas Lauksaimniecības universitāte  
Tehniskā fakultāte  
Lauksaimniecības enerģētikas institūts

Mg.sc.ing., Mg.oec. **Aigars Laizāns**

## **Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas modelēšana un optimizācija**

### **Promocijas darbs**

Dr.sc.ing. zinātniskā grāda iegūšanai

Promocijas darba izstrādi līdzfinansējis  
Eiropas Savienības Sociālais fonds



Promocijas darba  
zinātniskais vadītājs:

Dr. habil. sc. ing., profesors  
**Andris Šnīders**

Promocijas darbu  
izstrādāja:

Mg.sc.ing., Mg.oec.  
**Aigars Laizāns**

Jelgava

2011

## ANOTĀCIJA

**Laizāns A. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas modelēšana un optimizācija: promocijas darbs lauksaimniecības inženierzinātņu doktora (Dr.inž.) zinātniskā grāda iegūšanai, Jelgava, LLU, 2011.** Kopējais darba apjoms 135 lpp, 18 tabula, 83 attēli. Promocijas darbā izmantoti 194 informācijas avoti, tai skaitā 171 informācijas avots svešvalodās.

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības enerģētikas institūtā no 2005. līdz 2011. gadam.

**Zinātniskā darba mērķis ir** teorētiski un eksperimentāli pamatot notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas kā nestacionāras sistēmas jutības un inerces rādītāju mainīgo dabu, un piedāvāt inovatīvu notekūdeņu aerācijas tehnoloģisko iekārtu elektropiedziņas automātiskās vadības principu, kas nodrošina to kvalitatīvu un energoekonomisku ekspluatāciju.

### **Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti un risināti šādi uzdevumi:**

- Veikt teorētiskos pētījumus par notekūdeņu apskābekļošanas kvalitāti ietekmējošiem ārējās vides faktoriem un notekūdeņu attīrīšanas ietaišu konstruktīvajiem un tehnoloģiskajiem parametriem;
- Pētījumu rezultātā izveidot skābekļa šķīdības ūdenī ietekmējošo faktoru komplekso iedarbi aprakstošu analītisku izteiksmi un simulatīvo modeli;
- Izveidot uzlabotu notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas automātiskās vadības modeli, kas ievērtē aerācijas procesa nestacionāro dinamisko dabu, nodrošinot konkrētai attīrīšanas sistēmai optimālus enerģētiskos, ekonomiskos un kvalitatīvos parametrus.

Darbs strukturēts 5 nodaļās:

1. nodaļā analizēti komunālo notekūdeņu bioķīmiskie procesi saistībā ar skābekļa patēriņu un apskābekļošanas inženiertehniskais nodrošinājums, formulēts darba mērķis, darba hipotēze un pētījumu objekts, noteikts pētījumu apjoms un saturs, dota pētījumu vispārējā metodika;
2. nodaļā analizētas notekūdeņu aerācijas enerģētiskās problēmas;
3. nodaļā veikts skābekļa pārneses matemātiskā modeļa pētījums, izveidojot inovatīvu skābekļa šķīdības modeli un skābekļa pārneses modeli ar mainīgiem jutības un inerces faktoriem mainīgu ārējo faktoru ietekmē;
4. nodaļā apkopoti notekūdeņu apskābekļošanas procesa eksperimentālie pētījumi un veikta to salīdzināšana ar dinamisko skābekļa pārneses modeli;
5. nodaļā apkopoti notekūdeņu attīrīšanas ietaišu automātiskās vadības modelēšanas rezultāti, kā arī ekonomiskās efektivitātes rādītāji, izmantojot dažādus vadības principus.

Pētījumu rezultātā ir apstiprinājusies sākotnēji izteiktā hipotēze, ka notekūdeņu aerācijas inženiersistēma ir nestacionārs dinamisks objekts ar mainīgiem jutības un inerces rādītājiem, un tās energopatēriņu un darba režīmus nosaka gan šīs inženiersistēmas galvenie tehniskie rādītāji, gan notekūdeņu kvalitatīvie rādītāji, gan ārējās vides parametri.

## ANNOTATION

Laizāns A. Simulation optimization of wastewater aeration engineering system: Ph.D. thesis in agriculture engineering sciences, Jelgava, LUA, 2011.

The paper contains 135 pp., 18 table, 83 pictures and 5 appendices. References in the paper – overall number 194, 171 of which are in foreign languages.

The doctoral thesis were designed in the Institute of Agriculture Energetics, Faculty of Engineering, Latvia University of Agriculture from September 2005 up to September 2011.

**The objective of the research is** to justify unstationary dynamic nature of inertia and sensitivity indicators of wastewater aeration engineering system, and to offer innovative control system for wastewater aeration technological system, which offers improved quality and efficiency of operations.

**The main tasks of the research are:**

- investigate impact of wastewater treatment system construction, technology used and influence of external factors on wastewater oxygenation quality;
- elaborate analytic equation and simulation model of oxygen solubility in wastewater taking in account complex influence of external and internal factors;
- develop innovative wastewater aeration engineering system automatic control system using unstationary dynamic inertia and sensitivity indicators of wastewater aerotank, assuring optimal energy consumption based on economic and quality requirements.

Doctoral thesis consist of 5 chapters:

Chapter 1 is devoted to anaysis of biochemical and technological processes of municipal wastewater treatment systems connected to oxygen consumption and aeration of wastewater, it describes the aim, object and hypothesis of the reserach, as well as the scope of investigation and tasks to be accomplished, and overall methodology.

Chapter 2 includes analysis of wastewater aeration power consumption patterns.

Chapter 3 presents analytical analysis and development of analytical and simulation model of oxygen transfer process including complex impact of unstationary dynamic inertia and sensitivity indicators of wastewater aerotank.

Chapter 4 offers insights in experimental research, and shows results of real life data and dynamic unstationary mathematical model comparison.

Chapter 5 provides economic and quality related results of different control systems simulations, and states the optimal control principle for wastewater aeration engineering system.

The research proves the initial hypothesis stating that wastewater aeration engineering system is unstationary dynamic object with variable inertia and sensitivity indicators, and its optimal operation quality and efficiency is based on adaptive control system.

# SATURS

Anotācija.....	2
Annotation .....	3
Informācija.....	6
Attēlu saraksts.....	8
Tabulu saraksts .....	11
Akronīmi, abreviatūras un to skaidrojumi .....	12
Ievads .....	13
1. Notekūdeņu aerācijas tehnoloģisko risinājumu problemātika.....	15
1.1. Notekūdeņu attīrīšanas problemātika.....	15
1.2. Notekūdeņu aerācijas nozīme notekūdeņu bioloģiskās attīrīšanas tehnoloģiskajā sistēmā .....	20
1.3. Bioķīmiskie procesi notekūdeņu aerācijas tvertnē un tos ietekmējošie faktori... ..	21
1.3.1. Aktīvo dūņu darbības efektivitātes nosacījumi.....	22
1.3.2. Skābekli patērējošie procesi notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs.....	26
1.4. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas tehnoloģiskās iekārtas un to vadības metodes .....	28
1.4.1. Atmosfēras gaisa sagatavošana un padeve uz aerācijas tvertni .....	31
1.4.2. Gaisa sadale un piegāde notekūdeņu aerācijas zonā.....	32
1.4.3. Aerācijas iekārtas vadības metodes ietekme uz skābekļa pārnesei .....	33
1.5. Ārējās vides faktoru ietekme uz skābekļa izmantošanas efektivitāti.....	38
1.6. Skābekļa pārnese procesu ietekmējošie faktori.....	39
1.6.1. Skābekļa koncentrācijas pievadītajā gāzu maisījumā ietekme .....	39
1.6.2. Ūdens temperatūras ietekme uz skābekļa šķīdību .....	40
1.6.3. Notekūdeņu sāļainības ietekme uz skābekļa šķīdību.....	40
1.6.4. Atmosfēras gaisa spiediena un temperatūras kompleksā ietekme .....	41
1.6.5. Notekūdeņu blīvuma ietekme uz skābekļa šķīdību.....	42
1.7. Turpmāko pētījumu pamatojums, struktūra un metodika.....	43
1.7.1. Pētījumu hipotēze, mērķi un uzdevumi .....	43
1.7.2. Darba tautsaimnieciskā nozīmība .....	44
2. Latvijas notekūdeņu attīrīšanas ietaišu darbības analīze .....	45
2.1. Notekūdeņu attīrīšanas ietaišu energopatēriņa datu statistiskā analīze .....	45
2.2. Aerācijas ietaišu energopatēriņa sezonālās izmaiņas izpēte .....	49
2.3. Notekūdeņu sastāva pētījumi .....	53
2. nodaļas kopsavilkums un secinājumi.....	55
3. Skābekļa pārnese procesu izpēte un modelēšana .....	57
3.1. Ūdens temperatūras ietekmes izpēte uz skābekļa šķīdību .....	57
3.2. Notekūdeņu sāļainības ietekmes izpēte .....	57
3.3. Atmosfēras gaisa spiediena ietekmes izpēte .....	58
3.4. Notekūdeņu blīvuma ietekmes izpēte .....	60
3.6. Skābekļa šķīdības matemātiskais modelis .....	60
3.7. Ārējo faktoru ietekmes uz skābekļa šķīdību novērtējums .....	61
3.8. Aerācijas iekārtas konstruktīvo parametru ietekme uz skābekļa izmantošanas efektivitāti .....	64
3.9. Aerācijas tvertnes skābekļa pārnesei statistiskā režīma matemātiskais modelis ....	66
3.10. Skābekļa pārnesei nestacionārais matemātiskais modelis.....	72
3.11. Skābekļa pārnesei nestacionārā un statistiskā modeļa salīdzinošie pētījumi .....	78
3. nodaļas kopsavilkums un secinājumi.....	81
4. Notekūdeņu apskābekļošanas eksperimentālie pētījumi.....	85

4.1. Eksperimenta objekta raksturojums .....	85
4.2. Eksperimentālo pētījumu apjoms un metodika.....	87
4.3. Eksperimentālo pētījumu datu apstrāde un iegūto rezultātu interpretācija.....	90
4.4. Nestacionārā modeļa un eksperimentālo pētījumu datu atbilstības pētījums .....	95
4.nodaļas kopsavilkums un secinājumi.....	98
5. Aerācijas kompresora elektropiedziņas vadības procesa optimizācija.....	100
5.1. Vadības algoritma pamatnostādnes un parametri optimiālai darbībai.....	100
5.2. Notekūdeņu aerācijas kompresora elektropiedziņas vadības algoritmu salīdzinājums.....	102
5.3. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas energoefektivitātes ekonomiskā analīze .....	114
5.3.1. Notekūdeņu aerācijas izdevumu struktūra.....	115
5.3.2. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas optimizācijas kritēriji .....	116
5.3.3. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas tehniski ekonomiskais modelis ....	116
5.nodaļas kopsavilkums un secinājumi.....	118
Secinājumi .....	121
Informācijas avoti .....	123
Pielikumi.....	136

## INFORMĀCIJA

**Darba izpilde:** Pētījumi veikti laika posmā no 2005.gada līdz šim brīdim Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības enerģētikas institūtā.

**Promocijas darba vadītājs:** Dr. habil. sc. ing., profesors Andris Šnīders.

**Zinātniskā darba aprobācija:** Dotajā laika posmā publicēti 7 zinātniskie raksti, no kuriem 7 atbilst vispāratzītiem recenzējamiem zinātniskiem rakstiem. Par rezultātiem ziņots 9 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kuras notika Latvijā, Lietuvā, Krievijā, ASV un Rumānijā.

**Pētījuma novitāte** apliecināta ar iegūto Latvijas Republikas patentu Nr.13998 (patenta publikācijas datums 20.11.2009) "Notekūdeņu aerācijas kvaziinvariantās vadības sistēma", izgudrotāji Aigars Laizāns, Andris Šnīders, Jānis Greivulis.

### Publikācijas vispāratzītos recenzējamos zinātniskos izdevumos:

1. Šnīders A., Laizāns A. Invariant Control of Wastewater aeration. **In:** Proceedings of 1<sup>st</sup> International Internet Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering CISSE – 05 (Computer, Information and System Sciences and Education) „*Advances in systems, computing sciences and software engineering*”, University of Bridgeport Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Springer Publ. 2005–2006, pp.99–103.
2. Šnīders A., Laizāns A. Main conditions of wastewater aeration unit design parameters. **In:** *Engineering for rural development*: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International scientific conference. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava 2006, pp.160–164.
3. Šnīders A., Laizāns A. Computer aided modelling of wastewater aeration systems, **In:** Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference “*Rural development*”, Book 2, Kaunas, November 8–10, 2007, pp. 227–231.
4. Šnīders A., Laizāns A. Oxygen transfer process simulation in wastewater aeration tank. **In:** *Engineering for rural development*: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International scientific conference. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava, 2007, pp.154–158.
5. Laizāns A., Šnīders A. Simulation of cost-efficient wastewater aeration control using invariant control principle. **In:** *INMATEH 2008 – I "AGRICULTURE AND ENGINEERING – complying with the European requirements"*, International scientific conference proceedings, January 28–29, 2008, Bucharest, Romania, pp. 183–188.
6. Шнидерс А.А., Лайзанс А.Д. Нестационарная модель переноса кислорода в аэротенке биологической очистки сточных вод. **В:** *Высокие Технологии, Фундаментальные и Прикладные Исследования, Образование*, Том 13, Сборник трудов, Под редакцией А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко, 5.Международная конференция "*Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности*", Ст.Петербург, Россия, Апрель 2008., pp. 384–386
7. Laizāns A., Osadčuks V., Šnīders A. System analysis of oxygen transfer in wastewater aeration tank. **In:** Proceedings of *INMATEH 2008 – II "Engineering And Management Of Sustainable Development In Agriculture, Transport And Food Industry"*, International scientific conference, July 18–19, 2008, Bucharest, Romania, pp. 132–137.

Par rezultātiem ziņots starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kuras notika Latvijā, Lietuvā Krievijā, ASV un Rumānijā.

1. Invariant Control of Wastewater aeration. 1<sup>st</sup> International Internet Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering CISSE – 05 (Computer, Information and System Sciences and Education): *Advances in systems, computing sciences and software engineering*, University of Bridgeport Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), USA, December 11–18, 2005.
2. Main conditions of wastewater aeration unit design parameters. 5<sup>th</sup> International scientific conference „*Engineering for rural development*”. Jelgava, May 18–19, 2006.
3. Impact of wastewater aeration process control techniques on the energy consumption. 13<sup>th</sup> International Scientific Conference: *Research for rural development*. LLU, Jelgava, May 19–22, 2006.
4. Notekūdeņu aerācijas invariantās vadības sistēma. Izstāde Latvijas reģionu sasniegumu pārskatam un attīstībai: "*Reģionālā attīstība Latvijā 2006*". Posters Ķīpsalas izstāžu centrā 20.–22.aprīlī, Rīga, 2006.
5. Computer aided modelling of wastewater aeration systems. 3<sup>rd</sup> International Conference: *Rural development*, Kaunas, November 8–10, 2007.
6. Oxygen transfer process simulation in wastewater aeration tank. 6<sup>th</sup> International scientific conference: *Engineering for rural development*. LLU, Jelgava, 2007.
7. Нестационарная модель переноса кислорода в аэротенке биологической очистки сточных вод. 5.Международная конференция: *Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности*, Ст.Петербург, Россия, Апрель 2008.
8. System analysis of oxygen transfer in wastewater aeration tank. International scientific conference INMATEH 2008 – II: *Engineering And Management Of Sustainable Development In Agriculture, Transport And Food Industry*, July 18–19, 2008, Bucharest, Romania.
9. Round-table discussion. Wastewater treatment – experience and trends. 4<sup>th</sup> International Water Association's International Young Water Professionals Conference. Conference held at the Clark Kerr Campus Conference Center of the University of California at Berkeley, USA, from July 16 to July 18, 2008.

Darbs akceptēts LLU Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības enerģētikas institūta paplašinātā akadēmiskā personāla sēdē 2011.gada 15.martā., protokols Nr. 8.

## ATTĒLU SARAKSTS

1.1.att. Notekūdeņu topoloģija.....	16
1.2.att. Notekūdeņu attīrīšanas vispārējā shēma.....	17
1.3.att. Bioloģiskās attīrīšanas procesa norise .....	18
1.4.att. Oksidējošā slāņa izveide aerācijas tvertnē.....	21
1.5.att. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmu ietekmējošie faktori.....	29
1.6.att. Aerācijas kompresora vadības topoloģija.....	34
1.7.att. Atvērtās notekūdeņu aerācijas vadības sistēmas bez atgriezeniskās saites blokshēma.....	35
1.8.att. Notekūdeņu aerācijas vadības sistēmas ar atgriezenisko saiti no aerācijas tvertnes, tiešo piedziņu un divpozīciju vadību blokshēma.....	36
1.9.att. Notekūdeņu aerācijas vadības sistēmas ar atgriezenisko saiti no aerācijas tvertnes, PID vadības bloku un frekvenču pārveidotāju blokshēma .....	37
1.10.att. Notekūdeņu aerācijas kvaziinvariantās sistēmas blokshēma (Laizāns, Šnīders, Greivulis, 2009).....	37
1.11.att. Skābekļa koncentrācijas izmaiņas atmosfērā (pēc BIO2 International, s.a.)... 39	
2.1.att. Latvijas NAI īpatnējais enerģijas patēriņš pa mēnešiem.....	45
2.2.att. Gada vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš Latvijas NAI.....	47
2.3.att. Gulbenes NAI notekūdeņu apjoma izmaiņas, pa gadiem.....	48
2.4.att. Īpatnējais elektroenerģijas patēriņš Gulbenes NAI, pa gadiem.....	48
2.5.att. Gulbenes NAI vidējā notekūdeņu apjoma izmaiņas.....	49
2.6.att. Gulbenes NAI vidējā notekūdeņu apjoma izmaiņas pa mēnešiem, $m^3 \cdot d^{-1}$ .....	50
2.7.att. Furjē analīzes rezultāti Gulbenes NAI notekūdeņu apjoma izmaiņām.....	50
2.8.att. Gulbenes NAI vidējais enerģijas patēriņš $kWh \cdot m^{-3}$ , pa mēnešiem.....	51
2.9.att. Furjē analīzes rezultāti Gulbenes NAI īpatnējā enerģijas patēriņa datiem.....	51
2.10.att. BSP <sub>5</sub> ieplūdē Jelgavas NAI 2009.gadā.....	53
2.11.att. KĶSP ieplūdē Jelgavas NAI 2009.gadā.....	54
3.1.att. Ūdens temperatūras ietekme uz izšķīdušā skābekļa koncentrāciju.....	57
3.2.att. Skābekļa piesātinājuma līmeņa atkarība no ūdenī izšķīdušo sāļu koncentrācijas un ūdens temperatūras.....	58
3.3.att. Skābekļa koncentrācijas ūdenī atkarība no atmosfēras gaisa spiediena un ūdens temperatūras.....	59
3.4.att. Bunzena koeficients $\alpha$ skābekļa šķīdībai ūdenī.....	59
3.5.att. Ūdens blīvuma atkarība no ūdens temperatūras.....	60
3.6.att. Skābekļa šķīdības virtuālais modelis.....	61
3.7.att. Skābekļa šķīdības modelēšanas rezultāti.....	63
3.8.att. Gaisa skābekļa izmantošanas koeficienta $\eta$ atkarība $h$ , $\sigma$ un $\lambda$ .....	65
3.9.att. Skābekļa izmantošanas efektivitāte, iegremdējot difuzoru 4 m un 6 m dziļumā, pie dažādiem $\sigma$ un $\lambda$ .....	65
3.10.att. Aerācijas tvertnes vienkāršotā shēma.....	66
3.11.att. Aerācijas tvertnes shēma ar perturbācijām.....	66
3.12.att. Pilnveidotā aerācijas tvertnes funkcionālā shēma ar perturbācijām.....	67
3.13.att. Aerācijas tvertnes statisko koeficientu aprēķina blokshēma.....	69
3.14.att. Aerācijas tvertnes simulācijas modelis – subsistēma „Calcultion subsystem”, inerces un jutības rādītāju aprēķināšanai nepārtrauktā režīmā... 70	
3.15.att. Skābekļa koncentrācijas $C$ atkarība no slodzes $q$ pie dažādas aerācijas intensitātes $L_g$ .....	71



3.16.att. Skābekļa koncentrācijas $C$ atkarība no aerācijas intensitātes $L_g$ , $C=f(L_g)$ , pie dažādas slodzes $q$ .....	72
3.17.att. Aerācijas tilpnes jutības faktora $K_a$ izmaiņas atkarībā no aerācijas intensitātes $L_g$ , $K_a=f(L_g)$ , pie dažādas perturbācijas $q$ intensitātes.....	73
3.18.att. Aerācijas tilpnes inerces faktora $T_a$ izmaiņas atkarībā no aerācijas intensitātes $L_g$ , $T_a=f(L_g)$ .....	73
3.19.att. Slodzes inerces faktora $T_q$ izmaiņas atkarībā no slodzes $q$ , $T_q=f(q)$ .....	75
3.20.att. Slodzes jutības faktora $K_q$ izmaiņas atkarībā no aerācijas intensitātes $L_g$ , $K_q=f(L_g)$ .....	76
3.21.att. Pārvades funkcija $W_a(s)$ ar nestacionāriem inerces un jutības faktoriem .....	77
3.22.att. Subbloks ar statistiskiem inerces un jutības faktoriem „Subsystem” .....	79
3.23.att. Simulācijas modelis nestacionārā un statistiskā modeļa salīdzinošajam pētījumam .....	79
3.24.att. Salīdzinošā pētījuma rezultāti, aerācijas kompresora ražīguma samazinājums $\Delta L_g = -10\%$ modelēšanas 350.min. ....	80
3.25.att. Salīdzinošā pētījuma rezultāti, piesārņojuma perturbācijas $q$ samazinājums $-10\%$ modelēšanas 350.min.....	81
4.1. att. Preiļu notekūdeņu attīrīšanas iekārtu vispārīgā shēma .....	85
4.2.att. Kopējais apstrādāto notekūdeņu apjoms Preiļu NAI , 2005. – 2009.g.....	87
4.3.att. Elektroenerģijas patēriņš Preiļu NAI , 2005. – 2009.g. ....	87
4.4.att. 1.grupas mērījumu vidējie rādītāji un tos aprakstošā eksponente .....	89
4.5.att. 2.grupas mērījumu vidējie rādītāji un tos aprakstošā eksponente. ....	90
4.6.att. Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas dinamika Preiļu NAI aerācijas tvertnē, 2007.g. ....	91
4.7.att. Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas dinamika Preiļu NAI aerācijas tvertnē, 2008.g. ....	91
4.8.att. Izšķīdušā skābekļa eksperimentālie dati (“Ieslēgts” režīmā).....	92
4.9.att. Izšķīdušā skābekļa eksperimentālie dati (“Izslēgts” režīmā).....	92
4.10.att. 1.grupas mērījumu dati un tendenci aprakstošā eksponente, 2007.g. dati.....	93
4.11.att. 2.grupas mērījumu dati un tendenci aprakstošā eksponente, 2007.g. dati.....	94
4.12.att. Preiļu NAI eksperimenta dati un regresijas līkne (2008.g.datī) .....	95
4.13.att. Subbloks eksperimentālo datu izmantošanai modelī.....	96
4.14.att. Simulācijas modeļa un eksperimentālo datu salīdzināšanas blokshēma .....	96
4.15.att. Nestacionārā modeļa un eksperimentālo datu validitātes modelēšanas rezultāti un korelatīvā analīze. ....	97
5.1.att. Aerācijas kompresora darba grafiks Jelgavas NAI un izšķīdušā skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē, 2009.gada martā .....	100
5.2.att. Aerācijas kompresora iekārtas blokshēma.....	101
5.3.att. Piesārņojuma diennakts svārstību modelēšanas subbloks .....	103
5.4.att. Piesārņojuma $q$ izmaiņu grafiks aerācijas tvertnes simulācijas modelim (modelēšanas laiks $t=1440$ min).....	104
5.5.att. Nepārtrauktas aerācijas kompresora darbības režīma simulācijas blokshēma.....	105
5.6.att. Nepārtrauktas aerācijas kompresora darbības režīma simulācijas rezultāti.....	105
5.7.att. Simulācijas rezultāti divu aerācijas kompresora sistēmai.....	106
5.8.att. Simulācijas blokshēma divu aerācijas kompresoru sistēmai .....	106
5.9.att. Simulācijas rezultāti divu aerācijas kompresora sistēmai.....	107
5.10.att. NAI aerācijas kompresoru divpozīciju vadības modelis .....	108
5.11.att. Inerces un jutības rādītāju izmaiņas divpozīciju vadības sistēmai .....	108
5.12.att. Simulācijas rezultāti, lietojot PID vadību .....	109

5.13.att. NAI aerācijas kompresoru vadības modelis, lietojot PID vadību.....	110
5.14.att. NAI aerācijas kompresoru vadības modelis, lietojot PID vadību ar izmainītiem koeficientiem .....	110
5.15.att. Inerces un jutības rādītāju izmaiņas, lietojot PID vadības sistēmu.....	111
5.16.att. Kvaziinvariances vadības signālu formējošā moduļa blokshēma.....	112
5.17.att. NAI aerācijas kompresoru vadības modelis, lietojot kombinēto PID/kvaziinvariances vadību.....	113
5.18.att. Simulācijas rezultāti, lietojot PID/kvaziinvariances vadību .....	113
5.19.att. Inerces un jutības rādītāju izmaiņas, lietojot PID/kvaziinvariances vadību.....	114
5.20.att. NAI izdevumu struktūras bilance ASV, 2003.g. (Carns, 2003) .....	115
5.21.att. NAI izmaksu bilances ekstrapolācija Latvijas apstākļiem, 2009.gads .....	115
5.22.att. Aerācijas kompresoru ekonomiskās efektivitātes aprēķinu simulācijas bloks, lietojot trīs dažādus elektroenerģijas tarifus .....	117
2.pielikums	
1.att. Augšējās rotācijas aeratori (Paddlewheel aerator) (Wyban, 1989).....	138
2.att. Strūklakas tipa aeratori (Beckermills, 2008) .....	139
3.att. Mehāniskie rotācijas aspiratori (AAS, 1989) .....	139
4.att. Divu rotoru Rūtsa tipa gaisa kompresora darbības principiālā shēma (SuperchargersOnline, 2002).....	140
5.att. Membrānas un keramiskie diska difuzori (USEPA 1999).....	140
6.att. Membrānas tipa difuzora darbība ((USEPA 1999).....	141
7.att. Difuzoru tīkls aerācijas tvertnē (Environmental Dynamics) .....	141
6.pielikums	
1.att. Preiļu NAI aerācijas tvertne.....	145
2.att. Preiļu NAI aerācijas kompresori (pirms rekonstrukcijas, 2006.gads).....	145
3.att. Pēc rekonstrukcijas uzstādītais Aerzen Inc. aerācijas kompresors Preiļu NAI, kopskats (2010.gads).....	146
4.att. Aerzen Inc. aerācijas kompresora piedziņa – ķīļsiksnu pārvads (2010.gads).....	146
5.att. Aerzen Inc. aerācijas kompresora piedziņa – aerācijas kompresors(2010.gads).....	147
6.att. Danfos VLT Aqua Drive vadības bloks ar frekvenču pārveidotāju (2010.gads) .....	147

## TABULU SARAKSTS

1.1.tabula	Šķīšanas konstantes $K_i$ vērtības izplatītāko sāļu joniem, un to koncentrācijas $c_i$ diapazons notekūdeņos	41
2.1.tabula	NAI īpatnējā enerģijas patēriņa divfaktoru dispersijas analīzes rezultāti	46
2.2.tabula	NAI īpatnējā energopatēriņa datu korelatīvā analīze, ( $p=0.05$ )	46
2.3.tabula	Gulbenes NAI īpatnējā enerģijas patēriņa divfaktoru dispersijas analīzes rezultāti	48
2.4.tabula	Gulbenes NAI notekūdeņu apjoma divfaktoru dispersijas analīzes rezultāti	49
2.5.tabula	Latvijas nokrišņu apjoma divfaktoru dispersijas analīzes rezultāti, 2003.–2009.gads	52
2.6.tabula	Latvijas vidējo mēneša temperatūru divfaktoru dispersijas analīzes rezultāti, 2003.–2009.gads	52
2.7.tabula	Nokrišņu daudzuma, vidējo mēneša temperatūru, notekūdeņu apjomu un īpatnējā enerģijas patēriņa datu korelatīvā analīze, Gulbenes NAI, ( $p=0.05$ )	53
2.8.tabula	Jelgavas NAI piesārņojuma datu korelatīvā analīze, 2009.gads	54
3.1.tabula	Skābekļa šķīdības modelēšanas rezultāti	63
4.1.tabula	Preiļu notekūdeņu salīdzinājums ar sadzīves notekūdeņu vidējiem rādītājiem Latvijā, 2009.gads	85
4.2.tabula	Eksperimentālo datu korelāciju analīze – mērījumu $R^2$ vērtības 1.grupai	88
4.3.tabula	Eksperimentālo datu korelāciju analīze – mērījumu $R^2$ vērtības 2.grupai	89
4.4.tabula	Eksperimentālo datu korelāciju analīze – mērījumu $R^2$ vērtības “Ieslēgts” režīmam	93
4.5.tabula	Eksperimentālo datu korelāciju analīze – mērījumu $R^2$ vērtības “Izslēgts” režīmam	93
5.1.tabula	Automātiskās vadības ierīču koeficienti pēc Ciglera–Nikolsa metodes	102
5.2.tabula	Kvaziinvariantās vadības bloku koeficienti	112
5.3.tabula	Tehniski ekonomiskās modelēšanas rezultāti	117

## AKRONĪMI, ABREVIATŪRAS UN TO SKAIDROJUMI

~	aptuveni	mol	mols
ANOVA	dispersijas analīzes metode	N	slāpekļis
att.	attēls	NA	<i>not available</i>
ASV	Amerikas Savienotās Valstis	NAI	notekūdeņu attīrīšanas ietaise
BOD	Biological Oxygen Demand	NAIS	notekūdeņu aerācijas inženiersistēma
BSP	bioķīmiskais skābekļa patēriņš	ND	nav datu
¢	ASV centi	n.p.k.	numurs pēc kārtas
C	ogleklis	NOM	nomināls
Cl	hlors	Nr.	Numurs
crit	kritiskā vērtība	O	skābeklis
COD	Chemical Oxygen Demand	OECD	<i>Organisation of Economic Cooperation and Development</i>
CP	<i>Ceteris Paribus</i> (lat.) – visi citi parametri konstanti	P	fosfors
CSP	Centrālā Statistikas pārvalde	p.a.	<i>per annum</i> (gadā)
d	diena	PID	Proporcionāli–Integrāli–Diferenciālais regulators
exp	eksponente	rms	<i>Root–mean–square</i> (vidējā kvadrātiskā vērtība)
EM	Ekonomikas ministrija	ppm	<i>part per million</i>
ES	Eiropas Savienība	ROIC	<i>Return on invested capital</i> – investētā kapitāla atdeve
FM	Finanšu ministrija	pH	vides skābuma rādītājs
g.	gads	s	sekunde
g	grams	s.a.	sine anno
gab	gabali	SD	<i>Standard Deviation</i> - standartnovirze
h	stunda	Sig.	<i>Significance</i>
H	ūdeņradis	Simulink	modelēšanas programpakete
Hz	hercs	SPSS	<i>Statistical Package for Social Sciences</i>
kPa	kilopaskāls	SPRK	Sabiedrisko Pakalpojumu Regulēšanas komiteja
krit	kritiskais	SS	<i>Suspended Solids</i>
KSD	kopējās suspendētās daļiņas	SV	Suspendētās vielas
kWh	kilovatstunda	tūkst.	tūkstoši
ĶSP	ķīmiskais skābekļa patēriņš	UNDP	<i>United Nations Development Program</i>
l	litrs	USD	ASV dolārs
LLU	Latvijas Lauksaimniecības universitāte	WWAES	<i>Wastewater Aeration Engineering System</i>
LVL	Latvijas valsts lati	WWTS	<i>Wastewater Treatment System</i>
m	metrs		
M	mean – vidējā vērtība		
MAX	maksimums		
Matlab	matemātiskās modelēšanas programma		
mg	miligramms		
milj.	miljoni		
min.	minūte		
MIN	minimums		
mm	milimetrs		
MK	Ministru kabinets		

## IEVADS

Latvijas iestāšanās ES nozīmē ne tikai ekonomisko un politisko aliansi, bet arī pievienošanās noteiktiem normatīviem aktiem. Apkārtējās vides aizsardzība, tajā skaitā atkritumu pārstrāde, notekūdeņu savākšana un attīrīšana, un efektīva enerģijas izmantošana ir vienas no galvenajām ES prioritātēm – to nosaka direktīvas „Notekūdeņu attīrīšana” 91/271/EEC (EEC, 1991), 98/15/EEC (EEC, 1998), „Enerģijas efektīva izmantošana” 2006/32/EC (ECD, 2006) un to papildinājumi. Līdz ar to Latvijai kļūva saistošas ES direktīvas, tai skaitā arī Padomes Direktīva 91/271/EEC par pilsētu notekūdeņu attīrīšanu (direktīvas prasības ir iekļautas LR Ministru kabineta 2002.gada 22.janvāra noteikumos Nr. 34 „Noteikumi par piesārņojošo vielu emisiju ūdenī”) (LR MK Noteikumi, 2007; LR Ekonomikas ministrija; ).

Direktīva izvirza prasību noteiktos termiņos nodrošināt apdzīvoto vietu komunālo notekūdeņu savākšanu un atbilstošu kvalitatīvu attīrīšanu, vienlaicīgi pieprasot ekonomiski izmantot energoresursus. Prasības pilnībā ir jāievieš līdz 2015.gada beigām, un to izpildei Latvija ir izstrādājusi Direktīvas ieviešanas plānu (LR Vides ministrija; LR MK, 2004).

Arī valsts mērķprogramma “Ūdenssaimniecības infrastruktūras attīstība apdzīvotās vietās ar iedzīvotāju skaitu līdz 2000” (LR Vides ministrija, 2006) paredzēja līdz 2010.gadam veikt Latvijas apdzīvoto vietu ūdeņu attīrīšanas ietaišu renovāciju un to sakārtošanu atbilstoši ES standartiem. Vides novērtējums un ekoloģiskā drošība ir arī Latvijas valsts Nacionālā attīstības plāna 2007.–2013.gadam sastāvdaļa (LRNAP).

Tajā pašā laikā tikai nedaudz vairāk par 10% no 1100 valstī apzināto notekūdeņu attīrīšanas iekārtu izmantotā tehnoloģija atbilst vides aizsardzības prasībām. Sevišķi kritiska situācija ir apdzīvotās vietās, kur iedzīvotāju skaits ir mazāks par 2000, turklāt šīm pašvaldībām ir ierobežoti finanšu resursi, lai attīstītos, t.sk., lai attīstītu ūdenssaimniecības pakalpojumus (LR Vides ministrija).

Pētījumi rāda, ka notekūdeņu apstrādei un attīrīšanai tiek patērēti ievērojami energoresursi (ASV šim mērķiem tērē 1,5% no visas valstī saražotās elektroenerģijas – 2004.gadā tas sastādīja 60 miljardus kWh (PG&E, 2003; Carns 2005)). Salīdzinājumam – tik pat daudz enerģijas tiek tērēts dzeramā ūdens sagatavošanai un piegādei (WETTA, 2008). Līdz ar to NAI darbības optimizācija kļūst ne tikai par tehnisku, bet arī par ekonomisku jautājumu.

Mūsdienīgas NAI darbība balstās galvenokārt uz bioloģiskās attīrīšanas procesu, un tās vadībai jānodrošina bioloģiskās vides darbība nepārtrauktā režīmā mainīgas vides apstākļos, jo mainās gan pieplūstošo notekūdeņu kvalitatīvie un kvantitatīvie rādītāji, gan apkārtējās vides apstākļi (vides temperatūra, atmosfēras spiediens un sastāvs), gan arī notiek notekūdeņu kvalitatīvās izmaiņas attīrīšanās procesā (Fattal, 2004).

Notekūdeņu aerācijas inženiersistēma (NAIS) ir būtiska un sarežģīta bioloģiskās NAI sastāvdaļa. Tā nodrošina nepārtrauktu un pietiekamu gaisa skābekļa padevi uz notekūdeņu aerācijas tvertnēm bioloģiskajās notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs (NAI), kas nepieciešams attīrošo mikroorganismu dzīvības funkciju un aktivitātes nodrošināšanai.

NAIS galvenā sastāvdaļa ir gaisa padeves iekārta ar gaisa kompresoriem, kurus darbina jaudīgi elektrodzinēji, un notekūdeņu aerācijas tvertne (aerotenks) ar aerācijas difuzoriem gaisa vienmērīgai sadalei notekūdeņos. NAIS patērē vislielāko daļu (40–80% atkarībā no valsts ģeogrāfiskā stāvokļa un pielietotās notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģijas) no kopējās notekūdeņu attīrīšanas iekārtas enerģijas bilances (PG&E, 2003; Reardon, 1995; Šnīders, 2004; Wang 2007), un sakarā ar šobrīd notiekošo un arī tuvākajā nākotnē prognozēto būtisko energoresursu sadārdzināšanos – līdz pat 40% no šībrīža cenām, (LETA, s.a.) kļūst par svarīgu izdevumu sastāvdaļu pašvaldību budžetā.

NAIS elektropiedziņas optimāla vadība ir ļoti būtiska, lai tiktu iegūts optimālais tehniski ekonomiskais risinājums, tajā pašā laikā optimālas vadības izveidei nepieciešams kvalitatīvs un reāliem procesiem pietiekošā mērā atbilstošs matemātiskais modelis.

Līdz ar to notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas matemātiskā modeļa izveide un NAIS vadības tehniski ekonomiskā optimizācija un ieviešana notekūdeņu attīrīšanas sistēmās Latvijā ļautu ievērojami uzlabot notekūdeņu attīrīšanas efektivitāti un kvalitāti, un nodrošināt ES prasībām atbilstošus attīrīšanas kvalitātes un enerģijas patēriņa rādītājus.

Saistībā ar to tika izvēlēta promocijas darba tēma: „Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas modelēšana un optimizācija”, kā galveno mērķi izvirzot paaugstinātu notekūdeņu aerācijas procesa kvalitāti un energoefektivitāti.

Promocijas darbā apskatīti un analizēti līdzšinējie pētījumi par notekūdeņu aerācijas tehniskajiem risinājumiem, to parametru un darba režīmu izvēli un pamatojumu, kā arī par tehnisko un ekonomisko parametru savstarpējo sasaisti. Vadoties no šī apskata, pieņemta tālāk veicamo pētījumu nostādne, noskaidroti neskaidrie tālāk pētāmie jautājumi un uzdevumi, izvirzīta pētījumu programma un metodika, noteikts pētījumu apjoms.

Promocijas darbā ir veikti ražošanas, eksperimentālie un teorētiskie pētījumi, izmantota datu statistiskā apstrāde un matemātiskā un datormodelēšana. Galvenā vērība veltīta notekūdeņu aerācijas kvalitātes un energoefektivitātes pētījumiem, to noteicošajiem faktoriem, un risinājumiem aerācijas kvalitātes uzlabošanai gan esošajās gan jaunbūvējamajās notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs.

# 1. NOTEKŪDEŅU AERĀCIJAS TEHNOLOĢISKO RISINĀJUMU PROBLEMĀTIKA

Līdz ar ekonomisko un ģeopolitisko attīstību mainās arī pasaules iedzīvotāju dzīves veids. Arvien vairāk pieaug iedzīvotāju koncentrācija pilsētās (tiek prognozēts, ka ap 2015.gadu 88% no prognozētā iedzīvotāju skaita palielinājums notiks pilsētās (UNDP, 2010)). Tas nozīmē arī ūdens izmantošanas palielinājumu urbanizētajā vidē, kuram parasti seko notekūdeņu apjoma pieaugums (Borchardt, Statzner, 1990). Valstu pārstāvju un vadītāju sapulcēs ir pieņemti lēmumi par būtisku atbalstu apdzīvotām vietām ar ūdens un notekūdeņu pārstrādes problēmām, līdz 2015.gadam samazinot šādu vietu skaitu par 50% (WHO and UNICEF, 2000).

Tajā pašā laikā kopējie ieguldījumi šo problēmu risināšanā ir nepietiekami – pieaug reģionu skaits ar nepietiekošu ūdens apgādi un notekūdeņu attīrīšanu, zūd stabila ūdens resursu bāze, tikai 15..25% no piesārņotiem ūdeņiem tiek atgriezti atkārtotai izmantošanai (Scott, Faruqui, Rashid, 2004). Ļoti strauji aug riski no neattīrītu notekūdeņu izmantošanas, jo palielinās to koncentrācija un izplatība (Mitchell, 2007; USEPA/USAID, 1992; EC, 1996; WWF, 2003; Environment Canada, 1996; Environment Canada, 2002; IPCC, 2001). Latvijā pieejamā informācija par notekūdeņu apjomiem rāda to, ka cilvēka darbības rezultātā radīto atkritumu apjoms uz vienu iedzīvotāju atkal sāk pieaugt, kaut arī iedzīvotāju skaits un arī ekonomiskā aktivitāte krīzes ietekmē valstī samazinās. Kā liecina statistikas dati, 2008. gadā Latvijā kopumā radīti 265 milj. m<sup>3</sup> notekūdeņu (LVĢMA, 2006<sup>b</sup>).

## 1.1. Notekūdeņu attīrīšanas problemātika

Notekūdeņu attīrīšanas īstermiņa un vidējā termiņa, kā arī ilgtermiņa stratēģiju un taktisko vadības plānu izstrādei tiek pievērsta būtiska uzmanība (Scott, 2004). Būtiska loma šajos plānos ir atbilstošas notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģijas izveidei, tomēr ir svarīgi savstarpēji vienoties par notekūdeņu kā fizikāla objekta un parādības jēdzienu (Van der Hoek, 2004). Notekūdeņu definīcijas ir devuši daudzi pētnieki (Metcalf and Eddy, 1995; Westcot, 1997; Asiano, Levin, 1998; Martijn, Huibers, 2001). To galvenā vērtība ir centieni nodalīt jebkurus citus netīrus ūdeņus no cilvēka darbības rezultātā radītiem notekūdeņiem.

Grafiski notekūdeņu topoloģija pēc notekūdeņu avotiem atspoguļota 1.1.attēlā (Van der Hoek, 2004; Tilgalis, 2004). Tajā kā galvenie notekūdeņu avoti parādīti privātpersonu un privātmāju tieši radītie piesārņotie ūdeņi no sanitārajiem mezgliem (t.s. „melns” ūdens – ar augstu bioloģisko piesārņojumu, un t.s. „pelēkais” ūdens – ar vidēji zemu bioloģisko piesārņojumu un vidēju ķīmisko piesārņojumu), kuri kopā ar līdzīgiem uzņēmumu un iestāžu notekūdeņiem veido municipālos notekūdeņus (Chambers, et al., 1997; Chen, Yu, Ongley, 2006; Ciner, Sarioglu, 2006; Droste, 1997).

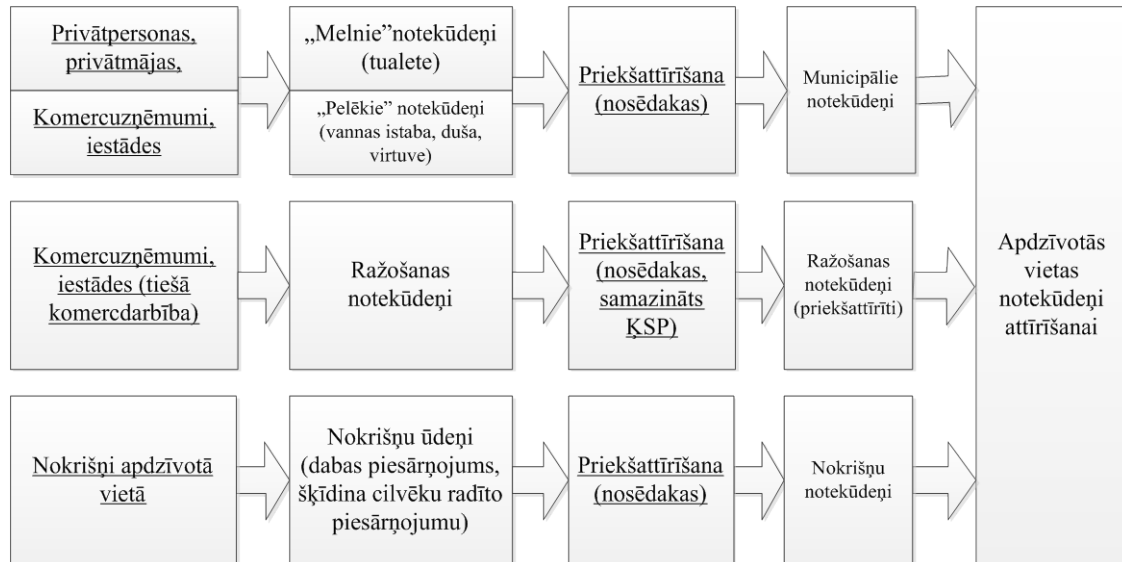
Latvijas valsts sistēmā tiek pieņemta sekojoša notekūdeņu definīcija (LVĢMA 2006<sup>a</sup>):

Notekūdeņi ir ūdeņi, kas cilvēka darbības dēļ mainījuši savas sākotnējās fizikālās, ķīmiskās vai bioloģiskās īpašības, to skaitā: sadzīves, lietus, ražošanas un komunālie notekūdeņi.

Ražošanas un pakalpojumu uzņēmumu tiešās darbības rezultātā rodas industriālie notekūdeņi, kuriem pirms to ievadīšanas kopējā attīrīšanas sistēmā jāveic pirmapstrāde, mazinot to koncentrāciju un atdalot attīrīšanas sistēmas darbībai kaitīgos vai nepārstrādājamus piemaisījumus (eļļas, ķīmiski savienojumi, kas kaitīgi

bioloģiskajai attīrīšanas videi, organiskie šķīdinātāji, paaugstinātas sārmainības vai skābuma avoti, u.c.) (CEE, s.a.; CIESE, 2008; Droste, 1997).

Priemocijas darbā galvenā vērība pievērsta municipālajiem notekūdeņiem, neņemot vērā paaugstinātas intensitātes nokrišņu rezultātā radušos netīru ūdeņu ietekmi uz NAI darbību, kā arī apskatīti Latvijai raksturīgie saldūdens notekūdeņi.



**1.1.att. Notekūdeņu topoloģija**

Latvijā vēsturiski izveidojusies situācija, ka lielākajā daļā apdzīvoto vietu notekūdeņu sistēmas ir apvienotās sistēmas, kurās neveic nokrišņu notekūdeņu atdalīšanu. Turklāt gandrīz visās industriālajās ražotnēs, kuras ir saglabājušās no pagājušā gadsimta, vai nu vispār nav vai ir ļoti vienkāršotas industriālo notekūdeņu priekšattīrīšanas ietaises. Līdz ar to, projektējot jaunas notekūdeņu attīrīšanas ietaises, īpaši liela vērība jāpievērš visu šo notekūdeņu avotu mijiedarbībai, kas savukārt ir ļoti dažāda katrā apdzīvotā vietā, tādējādi prasot pilnīgi individuālus projektēšanas risinājumus (Environment Canada 2002; Haimi, s.a.; Harremoes, 1988; Howard, et al., 2004; Hultman, Löwén, 2003; Lijklema, Tuson, Lesouf, 1993).

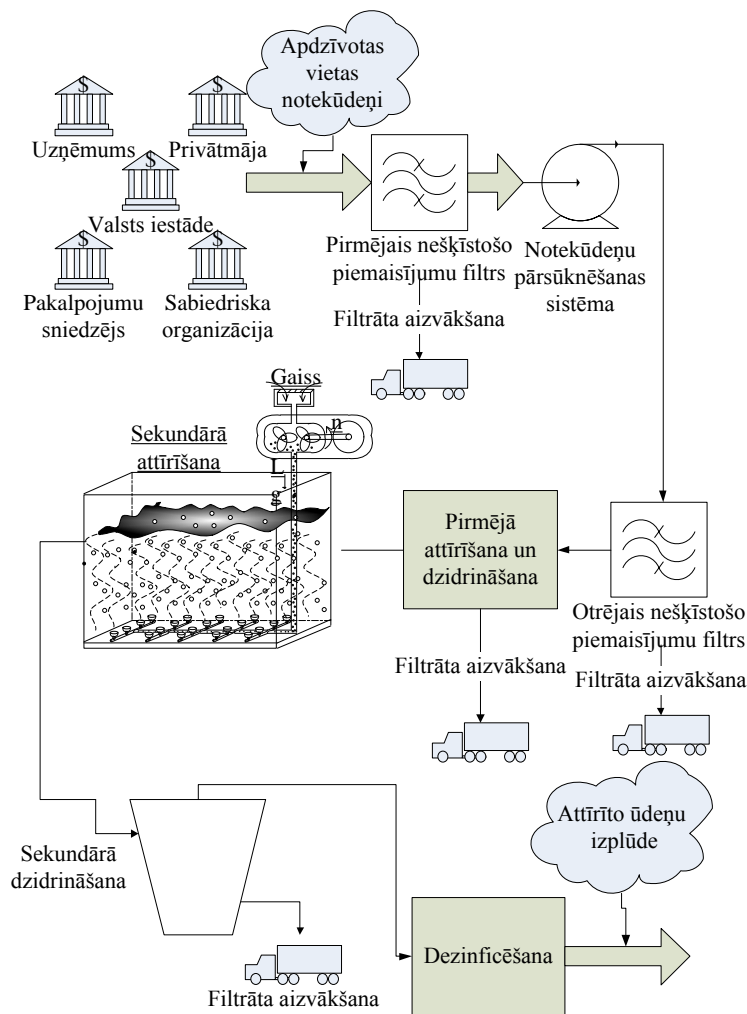
Lai noteiktu notekūdeņu piesārņotības pakāpi, ir izveidots noteikts raksturīgo īpašību komplekss. Novērtējot katra lieluma vērtību, iespējams novērtēt piesārņotības pakāpi un lielā mērā arī notekūdeņu izcelsmi. Latvijas likumdošana nosaka faktorus, kurus nepieciešams mērīt, lai kontrolētu notekūdeņu parametrus (LR MK, 2007):

- suspendētās vielas (SV),  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ;
- bioķīmiskais skābekļa patēriņš ( $\text{BSP}_5$ ),  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ;
- ķīmiskais skābekļa patēriņš ( $\text{KSP}$ ),  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ;
- kopējā slāpekļa koncentrācija ( $\text{N}_{\text{kop}}$ ),  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ;
- kopējā fosfora koncentrācija ( $\text{P}_{\text{kop}}$ ),  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ .

Notekūdeņu attīrīšana ir process, kurā piesārņotie notekūdeņi tiek sagatavoti ievadīšanai ūdenstilpēs vai arī otrreizējai izmantošanai. Tas ir secīgu darbību kopums, kura rezultātā piesārņojuma komponentu koncentrācija tiek samazināta līdz pieļaujamajam līmenim. Pieļaujamo piesārņojuma koncentrāciju nosaka Latvijas Republikas Ministru kabineta noteikumi Nr. 34, kā arī Ministru kabineta noteikumu grozījumi Nr. 59 (1.pielikums).

Notekūdeņu attīrīšanas vispārējā shēma dota 1.2.attēlā.





**1.2.att. Notekūdeņu attīrīšanas vispārējā shēma**

Mūsdienīga notekūdeņu attīrīšanas sistēma ietver gan notekūdeņu savākšanu, gan pirmējo filtrēšanu (lielu objektu norobežošanai), gan pārsūkņēšanas sistēmu (parasti notekūdeņu attīrīšanas ietaises (NAI) atrodas ārpus apdzīvotajām vietām), otrējo filtrēšanu un smago un lielāko suspendēto daļu atdalīšanu, pirmējo attīrīšanu (dzidrināšanu) no ūdenī nešķīstošiem piemaisījumiem (smiltis, eļļas), otrējo attīrīšanu, kurā notiek organisko savienojumu sadalīšana (primāri – ogļhidrātu un citu oglekļa savienojumu sadalīšana, amonija savienojumu oksidēšana, nitrītu, nitrātu sadalīšana, fosfora, sēra atdalīšana, citu izšķīdušo piemaisījumu sadalīšana,) otrējo dzidrināšanu, dezinficēšanu, kā arī attīrīto notekūdeņu izvadīšanu apkārtējā vidē un atdalīto piemaisījumu savākšanu un pārstrādi.

Pirmējā attīrīšana ir mehāniskā vai/un ķīmiska notekūdeņu attīrīšana, vai cits attīrīšanas process, kura rezultātā novadīto notekūdeņu  $BSP_5$  tiek samazināts ne mazāk kā par 20% attiecībā pret ienākošo slodzi, un suspendētās vielas (SV) ir samazinātas ne mazāk kā par 50% attiecībā pret ienākošo slodzi.

To var veikt dažādi – vienkāršākais veids ir notekūdeņu aiztransportēšana uz notekūdeņu nostādināšanas dīķiem, kuros ilgstošā periodā (līdz pat 30..60 dienām) notiek pakāpeniska nešķīstošo piemaisījumu sedimentācija un dīķī esošās bioloģiskās vides un ārējo fizikālo iedarbju (saule, gaiss, temperatūra) ietekmē – arī izšķīdušo vielu

degradācija (Tilgalis, 2004). Tādējādi notiek arī daļēja otrējā līmeņa attīrīšana. Galvenie ierobežojumi šī attīrīšanas veida ieviešanai ir sekojoši:

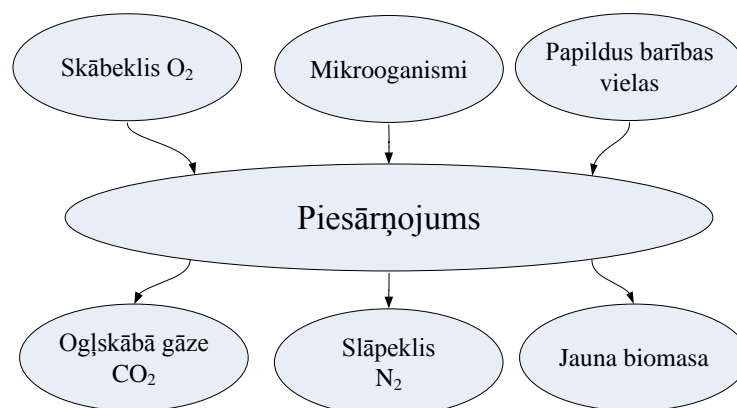
- lielās apdzīvotās vietās nepieciešamas ievērojamas zemes platības notekūdeņu dīķu izveidei – zemes dārdzības pieaugums Latvijā un visā Eiropā to būtiski ierobežo (Kiely, 1997);
- nepieciešami ievērojami ieguldījumi šādu dīķu izbūvei, lai nodrošinātu kontrolētu attīrīto notekūdeņu ievadīšanu apkārtējā vidē, un ierobežotu iespēju, ka neattīrīti notekūdeņi ieplūst apkārtējā vidē – grunts sastāvs ļoti bieži nenodrošina šādu iespēju, un investīciju apjoms hidroizolēšanai var izrādīties neadekvāts (Lekov, et al., 2009; Lijklema, Tyson, Lesouf, 1992; Malmqvist, Palmquist, 2005);
- ļoti sarežģīta attīrīto notekūdeņu kvalitātes kontrole un kvalitātes standartu nodrošināšana (pēc ES normatīviem BSP attīrītajos notekūdeņos nedrīkst pārsniegt  $60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , un kopējam suspendēto vielu daudzumam (SV) jābūt mazākam par  $150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  (EC, 1998));
- nepietiekošas aerācijas un notekūdeņu maisīšanas dēļ notiek nevienmērīga un nepilnīga piesārņojuma degradācija notekūdeņu tilpumā (Boyd, 1995);
- ekstenšīvs, lēns process, kura rezultātā apkārtējā vidē nonāk agresīvas gāzes un sabiedrībai nepieņemami nepatīkami aromāti (Kayes, s.a.).

Eiropas Savienībā, kurā virs 90% lielo pilsētu ir nodrošinātas ar notekūdeņu savākšanas sistēmu, un tajā pašā laikā tikai 66% no notekūdeņiem tiek apstrādāti vismaz ar otrējā līmeņa attīrīšanu (WTO and UNICEF, 2000; Naturgerechte Technologien, 2001), liela vērtība tiek pievērsta tālākai notekūdeņu attīrīšanai, un ir pieņemts lēmums nodrošināt visus municipālos notekūdeņus ar ne zemāku kā otrējo attīrīšanu (EC, 1998).

Otrējā attīrīšana ir notekūdeņu attīrīšana, galvenokārt bioloģiski ar atkārtotu nostādīnāšanu, vai citām metodēm, kuru rezultātā notekūdeņu kvalitāte nodrošina sekojošus parametrus (LVĢMA, 2006):

- BSP<sub>5</sub> samazinājies vismaz par 70 % attiecībā pret ienākošo slodzi;
- ĶSP samazinājies vismaz par 75% attiecībā pret ienākošo slodzi.

Bioloģiskais notekūdeņu attīrīšanas process shematiski parādīts 1.3.attēlā



### 1.3.att. Bioloģiskās attīrīšanas procesa norise

Otrējā attīrīšana patērē vislielāko (30–60%) enerģijas daļu (PG&E, 2003), un līdz ar paplašinātu tās ieviešanu un kopējā notekūdeņu daudzuma palielinājumu urbanizētajā vidē strauji pieaug kopējais enerģijas patēriņš notekūdeņu attīrīšanai attīstītajās valstīs.

Galvenā otrējās attīrīšanas komponente ir aerācija – notekūdeņu apskābekļošana. Pētījumi rāda, ka aerācijas nodrošināšanai tiek tērēti no 40 līdz 80% energoresursu no

kopējās notekūdeņu attīrīšanas energopatēriņa (Sniders, 1997; PG&E, 2003; Wang, Yung-Tse, Shammas, 2007; Smith; CEC, 2005; Low, Chase, 1999). Līdz ar to atbilstošu tehnoloģiski ekonomisko risinājumu pielietošana notekūdeņu aerācijas nodrošināšanā un notekūdeņu aerācijas inženiersistēmu (NAIS) izveidē kļūst par vienu no būtiskākajiem NAI projektētāju uzdevumiem.

NAIS energoefektīvu, kvalitatīvu un ekonomisku darbību ietekmē gan šīs inženiersistēmas galvenie tehniskie rādītāji, gan notekūdeņu kvalitatīvie rādītāji, gan tās ekspluatācijas ekonomiskie parametri (Horner, et al., 1994, Hultman, Löwén, 1997, Ingildsen, Olsson, Yuan, 2001). Tomēr netiek piedāvāts vienojošs optimālas vadības princips – tiek aprakstīti atsevišķu risinājumu ieviešanas sniegtie ieguvumi. Tam par iemeslu ir notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas kompleksā daba, ko ietekmē ļoti daudzi faktori.

Tie ir gan ar notekūdeņu kvalitāti saistīti faktori (notekūdeņu ķīmiskais sastāvs, organisko vielu sastāvs un daudzums, BSP, ŪSP, pH, temperatūra, koncentrācija, u.c.), gan ar attīrošās vides kvalitatīvajiem rādītājiem saistīti faktori (mikroorganismu sastāvs, aktivitāte, to bioķīmiskā pieredze konkrētajā vietā un ar to saistītie barošanās un miera stāvokļa režīmi, u.c.), gan arī notekūdeņu attīrīšanas ietaišu (NAI) tehnoloģiskie un tehniskie parametri (konstruktīvie izmēri, aerācijas principi, tehniskās iekārtas, to piedziņas principi, vadības metodes un algoritmi) (Ahmad, s.a.; Asano, Levine, 1998; Ingildsen, Jeppson, Olsson, 2002; Ferrer, 1998; Jorgensen, 1994; Lekov, et al., 2009).

Kā piemēru var minēt elektroenerģijas patēriņa svārstības Gulbenes pilsētas notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs – lai gan šīs ietaises ir modernizētas 2002.gadā, to energopatēriņš ļoti būtiski svārstās gan pa gadiem, gan pa mēnešiem. Paplašināta šo datu analīze dota promocijas darba 2.nodaļā, tomēr var konstatēt, ka nav atrodama statistiski pamatota korelācija starp energopatēriņa un apstrādāto notekūdeņu apjomu ne vecajās, ne arī modernizētajās NAI. Līdz ar to vēl jo vairāk pastiprinās adaptīvas un augsti efektīvas NAIS izveides nepieciešamība, kas spētu kvalitatīvi strādāt dinamiski mainīgos apstākļos.

Apkopojot informācijas avotos pieejamo informāciju, var izveidot notekūdeņu attīrīšanas ietaišu darbību ietekmējošo iekšējo un ārējo faktoru klāstu:

1. Ar notekūdeņu kvalitatīvajiem un kvantitatīvajiem rādītājiem saistīti faktori:
  - a. notekūdeņu koncentrācija;
  - b. notekūdeņu ķīmiskais piesārņojums;
  - c. notekūdeņu piesārņojums ar organiskajām vielām;
  - d. notekūdeņu temperatūra;
  - e. sezonālītātes (diennakts, nedēļas, gadalaika, svētku, brīvdienu) ietekme uz notekūdeņus raksturojošiem parametriem (pieplūdi, koncentrāciju, ķīmisko un bioloģisko sastāvu);
  - f. BSP un ŪSP ieplūstošajiem notekūdeņiem.
2. Ar ārējās vides kvantitatīvajiem rādītājiem saistīti faktori:
  - a. āra gaisa temperatūra;
  - b. gaisa ķīmiskais sastāvs (skābekļa koncentrācija, citu gāzu koncentrācija);
  - c. gaisa mitrums;
  - d. gaisa spiediens;
  - e. nokrišņi:
    - i. tiešie (attīrīšanas ierīču tuvumā – iedarbe no atmosfēras);
    - ii. netiešie (apdzīvotajā vietā – iedarbe caur notekūdeņu kolektoriem, kas apvienoti ar lietus ūdens kolektoriem);
  - f. saules starojuma iedarbe (dienas/nakts periods, ziemas/vasaras iedarbe, UV komponentes intensitāte);

3. Ar NAI konstruktīvajiem rādītājiem saistīti faktori:
  - a. notekūdeņu transportēšanas attālums un principi (cauruļvadi, kravas transports, atklāti kanāli, sūkņu tipi, u.c.);
  - b. NAI tvertņu konstruktīvie parametri (dziļums, formas ietekme);
  - c. NAI aerācijas sistēmas izvietojums, konstruktīvie parametri (blīvums, caurplūdes jauda).
4. Ar NAI tehnoloģiskajiem rādītājiem saistīti faktori:
  - a. tehnoloģisko ierīču vadības metodes, algoritmi, to saskaņotība un atbilstība konkrētam risinājumam;
  - b. tehnoloģiju ietekme uz dažādiem NAI režīmiem.
5. Ar ārējiem sociāli ekonomiskajiem apstākļiem saistīti faktori:
  - a. pārvaldošo iestāžu finanšu ekonomiskie lēmumi;
  - b. pārvaldošo iestāžu sociālie lēmumi;
  - c. pārvaldošo iestāžu politiskie lēmumi;
  - d. NAI darbības kvalitātes standartu esamība, ieviešanas pakāpe;
  - e. uzraugošo iestāžu darba kvalitāte NAI darbības kvalitātes vērtēšanā un konsekvence soda sankciju pielietošanā;
  - f. soda sankciju nopietnība un ietekme uz lēmumu pieņemšanu par NAI darbību;
  - g. sabiedrības aktivitātes NAI darbības sakarā.

## **1.2. Notekūdeņu aerācijas nozīme notekūdeņu bioloģiskās attīrīšanas tehnoloģiskajā sistēmā**

Mūsdienīgas NAI tiek projektētas un būvētas, izmantojot intensīvās bioloģiskās attīrīšanas metodes, kurās visi attīrīšanas procesi tiek intensificēti, ar dažādām ierīcēm un tehnoloģijām iedarbojoties uz notekūdeņiem, lai nodrošinātu to attīrīšanu (MOEE, 1998; Naturgerechte Technologien, 2001; Asano, and Levine, 1998).

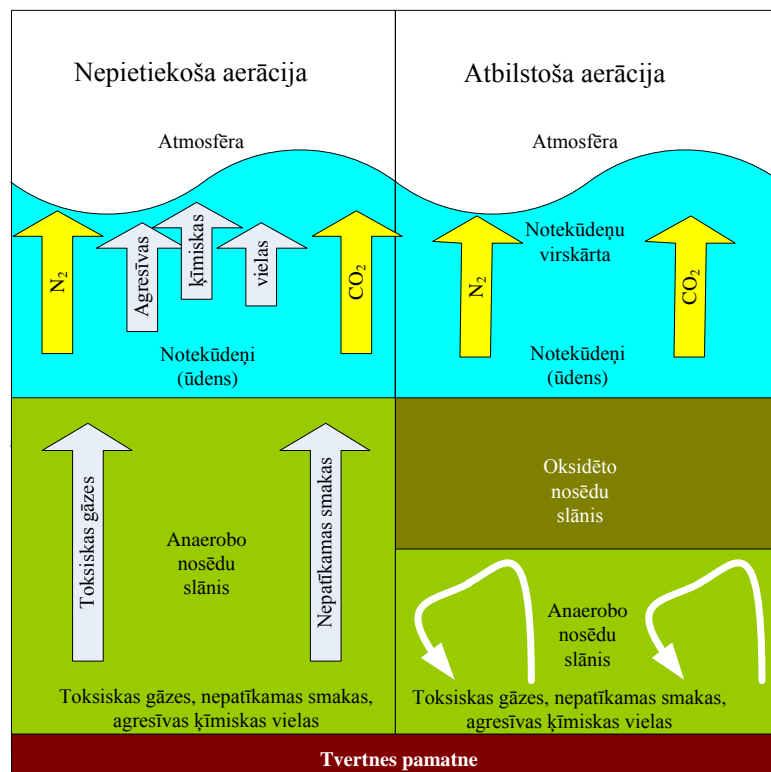
Galvenais instruments bioloģiskajā attīrīšanā ir bioloģiskā vide – mikroorganismi, kuri izmanto notekūdeņos esošās vielas kā pārtiku to metabolisma nodrošināšanai. NAI tehnoloģisko iekārtu galvenais uzdevums ir nodrošināt šo vidi ar mikroorganismiem nepieciešamo skābekli un ogļskābo gāzi, kā arī uzturēt notekūdeņu parametrus (temperatūra, pH, maisīšanas intensitāte, u.c.) tādās robežās, kas ir komfortablas to attīstībai un darbībai.

Tādējādi aerācijas nodrošināšana notekūdeņu bioloģiskās attīrīšanas ietaisēs kļūst par vienu no svarīgākajiem procesiem, kura nodrošināšanai jātērē energoresursi.

Notekūdeņu aerācijas uzdevumi ir sekojoši (Boyd, 1995; Jensen, Bankston, and Jensen, 1989; Dohse, and Heywood, s.a.; Low, et al., 2000; Naturgerechte Technologien, 2001):

- skābekļa O<sub>2</sub>, slāpekļa N<sub>2</sub> un ogļskābās gāzes CO<sub>2</sub> un citu nepieciešamo gāzu piegāde ķīmisko procesu nodrošināšanai (oksidēšanās/reducēšanās reakciju norisei attīrīšanas procesā);
- skābekļa O<sub>2</sub>, slāpekļa N<sub>2</sub> un ogļskābās gāzes CO<sub>2</sub> un citu nepieciešamo gāzu piegāde mikroorganismiem to metabolisma nodrošināšanai;
- mikroorganismu nogāde pie barības vielām (gāzu plūsma nodrošina gan notekūdeņu, gan mikroorganismu kustības būtisku paātrināšanu un saskari);
- notekūdeņu vienmērīga sajaukšana to kustības laikā caur NAI, lai nodrošinātu viendabīgu notekūdeņu struktūru;

- dažādu slāņu sajaukšanās nodrošināšana, lai mazinātu kaitīgo vielu (īpaši sērūdeņraža  $H_2S$ , amonjaka  $NH_3$ , nitrītu  $NO_2^-$ , nitrātu  $NO_3^-$ , hlorīdu  $Cl^-$ ) koncentrācijas pieaugumu virs mikroorganismiem un tehnoloģiskajām iekārtām bīstama līmeņa;
- slāpekļa  $N_2$  un ogļskābās gāzes  $CO_2$  izvadīšana no notekūdeņiem (Boyd, and Ahmad, 1987; Boyd, 1995);
- cieto nešķīstošo piemaisījumu (gan jau notekūdeņos esošu, gan arī attīrīšanas laikā ķīmiski vai bioloģiski radušos) noturēšana suspendētā stāvoklī, tā nodrošinot to transportēšanu uz dzidrināšanas un nosēdu atdalīšanas ierīcēm.
- oksidēto nosēdu slāņa izveide, lai nepieļautu agresīvo komponentu (sērūdeņraža  $H_2S$ , amonjaka  $NH_3$ ) un citu agresīvu kaitīgu gāzu un aromātu izplūdi atmosfērā (1.4.att.);



1.4.att. Oksidējošā slāņa izveide aerācijas tvertnē

### 1.3. Bioķīmiskie procesi notekūdeņu aerācijas tvertnē un tos ietekmējošie faktori

Pētījuma galvenais virziens ir saistīts ar notekūdeņu bioloģiskās attīrīšanas ietaišu darbības procesiem, līdz ar to nozīmīga pētījuma daļa ir aerācijas tvertnē notiekošo bioķīmisko procesu izpratnes veidošana un šos procesus iespaidojošo faktoru noskaidrošana. Tā rezultātā būs iespējams izvēlēties efektīvu un konkrētiem apstākļiem atbilstošu procesa vadības metodi.

Notekūdeņi vidēji sastāv no 99% ūdens un tikai 1% piejaukumiem (no tiem 30% suspendēto daļiņu un 70% izšķīdušo piejaukumu) (Environment Canada, 2002), līdz ar to attīrīšanai jāspēj attīrīt šo niecīgo, bet dabai un cilvēkiem kaitīgo piejaukumu daļu no lielas ūdens masas.

Piesārņota ūdens attīrīšanās dabā notiek ilgstošā procesā, un tā attīrīšanās kvalitāte nav vienāda. Tā ir atkarīga no apkārtējās vides fizikālajiem parametriem (gaisa

temperatūra, gaisa spiediens, gaisa mitrums), notekūdeņu fizikāli ķīmiskajiem parametriem (temperatūra, pH, ķīmisko un organisko piejaukumu ķīmiskais sastāvs) (Welch, 1992), piemaisījumu koncentrācija notekūdeņos, kas saistīta gan ar piesārņojumu rašanās sezonālo raksturu (diennakts, nedēļas, gada sezonālitate), un nokrišņu ietekme, kā arī no tā, kādi mikroorganismi piedalās notekūdeņu attīrīšanas procesā (Wenzel, Ekama, Loewenthal, 2003).

Nelielos apjomos šāda nenoteiktība un mainīgas kvalitātes piesārņojuma nonākšana dabā nerada problēmas, jo atklātos ūdeņos ieplūstošie notekūdeņi tiek būtiski atšķaidīti, un ilgstošā laikā uz piemaisījumiem iedarbojas visi biodegradācijas nodrošināšanai nepieciešamie mikroorganismi un ķīmiskie procesi (Schueler, 1987; Welch, 1997; WHO, 1989).

Daudz būtiskāk nodrošināt vadāmu attīrīšanas procesu tad, ja ir ierobežojumi piesārņojuma attīrīšanai – ierobežots attīrīšanai paredzētais laiks, ierobežota attīrīšanai paredzētā telpa, lieli piesārņojuma apjomi, paaugstināts kaitīgums apkārtējai videi, noteikti attīrītā ūdens kvalitātes standarti, kas nosaka zemu piesārņojuma līmeni. Tieši šādi nosacījumi tiek izvirzīti ES valstu municipālo notekūdeņu attīrīšanas ietaisēm (PG&E, 2003; EK, 1991).

NAI uzdevums ir efektīvi aizvākt piesārņojumu no notekūdeņiem, radot attīrītus ūdeņus, kurus drīkst novadīt apkārtējā vidē, tajā pašā laikā efektīvi izmantojot sociālos, vides un ekonomiski tehnoloģiskos līdzekļus, un vienlaicīgi minimizējot nepieciešamību radīt un pievienot notekūdeņiem jaunas bioloģiski aktīvas piedevas (Wos, 2005).

Notekūdeņos, kas tiek apstrādāti NAI, notiek vienlaicīgi divi paralēli attīrīšanas procesi – ķīmiskais un bioloģiskais (bioķīmiskais) process.

Ķīmiskā procesa ietekmē skābekļa un ūdens hidrolīzes rezultāta radušos  $H^+$  un  $OH^-$  ietekmē noārdās šķīstošais ķīmiskais piesārņojums un hidrolizējas nešķīstošais organiskais piesārņojums (Sawyer, and McCarty, 1978; Tchobanoglous, Franklin, Stensel, 2003; Zipper, Fleishmann, Habler, 1998).

Bioloģiskā procesa ietekmē mikroorganismi noārda šķīstošo organisko (bioloģisko) piesārņojumu (Olsson, et al., 2005; Randall, Barnard, Stensel, 1992). Galvenie notekūdeņu aerācijas tvertnē notiekošo bioķīmisko procesu dalībnieki ir mikroorganismi, it īpaši gadījumos, kad notekūdeņu piesārņojuma galvenā sastāvdaļa ir organiskas vielas (mājsaimniecību un municipālie notekūdeņi) (Tilgalis, 2004).

### **1.3.1. Aktīvo dūņu darbības efektivitātes nosacījumi**

Aktīvās dūņas ir notekūdeņu aerācijas tvertnes aktīvais elements, kurš veic piesārņojumu biodegradāciju, tādā veidā nodrošinot atbilstošas kvalitātes un intensitātes attīrīšanu. Šī tehnoloģija ir viena no visizplatītākajām NAI darbības nodrošināšanā – to lieto visās ģeogrāfiskajās zonās, un vēsturiski ir tikusi izmantota jau no senatnes, tomēr par vadāmu aktīvo dūņu izmantošanas brīdi NAI tehnoloģijā var uzskatīt 1914. gada maiju, kad angļu inženieri Ardnery (Arden) un Lokets (Lockett) nodefinēja aktīvo dūņu attīrīšanas procesu (activated sludge process (ASP)), kurā ļoti būtiska sastāvdaļa bija aerācija, kas ļāva veidot aktīvo dūņu un notekūdeņu suspensiju (Dohse, Heywood, s.a.; Guender, 2000).

Aktīvās dūņas ir ūdenī suspendētas 1–3 mm lielas gļotainas pārslas (Tilgalis, 2004). Termins „aktīvās dūņas” (Activated Sludge – angl.) ietver sevī tādu mikroorganismu, sēnīšu, vienšūņu un baktēriju kombināciju, kas dotajos apstākļos nodrošina konkrētu piesārņojuma attīrīšanu konkrētā notekūdeņu attīrīšanas ietaisē (Green Facts Glossary, 2008).

Aktīvo dūņu mikroorganismi sastāda 98% no visām organiskajām piedevām notekūdeņos (Wentzel, Ekama, Loewenthal, 2003). Tipiskas aktīvo dūņu īpašības ir sekojošas (Eckenfeld, Grau, 1992):

- dažāda izmēra un ķīmiskās aktivitātes mikroorganismu kompozīcija;
- plaša bioloģisko sugu dažādība, kas spēj dzīvot, augt un attīstīties, esot blakus (vienā vidē, slānī, pat pārslu līmenī);
- spēja izdzīvot un attīstīties fizikāli mainīgā vidē (notekūdeņu plūsma, temperatūra, koncentrācija, sastāvs, u.c.);
- spēja metabolizēt organiskos un neorganiskos piemaisījumus, kas satur oglekli, slāpekli, fosforu, sēru, u.c. ķīmiskos elementus un to sāļus;
- spēja pielāgoties dažādām notekūdeņu attīrīšanas ietaišu konfigurācijām.

Aktīvo dūņu izmantošanas process NAI var būt gan nepārtrauktas darbības, gan arī periodiskas darbības (attīra – iztukšo – atkal piepilda – attīra – u.t.t.) (Dohse, Heywood, s.a.; Vesilind, 2003). Modernajās aktīvo dūņu sistēmās tiek lietotas galvenokārt heterotrofās baktērijas, pie tam jāņem vērā tas, ka nav tāda viena mikroorganisma, kas spēj pārstrādāt visas notekūdeņos esošās kaitīgās vielas, bet precīzi sakombinējot aktīvo dūņu mikroorganismu sastāvu, iespējams ļoti augstas kvalitātes attīrīšanas process (Low, Chase, 1999).

Notekūdeņiem no primārās attīrīšanas sistēmas ieplūstot sekundārajā attīrīšanas sistēmā, notiek to maisīšana (gan ar aerācijas sistēmas palīdzību, gan arī ar mehāniskajiem jaucējiem), kuras rezultātā veidojas aktīvo dūņu un notekūdeņu suspensija, kurā veidojas aktīvo dūņu pārslas, kuras sastāv no piemaisījumiem, dzīvjiem mikroorganismiem, kas veic piemaisījumu biodegradāciju, un arī mirušiem mikroorganismiem.

Efektīvas aktīvo dūņu darbības nosacījumi ir sekojoši (Eckenfeld, Grau, 1998):

- mikroorganismu sastāvam aktīvajās dūņās jābūt spējīgām izmantot notekūdeņos esošos organiska un neorganiska rakstura oglekļa, slāpekļa, fosfora un citu elementu savienojumus sava metabolisma nodrošināšanai;
- mikroorganismu sastāvam pēc to tipiem un barošanās sistēmas aktīvajās dūņās jāatbilst vidējam notekūdeņu sastāvam, lai tiktu nodrošināta piesārņojuma atdalīšana no notekūdeņiem;
- mikroorganismu sastāvam pēc to tipiem un barošanās sistēmas aktīvajās dūņās jāatbilst notekūdeņu temperatūras režīmiem un pieļaujamajam diapazonam noteiktajos apstākļos, lai tiktu nodrošināta piesārņojuma atdalīšana no notekūdeņiem;
- mikroorganismu sastāvam pēc to tipiem un barošanās sistēmas aktīvajās dūņās jāatbilst notekūdeņu attīrīšanas procesā iegūstamajiem rezultātiem (piem.,  $N_2$ , metāna ieguvei, u.c.), lai tiktu nodrošināta piesārņojuma atdalīšana no notekūdeņiem;
- aerācijai jānodrošina mikroorganismu metabolismam atbilstošu notekūdeņos izšķīdušo gāzu sastāvu ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ , u.c.);
- mikroorganismiem jāspēja pārvietoties un/vai tikt pārvietotiem uz tām vietām tvertnē, kur atrodas piesārņojums (to barības avots) un to metabolisma nodrošināšanai nepieciešamās gāzes ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ , u.c.).

Visi augstākminētie nosacījumi var tikt apvienoti divās galvenajās grupās (Wentzel, Ekama, 1997):

1. grupa, kas saistīta ar mikrobioloģisko vidi un tās aklimatizāciju un adaptācijas spēju;

2. grupa, kas saistīta ar cilvēka iedarbi uz šo vidi, lai nodrošinātu tās izdzīvošanai nepieciešamos režīmus un efektīvu darbību (iekļaujot mirušo un mazaktīvo mikroorganismu savākšanu un aizvākšanu no sistēmas un aktīvo mikroorganismu atkārtotu pielietošanu attīrīšanas sistēmā).

Efektīva aktīvo dūņu vadība nozīmē efektīvu mikroorganismu darbības nodrošināšanu attīrīšanas ietaisēs, un vienlaicīgi arī efektīvu atkārtoti izmantojamo aktīvo dūņu atdalīšanu dzirdināšanas sistēmā, tādējādi būtiski paaugstinot NAI kopējo ekonomisko efektivitāti (Dignac, et al., 2000).

Efektīva mikroorganismu darbība bioreaktorā ir saistīta gan ar to metaboliskās aktivitātes līmeni, gan ar biomasas augšanas un attīstības ātrumu (Wenzel, Ekama, Loewenthal, 2003).

Atbilstoša kvalitatīva aerācija ļauj būtiski paātrināt gan metabolismu, gan arī biomasas augšanas ātrumu (Low, et al., 2000). Metabolisms notekūdeņu reaktorā ir gan ar anaboliskām (enerģiju tērējošām), gan kataboliskām (enerģiju izdalošām) iezīmēm (Pollard, Greenfield, 1997), kas savukārt ietekmē pārejos procesus NAI.

Netiešai aktīvo dūņu darbības efektivitātes noteikšanai un vienlaicīgi arī NAI darbības kvalitātes mērīšanai ieviesti Bioloģiskā (bioķīmiskā) skābekļa patēriņa (BSP) un Ķīmiskā skābekļa patēriņa (ĶSP) jēdzieni. Šo izmērāmo parametru ieviešana ļāva arī pieņemt vienotu attīrīšanas kvalitātes standartu (Pons, et al., 2004).

Vispārējā likumdošanā BSP tiek definēts kā indekss, kas parāda bioķīmiski degradējamā piesārņojuma daudzumu notekūdeņos.

Praktiski tiek mērīts NAI ieplūstošo un no NAI izplūstošo ūdeņu BSP<sub>5</sub> – skābekļa daudzumu, kas nepieciešams mikroorganismiem, lai 5 dienās pārstrādātu notekūdeņos esošo bioķīmisko piesārņojumu, miligramos uz testa parauga litru. (Process notiek bez gaismas klātbūtnes, lai novērstu iespējamo fotosintēzes procesu, un 20°C temperatūrā).

Galvenā problēma BSP lietošanai NAI operatīvās darbības vadīšanai un kontrolei ir tā, ka tā mērīšanu var veikt tikai laboratorijas apstākļos, noņemot paraugus un veicot laukietilpīgas (virs 5 dienām) un resursietilpīgas darbības. Tādēļ tas tiek lietots galvenokārt kā periodiskas kontroles rādītājs un kopējs standarts, uz kuru jātiecas un kuru jāievēro jebkurai NAI. Tas ir arī ekoloģiju un NAI darbības kvalitāti uzraugošo valsts institūciju kontrolētais parametrs, kas ir vienots visā ES.

Pētījumi rāda, ka tipisks BSP<sub>5</sub> līmenis municipālajās NAI ieplūstošiem notekūdeņiem ir 600 g·m<sup>-3</sup> ES valstīs (ar svārstību diapazonu 400–1000 g·m<sup>-3</sup>) un 100–400 g·m<sup>-3</sup> ASV (Lekov et al., 2009, Foster 2000), bet jāņem vērā, ka industriālajiem notekūdeņiem BSP var būt daudz augstāks (īpaši no pārtikas pārstrādes uzņēmumiem) – līdz pat 5125 g·m<sup>-3</sup> (Mijangos, s.a.), līdz ar to NAI jāveic intensīvs darbs, lai nodrošinātu izplūstošo attīrīto ūdeņu atbilstību standartiem.

Notekūdeņu attīrīšanas procesā notiek ne tikai biodegradācija, bet arī ķīmiskie oksidēšanās procesi. Ķīmisko skābekļa patēriņu (ĶSP) nosaka kā notekūdeņu attīrīšanas procesā visu oksidēšanās reakciju rezultātā patērētā skābekļa daudzumu (ECB, 1992). Izplūstošo ūdeņu ĶSP nedrīkst pārsniegt 75 mg/l (Foster, 2000).

Pētījumi rāda, ka municipālajos notekūdeņos ĶSP ir ievērojami lielāks nekā BSP (ĶSP/BSP attiecība municipālajos notekūdeņos svārstās robežās no 1,5 līdz 2 (CEE, s.a.).

ĶSP noteikšanai ir izstrādāta metodika, kuru nosaka standarts ISO 6060. Atšķirībā no BSP, ĶSP noteikšanai nepieciešamas nedaudz vairāk kā 2 stundas, bet tomēr saglabājas nepieciešamība to veikt īpašās laboratorijās, jo ir jāveic parauga apstrāde paaugstinātā temperatūrā (148°C), pievienojot tam ķīmiskas vielas.



Līdz ar to var secināt, ka arī ŪSP nav izmantojams NAI operatīvās darbības kontrolei un vadībai, bet tikai kā periodiskas kvalitātes kontroles rādītājs. ŪSP tiek lietots arī kā BSP ātrās aptuvenās novērtēšanas paņēmieni, pie tam tas ir arī daudz stabilāks rādītājs, jo to mazāk ietekmē bioloģiskā vide (Boyles, 1997).

Būtisks faktors, kas ietekmē BSP un ŪSP notekūdeņos, ir kopējais suspendēto vielu daudzums ūdenī, kas būtiski palielina šo rādītāju skaitliskās vērtības (Chen, Yu, Ongley, 2006).

Augsts BSP līmenis var liecināt par sekojošiem procesiem pieplūstošajos un aizplūstošajos (attīrītajos) notekūdeņos:

- augsts bioloģisko piesārņojumu līmenis;
- augsts nitrātu līmenis, kas veicina zaļās masas augšanu ūdenī (EEA, 2001);
- augsts fosfātu līmenis, kas veicina zaļās masas augšanu ūdenī (CIESE, 2008);
- augsta aktīvajās dūņās esošo skābekli patērējošu mikroorganismu koncentrācija;
- zema aktīvo dūņu atdalīšanas (sedimentācijas) kvalitāte;
- paaugstināta notekūdeņu temperatūra – augsta aļģu un citu mikroorganismu fotosintēzes aktivitāte (metabolisms).

Ja BSP līmenis ir augsts, strauji samazinās notekūdeņos izšķīdušā skābekļa līmenis (mikroorganismi to strauji patērē, lai nodrošinātu savu dzīvošanu, un lai vairotos). Tas būtiski ietekmē mikroorganismu struktūru aktīvajās dūņās – samazinās to dzīvo būtnu proporcija, kas spēj dzīvot tikai augstas izšķīdušā skābekļa koncentrācijas vidē, bet pieaug anokosos un anaerobos apstākļos dzīvojošu mikroorganismu proporcija (CIESE, 2008).

Augsts ŪSP līmenis var liecināt par sekojošiem procesiem pieplūstošajos un aizplūstošajos (attīrītajos) notekūdeņos:

- augsts ķīmisko piesārņojumu līmenis – potenciāli industriālo notekūdeņu pieplūde municipālo notekūdeņu sistēmā;
- avārijas ieplūdes – ķīmiski agresīvu vielu ieplūde notekūdeņu sistēmā.

Ja ŪSP līmenis ir augsts, strauji samazinās notekūdeņos izšķīdušā skābekļa līmenis, kas rada agresīvu anoksu vidi ar ļoti augstu vai ļoti zemu pH līmeni, kurā var iet bojā visi notekūdeņu attīrīšanā iesaistītie mikroorganismi – notiek aktīvo dūņu izmiršana (Howard, 2004). Šādā gadījumā ir jāpārtrauc notekūdeņu ieplūdināšana, un jāveic pastiprināta aerācija, lai noārdītu ieplūdušās ķīmiskās vielas. Nepieciešamības gadījumā notekūdeņiem jāpievieno ķīmiskas vielas, kas neitralizē notekūdeņos esošās paaugstinātu ŪSP radījušās ķīmiskās vielas. Vienlaicīgi ir jānodrošina, lai vides pH atrodas 5..7 robežās (CIESE, 2008).

Procesi aktīvajās dūņās paaugstināta ŪSP gadījumā (Kiely, 1997):

- ātri biodegradablās izšķīdušās ķīmiskās vielas mikroorganismi metabolizē nekavējoties;
- lēni biodegradablas izšķīdušās ķīmiskās vielas tiek absorbētas mikroorganismos un tur uzkrātas vēlākai metabolizācijai;
- daļa no metabolizētā ŪSP tiek izmantota jaunas biomasas radīšanai.

Ieguvumi no ŪSP un BSP samazināšanas ieplūstošajos notekūdeņos (OPTEK,2008):

- stabila bioloģisko NAI darbība, saglabājot aktīvo dūņu struktūras nemainību;
- samazināti cieta atkritumu apjomi sedimentācijas ietaisēs;
- samazināti aktīvo dūņu reģenerācijas apjomi;
- samazinātas NAI operatīvās izmaksas;
- paaugstināta aerācijas energoefektivitāte;

- paaugstināta attīrīšanas ekonomiskā efektivitāte;
- paaugstināta investētā kapitāla atdeve (ROIC).

### 1.3.2. Skābekli patērējošie procesi notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs

#### Oglekļa savienojumu reducēšanas process

Cilvēka darbības rezultātā radušos municipālo notekūdeņu galvenā sastāvdaļa ir organiskās vielas, kuras sastāv galvenokārt no oglekļa, skābekļa, slāpekļa un ūdeņraža. Pamatattīrīšanas process sākas ar oglekļa savienojumu noārdīšanu un/vai tiešu izmantošanu aktīvo dūņu mikrobioloģiskās vides metabolisma nodrošināšanai.

Galvenā loma oglekļa savienojumu biodegradācijas procesā ir nešķīstošo oglekļa savienojumu hidrolīzes procesam, kurš notiek ūdenī aktīvo dūņu mikroorganismu fermentu un  $H^+$  un  $OH^-$  vidē, un pārvērš nešķīstošos savienojumus šķīstošos savienojumos, kurus tālāk metabolizē aktīvajās dūņās esošie heterotrofie mikroorganismi.

Heterotrofie organismi notekūdeņos iegūst enerģiju no gatavām, ar enerģiju bagātām organiskām vielām, kuras tie izmanto savu organisko vielu sintēzei (Dignac, et al., 2000; Juhna, 2005; Dohse, Heywood, 2008). Tajā pašā laikā to elpošanai nepieciešams pietiekošs ūdenī izšķīdušā skābekļa daudzums, ko jānodrošina aerācijas sistēmai. Daļēji skābekļa resurss ir arī notekūdeņos esošie nitrīti un nitrāti, kurus reducējot, no notekūdeņiem tiek aizvadīts slāpekļis, bet paliek izšķīdušais skābeklis.

Heterotrofo organismu metaboliskā aktivitāte no oglekļa savienojumiem vispārīgā gadījumā rada ogļskābo gāzi un ūdeni, kas ir notekūdeņu attīrīšanas vēlamais galarezultāts. No notekūdeņiem radušos ogļskābo gāzi  $CO_2$  nevar uzskatīt pat siltumnīcas efektu pastiprinošu elementu, jo tas iesaistīts bioloģisko vielu aprites procesā.

Kontrolējot un vadot oglekļa savienojumu biodegradācijas procesu, jāņem vērā tas, ka  $CO_2$  šķīst ūdenī, veidojot paskābinātu vidi  $HCO_3^-$ . Lai nodrošinātu samazinātu  $CO_2$  izplūdi atmosfērā, aktīvo dūņu sastāvā tiek pievienotas arī autotrofās dzīvās būnes, kuras spēj no oglekļa dioksīda, neorganiskām vielām un ūdens sintezēt organiskas vielas izmantojot saules enerģiju (fotosintēze) vai enerģiju no neorganiskiem savienojumiem (hemosintēze) (Howard, et al., 2004). Izplūstošajos notekūdeņos izšķīdušo  $CO_2$  lieliski izmanto arī apkārtējā vidē esošie autotrofie organismi.

NAI, kurās ietilpst notekūdeņu sastāvā ir samazināts oglekli saturošu piemaisījumu sastāvs, kā arī tad, ja ir ļoti augsts slāpekli saturošu piemaisījumu saturs, stabilas heterotrofo organismu darbības nodrošināšanai (lai tie neietu bojā no uzturvielu nabadzības) notekūdeņiem pieveino šķīstošus un ātri metabolizējamus bioloģiskai videi nekaitīgas vielas – parasti tas ir metanols  $CH_3OH$  vai etanols  $C_2H_5OH$  (Methanol Institute, 2008).

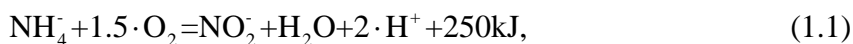
#### Nitrifikācijas un denitrifikācijas process

Municipālo notekūdeņu sastāvā būtisks piesārņojuma avots ir slāpekli saturošās agresīvās bioloģiskās izcelsmes vielas – amonija jonu saturošās vielas, kā arī cilvēka darbības rezultātā radušies nitrīti un nitrāti, kuru ietekme uz apkārtējo vidi ir būtiska, tāpēc ierobežojama (Sedlak, et al., 1991; Sotirakou, et al., 1999).

Slāpekļa savienojumu biodegradācija tiek sadalīta divās būtiski atšķirīgās daļās – nitrifikācija – aerobā aktīvo dūņu mikroorganismu augšana, un denitrifikācija – anoksā aktīvo dūņu mikroorganismu augšana.

Anoksā zona NAI tiek veidota kā anaerobās zonas turpinājums. Attīrīšanas procesa nodrošināšanai anoksajā zonā tiek pievadīti vai nu neattīrīti notekūdeņi, kuros ir oglekli saturošas organiskās vielas, vai arī papildus organiskās vielas (metanols, etanols, u.c.) (Schramm, et al., 1999).

Formulas, kas parāda amonija sāļu noārdīšanās ķīmisko procesu nitrifikācijas procesā, ir sekojošas (Water Planet, 2008):



un



Kā redzams no formulām (1.1) un (1.2), nitrifikācijas procesā tiek patērēts ievērojams skābekļa daudzums, kā arī izdalās enerģija – notekūdeņi uzsilst. Nitrifikācijas galarezultāts – tiek iegūti nitrīti un nitrāti, kas nevar tikt uzskatīti par attīrītu notekūdeņu sastāvdaļu. Analizējot kopējos ķīmiskos procesus notekūdeņu attīrīšanas procesā, var konstatēt, ka BSP process neievērtē amonija  $\text{NH}_4^+$  sāļu pārvēršanos vispirms nitrītos  $\text{NO}_2^-$ , pēc tam nitrātos  $\text{NO}_3^-$ , līdz ar to BSP neparāda arī nepieciešamo skābekļa daudzumu pilnīgai notekūdeņu attīrīšanai (Szatkowska, Trela, Plaza, 2005; Gut, Plaza, Hultman, 2005).

Teorētiski nepieciešamais skābekļa daudzums pilnīgai nitrifikācijas procesa nodrošināšanai ir 2 mol  $\text{O}_2$  uz 1 mol  $\text{NH}_4^+$ , vai pārrēķinot masas vienībās, 4.57 g  $\text{O}_2$  uz 1g  $\text{NH}_4^+$ . Formula, kas parāda amonija sāļu noārdīšanās denitrifikācijas procesā, ir sekojoša (Water Planet, 2008):



Kā redzams no formulas (1.3), denitrifikācijas process notiek bezskābekļa vidē, un tā nodrošināšanai notekūdeņos jābūt heterotrofiem organismiem, kas izmanto organiskas vielas kā elektronu donorus (šajā gadījumā tas ir metanols), lai veiktu reducēšanas reakcijas, kuru rezultātā nitrātos esošais slāpeklis tiek atbrīvots un izvadīts no notekūdeņiem kā neitrāla gāze.

### Fosfora savienojumu reducēšanas process

Fosfora savienojumu koncentrācijas samazināšana izplūstošajos notekūdeņos ir kļuvusi par svarīgu uzdevumu tikai pēdējos gados.

Fosfora biodegradācijas process ir ļoti komplicēts, un sastāv no diviem etapiem – izšķīdušo fosfora sāļu saistīšana mikroorganismos, un fosfora savienojumu tālāka izvākšana no notekūdeņiem, pārvēršot to nešķīstošā formā, un sedimentējot iegūtās nešķīstošās daļiņas, lai tās tālāk izmantotu fosfora savienojumi iegūšanai (Ekama, Marais, and Siebritz, 1984; Lenntech, s.a.; Mulder, Rensink, 1987; Hultman, et al., 2003; Park, Whang, Novotny, 2001; Rybicki, 1997; USGS, s.a.).

Galvenie iemesli NAI konceptuālai darbības stratēģijas izmaiņai uz aktīvu fosfora savienojumu biodegradāciju ir sekojoši:

- fosfora savienojumi, līdzīgi kā slāpekļa savienojumi, izplūstot brīvā dabā – atklātos ūdens rezervuāros, upēs, ezeros, kļūst par bioloģiskā piesārņojuma – aļģu, zāļu, u.c., pastiprinātas augšanas ierosinātāju (Metcalf and Eddy, 2003; Sotirakou, et al., 1999; Stark, 2004). Tā rezultātā strauji pieaug apkārtējās vides eitrofikācija;
- skābekļa daudzums ūdenī samazinās līdz tādai pakāpei, ka noārdīšanas process var notikt tikai anaerobos apstākļos. Tā kā noārdīšana anaerobos apstākļos notiek lēnāk, ūdenstilpes dibenā veidojas trūdošu vielu slānis. Šajā procesā kā blakusprodukti rodas amonjaks, metāns un sērūdeņradis – vielas, kas ir indīgas

dzīvīem organismiem, pie tam metāns tiek uzskatīts par vienu no galvenajām siltumnīcas efektu veicinošām gāzēm (iespajds uz siltumnīcas efektu uz Zemes 20 reizes lielāks nekā ogļskābajai gāzei). Ūdens cirkulācijas rezultātā šīs vielas nokļūst augstākajos ūdensslāņos (Rybicki, 1997).;

- papildus skābekļa trūkums izsauc  $\text{Fe}_3^+$  reducēšanos uz  $\text{Fe}_2^+$ , kā rezultātā tiek atbrīvots pirms tam pie  $\text{Fe}_3^+$  saistītais fosfāts, kas stimulē tālāku eitrofikāciju (Balmér, et al., 2002; Borglund, s.a.).

Joprojām notiek pētījumi, lai precizētu fosfora biodegradācijas procesu, tomēr arī šajā procesā nepieciešama skābekļa klātbūtne, lai fosforu akumulējošie mikroorganismi spētu izšķīdusos fosfora sāļus metabolizēt, un izvadīt kā nešķīstošus savienojumus (Sedlak, 1991; Stark, 2005). Tādēļ šis process jāņem vērā, optimizējot NAIS darbību.

#### **1.4. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas tehnoloģiskās iekārtas un to vadības metodes**

Iepriekšējās nodaļās veiktās pasaules pieredzes analīze notekūdeņu bioloģiskās attīrīšanas procesu vērtēšanā, analīzē un kontrolē rāda to, ka municipālo notekūdeņu attīrīšanas procesā ļoti būtiska loma ir oksidējošam elementam – skābeklim. Gan ogļūdeņražū, gan citu organisko vielu, gan amonija un fosfora sāļu koncentrācijas samazināšanu modernajās NAI veic aktīvajās dūņās esošie mikroorganismi, kuriem skābeklis nepieciešams to metabolismu nodrošināšanai. Arī neorganisku ķīmisku vielu noārdīšanās procesā, kur sākumā nepiedalās dzīvas būtnes, būtiska loma ir tieši skābeklim kā aktīvam oksidētājam.

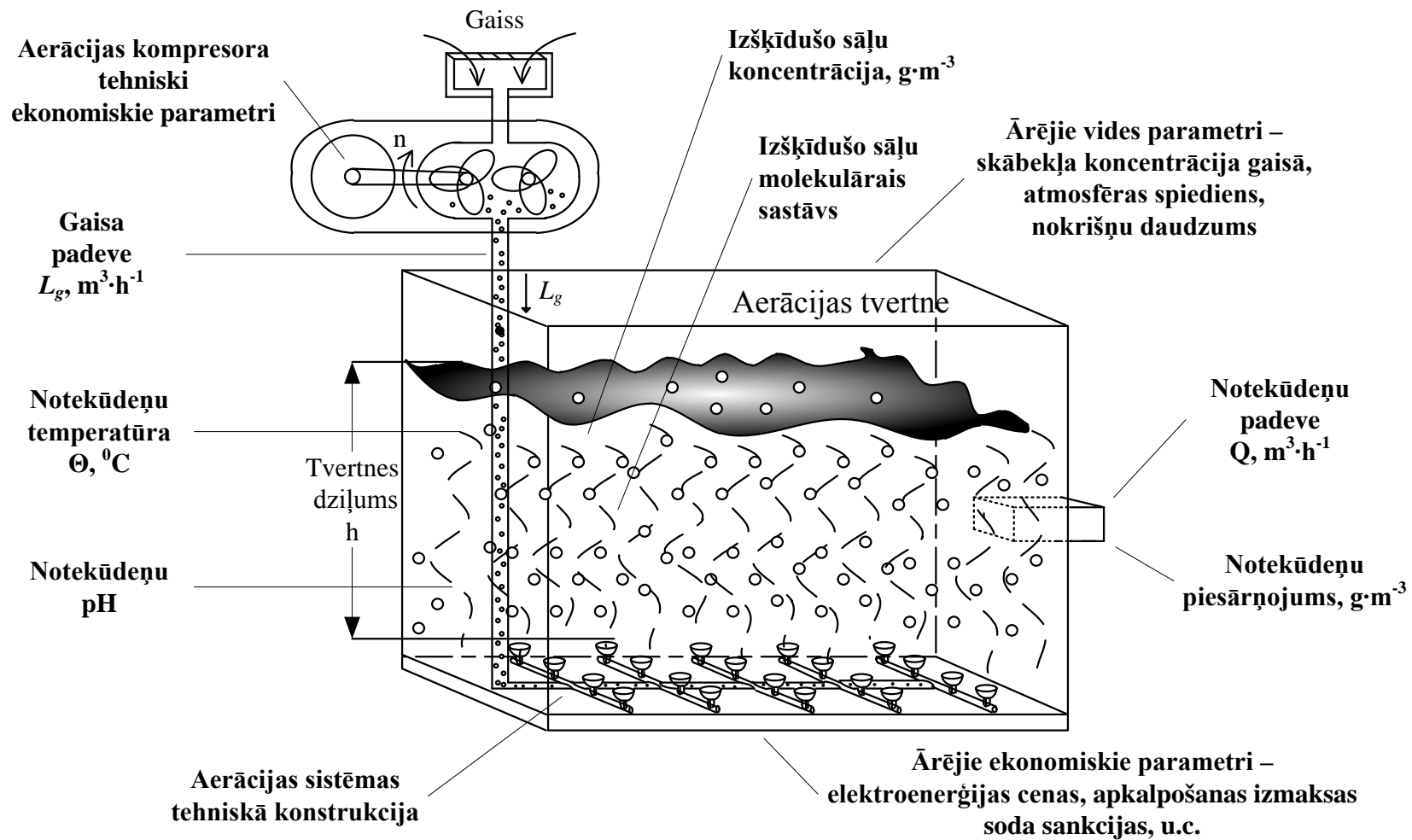
Līdz ar to būtiska NAI sastāvdaļa ir notekūdeņu apskābekļošanas tehnoloģiskās iekārtas. Tā kā notekūdeņu apskābekļošanu nodrošina tehniska sistēma, tālāk to sauksim par notekūdeņu aerācijas inženiersistēmu (NAIS). Grafiski NAIS ietekmējošie faktori parādīti 1.5.attēlā.

Notekūdeņu apskābekļošanai tiek izmantotas divas galvenās tehnoloģijas (AAS, s.a.; Asano, Levine, 1998, Droste, 1997; Eckenfelder, Grau, 1998; Foster, 2000; Horner, et al., 1994; Kiely, 1997; Metcalf and Eddy, 1995; Mueller, Boyle, Pöpel, 2002; Olsson, Newell, 1999; Olsson, et al., 2005; Schueler, 1987):

- izmantojot gaisu kā dabisku skābekļa avotu, padodot to uz aerācijas tvertnēm;
- izmantojot tehniski tīru skābekli (parasti ~99,7%), padodot to uz aerācijas tvertnēm.

Priekšrocības tehniskā skābekļa pievadīšanai (AAS, s.a.; Asano, Levine, 1998, Droste, 1997; Eckenfelder, Grau, 1998; Foster, 2000; Horner, et al., 1994; Kiely, 1997; Metcalf and Eddy, 1995; Olsson, Newell, 1999; Schueler, 1987) ir sekojošas:

- tiek transportēts tikai notekūdeņu attīrīšanu veicošo mikroorganismu metabolismam nepieciešamais elements – skābeklis – netiek nelietderīgi izmantota enerģija citu gāzu transportam;
- daudz intensīvāks apskābekļošanas process aerācijas tvertnē – var būvēt mazāka izmēra aerācijas tvertni.



1.5.att. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmu ietekmējošie faktori

Tehniskā skābekļa aerācijas sistēmas trūkumi (AAS, s.a.; Asano, Levine, 1998; Droste, 1997; Eckenfelder, Grau, 1998; Foster, 2000; Horner, 1994; Kiely, 1997; Metcalf and Eddy, 1995; Olsson, Newell, 1999; Schueler, 1987) ir sekojoši:

- paaugstinātas aerācijas izmaksas sakarā ar:
  - skābekļa ieguvei, saspiešanu un uzglabāšanu;
  - skābekļa transportu uz NAI, un tukšo balonu transportu atpakaļ uz uzpildes vietu;
  - nepieciešamību papildināt oglekļa iznesi, lai nodrošinātu mikroorganismu metabolismu (tiem nav pieejams gaisā esošais CO<sub>2</sub>).
- samazināta gāzu plūsma (~5 reizes mazāk intensīva, nekā aerējot ar gaisu) nenodrošina notekūdeņu maisīšanu aer – nepieciešami citi risinājumi maisīšanas nodrošināšanai;
- sarežģīta aerācijas difuzoru izvietošana, lai pie nelielas gāzu plūsmas nodrošinātu vienmērīgu sajaukšanos ar notekūdeņiem.

Tehniski tīra skābekļa izmantošanas lietderība tiek izvērtēta sekojošos gadījumos (Sincero, Sincero, 2002; Vesilind, 2003, Spellman, 2009):

- ja ir ģeogrāfiskie ierobežojumi NAI izveidošanai – NAI izvietošana starp dabiskiem vai cilvēku izveidotiem tā ģeogrāfisko attīstību ierobežojošiem objektiem (piemēram, vienīgā līdzīgā vieta ar atbilstošu grunts sastāvu NAI izveidei kalnainā apvidū, vai apbūvēti, cilvēku blīvi apdzīvoti reģioni, kur nav brīvas vietas NAI būvniecībai);
- ja ir ģeogrāfiski ekonomiskie ierobežojumi NAI izveidošanai – NAI izvietošana teritorijā, kurā zemes cenas vai būvdarbu izmaksas ir ļoti augstas (piemēram, augstas cilvēku koncentrācijas un augstas ekonomiski sociālās aktivitātes areāls, kurā ir augsts pieprasījums pēc apbūves teritorijām);
- ja NAI ieplūstošo notekūdeņu K<sub>SP</sub> un BSP ir ļoti augsts, un nepieciešama ļoti intensīva un ātra to attīrīšana.

Tā kā atmosfēras gaisa izmantošana skābekļa piegādei notekūdeņiem ir visplašāk pielietota gan Latvijas, gan pasaules NAI, turpmāk tiks apskatīta tieši šāda tipa apskābekļošanas tehnoloģija. Tajā pašā laikā pētījumā iegūtās atziņas var tikt izmantotas arī tādu NAIS modelēšanai, kurās izmanto tīru skābekli.

Nozīmīgākās priekšrocības aerācijai, izmantojot gaisu kā skābekļa avotu (AAS, s.s.; Asano, Levine, 1998; Droste, 1997; Eckenfelder, Grau, 1998; Foster, 2000; Horner, et al., 1994; Kiely, 1997; Metcalf and Eddy, 1995; Olsson, Newell, 1999; Schueler, 1987; Sincero, Sincero, 2002; Vesilind, 2003, Spellman, 2009), ir sekojošas:

- nav izmaksu skābekļa ieguvei, bet ir tikai transportizmaksas tā piegādei uz aerācijas tvertni;
- gaiss nodrošina vienmērīgu un intensīvu notekūdeņu sajaukšanu – samazināta vajadzība pēc papildus jaukšanas un maisīšanas;
- daļēji nodrošināts mikroorganismu metabolismam nepieciešamais ogleklis (notekūdeņos izšķīst gaisā esošais CO<sub>2</sub>).

Tomēr jāatzīmē arī trūkumi (AAS, s.a.; Asano, 1998, Droste, 1997; Eckenfelder, Grau, 1998; Foster, 2000; Horner, et al., 1994; Kiely, 1997; Metcalf and Eddy, 1995; Olsson, Newell, 1999; Olsson, et al., 2005; Schueler, 1987; Sincero, Sincero, 2002; Vesilind, 2003, Spellman, 2009):

- tiek transportēts gan notekūdeņu attīrīšanu veicošo mikroorganismu metabolismam nepieciešamie elementi – skābeklis un ogleklis, gan arī citas gāzes (slāpekļis, inertās gāzes, u.c.) – nosacīti nelietderīgi izmantota enerģija citu gāzu transportam;

- nepieciešams ievērojams aerācijas difuzoru skaits, lai nodrošinātu gaisā esošā skābekļa vienmērīgu piegādi pa visu notekūdeņu tilpumu, līdz ar to konstruktīvi lielāka aerācijas tvertne.

#### 1.4.1. Atmosfēras gaisa sagatavošana un padeve uz aerācijas tvertni

Notekūdeņu aerācija var tikt nodrošināta gan atklātos dīķos, izmantojot augšējās aerācijas ierīces, gan arī slēgtās īpaši izbūvētās aerācijas tvertnēs, kurās ar kompresoriem nodrošina gaisa padevi.

Vienkāršākais veids, kā nodrošināt skābekļa padevi uz aerācijas tvertnēm, ir atmosfēras gaisa pievade notekūdeņiem, jo gaisā ir apmēram 21% skābekļa (Meck, s.a.; Vesilind, 2003, Spellman, 2009).

Aerāciju nodrošina, jaucot notekūdeņus ar gaisu – aerācija no augšas, vai ievadot gaisu ar paaugstinātu spiedienu notekūdeņu tilpumā – aerācija no apakšas.

Aerācija no augšas tiek nodrošināta ar jaucēja tipa aeratoriem un strūklakas tipa aeratoriem (attēli 2.pielikumā).

Aerācijai no augšas piemīt virkne priekšrocību (Wyban, Pruder, Leber, 1989; Beckermills, 2007; Jensen, Bankston, Jensen, 1989; AAS, s.a.; Lenntech, s.a.; Kayes, s.a.):

- vienkārša ekspluatācija un remonts;
- nodrošina kvalitatīvu gaisa un notekūdeņu jaukšanu;
- novērš gāzes necaurīdīgas notekūdeņu virskārtas veidošanos;
- nav nepieciešami īpaši pievades cauruļvadi – samazinātas investīcijas.

Augšējās aerācijas sistēmu galvenie trūkumi (Wyban, Pruder, Leber, 1989; Beckermills, 2007; AAS, s.a.; Lenntech, s.a.; Kayes, s.a.):

- aerācijas efektivitāte augsta tikai tieši aeratoru tuvumā – saistītajās zonās veidojas paaugstināta izšķīdušā skābekļa koncentrācija, turpretī tieši blakus šīm zonām veidojas ar skābekli nabagas zonas, kuras netiek apgādātas ar skābekli;
- salīdzinoši zema kopējā efektivitāte ( $\eta=0.5..1.5 \text{ kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ ), it īpaši salīdzinājumā ar iegremdēto difuzora tipa aeratoru efektivitāti ( $\eta=1.5..2.5 \text{ kg}\cdot\text{kWh}^{-1}$ );
- veicot intensīvu notekūdeņu jaukšanu un pat smidzināšanu, atmosfērā nokļūst notekūdeņu biodegradācijas rezultātā radušies un notekūdeņu pašu tiešie aromāti un gāzes, kas izplatās plašā areālā, un traucē citu cilvēku aktivitāšu norisi;
- sarežģīti, pat brīžiem neiespējami nodrošināt kvalitatīvu aerāciju ziemas apstākļos, kad āra gaisa temperatūra samazinās zem  $0^{\circ}\text{C}$  – veidojas sniegs un ledus, kas atdzesē notekūdeņus, samazinot mikroorganismu aktivitāti, kas savukārt traucē aerāciju un aptur biodegradācijas procesu.

Tieši augstākminēto būtisko trūkumu dēļ tajā ģeogrāfiskajā zonā, kurā atrodas Latvija, galvenokārt tiek izmantota aerācija no apakšas. Lai to nodrošinātu, nepieciešami aerācijas kompresori ar gaisa attīrīšanas ietaisēm (putekļu un citu mehānisko daļiņu atdalīšanai, kas samazina aerācijas kompresoru nodilumu), kā arī cauruļvadu sistēmu, caur kuriem gaisu ar noteiktu spiedienu pievada aerācijas tvertnēm.

NAIS visbiežāk lietojamo aerācijas kompresoru darbības principa pamatā ir Rūtsa tipa rotorkompresori (2.pielikums, 5.att.) (SuperchargersOnline, 2002).

To priekšrocības (Acme, s.a.; SuperchargersOnline, 2002):

- stabila, nemainīga gaisa plūsma ar necīgām spiediena izmaiņām;

- gandrīz lineāra sakarība starp rotācijas frekvenci, elektrisko jaudu un saspīestā gaisa parametriem (spiedienu un padevi), kas ievērojami vienkāršo automātiskās vadības algoritma uzbūvi un darbu;
- tiek nodrošināta svešu vielu (eļļas, u.c.) atdalīšana gaisa sagatavošanas procesā;
- vienkārša konstrukcija, kas nodrošina vienkāršu ekspluatāciju un remontu. To trūkumi (Acme, s.a.; SuperchargersOnline, 2002).;
- salīdzinoši dārgi, nepieciešamas paaugstinātas sākuma investīcijas;
- raksturīgas gaisa spiediena pulsācijas;
- augsts vibrāciju un trokšņu līmenis.

Latvijas NAIS nereti tiek lietoti arī centrālās kompresori. To priekšrocības (Hubbard, 2010):

- salīdzinoši lēti;
- garš starpremontu un tehnisko apskašu periods;
- zems vibrāciju līmenis;
- no eļļojošo materiālu plūsmas pilnīgi nodalīta gaisa padeves sistēma;
- nav spiediena pulsāciju;
- vienkārša konstrukcija, kas nodrošina vienkāršu ekspluatāciju un remontu.

To trūkumi(Hubbard, 2010):

- nelineārās spiediena/ražīguma raksturlīknes dēļ saspīestā gaisa parametri nav stabili, tie būtiski mainās, mainoties gan cauruļvadu pneimatiskajai pretestībai (piemēram, aerācijas difuzoru poru aizsērēšana), gan kompresorā iesūktā gaisa fizikālajiem parametriem;
- nelineārās spiediena/ražīguma raksturlīknes dēļ sarežģīta automātiskās vadība, lai nodrošinātu nemainīgus saspīestā gaisa parametrus – papildus izmaksas.

Darbā tiek analizēta aerācijas sistēma ar rotorkompresoriem, tomēr, pielietojot centrālās kompresoru raksturlīknes, iegūtos modeļus var izmantot arī centrālās kompresoru aerācijas sistēmu automātiskās vadības simulācijai un optimizācijai.

#### 1.4.2. Gaisa sadale un piegāde notekūdeņu aerācijas zonā

Ļoti būtiska loma aerācijas efektīvas un kvalitatīvas darbības nodrošināšanā ir ierīcēm, ar kurām notiek uz aerācijas tvertni piegādātā gaisa un tajā esošā skābekļa vienmērīga sadale un piegāde visā aerācijas tvertnes tilpumā. Pareiza šo ierīču izvēle un ekspluatācija nodrošina homogēnu mikrobioloģisko vidi aerācijas tvertnē, kā arī vienmērīgu biodegradācijas procesu un minimāli stresainus aktīvo dūņu mikroorganismu dzīves apstākļus.

Modernajās NAI tiek lietoti galvenokārt difuzora tipa aeratori, kas nodrošina sekojošas svarīgas aerācijas ierīcēm nepieciešamas funkcijas (AAS, s.a.; Environmental Dynamics, 2008; Flygt, 2010; SSI, 2005; Mueller, Boyle, Pöpel, 2002; USEPA, 2002; Wang, Yung-Tse, Shamma, 2007):

- pašattīrīšanos (caurplūstošais gaiss attīra aeratoru poras no mehāniskiem nosprostojumiem);
- pašnoslēgšanos (samazinot gaisa spiedienu, suspendētās daļiņas aizver difuzoru poras, nepieļaujot ūdens iekļūšanu gaisa padeves cauruļvados);
- maza izmēra gaisa burbulīšu rašanos, gaisam izplūstot no difuzora, kas ļauj būtiski palielināt izplūstošā gaisa un notekūdeņu saskares laukumu, tā nodrošinot:
  - augsti efektīvu gaisa skābekļa izšķīšanu notekūdeņos;



- mikroorganismu metaboliskās aktivitātes procesā radušos gāzu difūziju no notekūdeņiem uz gaisa burbulīšiem un šo gāzu izvadīšanu atmosfērā;
  - līdz pat 50% enerģijas ietaupījums daudz efektīvākas skābekļa šķīdības dēļ.
- Membrānas tipa difuzoru un keramiskās virsmas difuzoru uzbūve un darbība parādīta 2.pielikuma 5. un 6.att.

Vienmērīgai gaisa padevei pa visu notekūdeņu tilpumu difuzoru tīkls tiek izvietots aerācijas tvertnes dibenā (2.pielikuma 7.att.)

Difuzoru sistēmām piemīt arī trūkumi, kas jāņem vērā, projektējot un ekspluatējot NAI (Environmental Dynamics, 2008; Flygt, 2010; SSI, 2005; Mueller, Boyle, Pöpel, 2002; USEPA, 2002; Wang, Yung-Tse, Shammass, 2007):

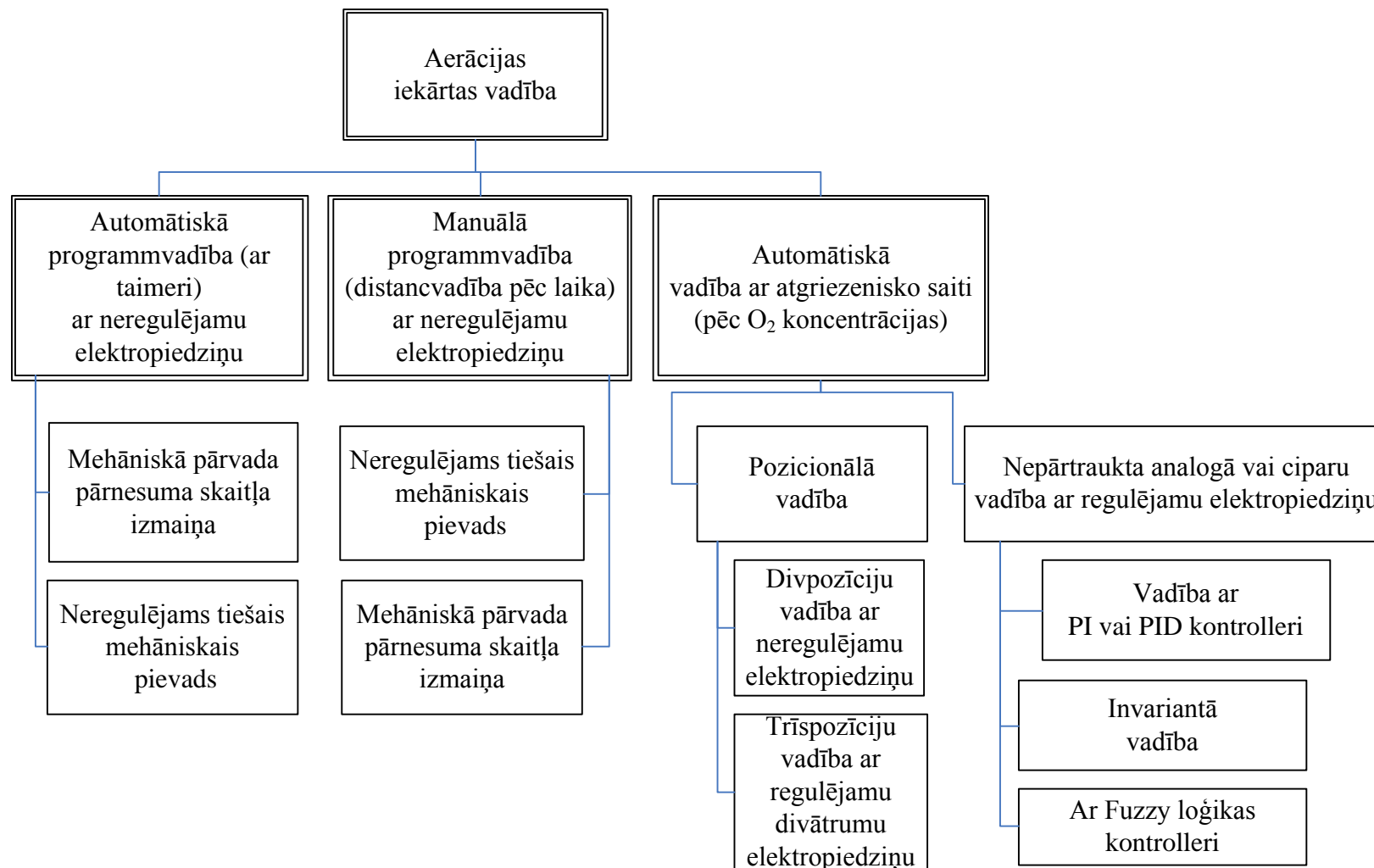
- difuzoru poru aizsērēšana nepieciešamas aerācijas un gaisa spiediena dēļ;
- lieli spiediena zudumi hidrauliskās un pneimatiskās pretestības dēļ – nepieciešamība pēc lieljaudas kompresoriem;
- membrānas viegli bojājas nelielu pārspiedienu dēļ – paaugstinātas prasības pēc spiediena stabilitātes;
- notekūdeņos esošās ķīmiskās vielas var šķīdināt membrānas – sevišķi paaugstināta sārmainība vai skābuma līmenis;
- difuzori efektīvi apskābekļo tad, ja gaisa plūsma caur tiem ir ar nelielu ātrumu, līdz ar to lielu notekūdeņu plūsmu gadījumā nepieciešams paaugstināts difuzoru skaits un to nokļājuma intensitāte aerācijas tvertnes dibenā;
- sīkdispersa gaisa ievadīšana notekūdeņos un paaugstināta gaisā esošā skābekļa šķīdība samazina notekūdeņu maisīšanas efektivitāti;
- regulārai difuzoru tīrīšanai nepieciešams tīrs ūdens, kas paaugstina NAI operatīvās izmaksas.

#### 1.4.3. Aerācijas iekārtas vadības metodes ietekme uz skābekļa pārnesei

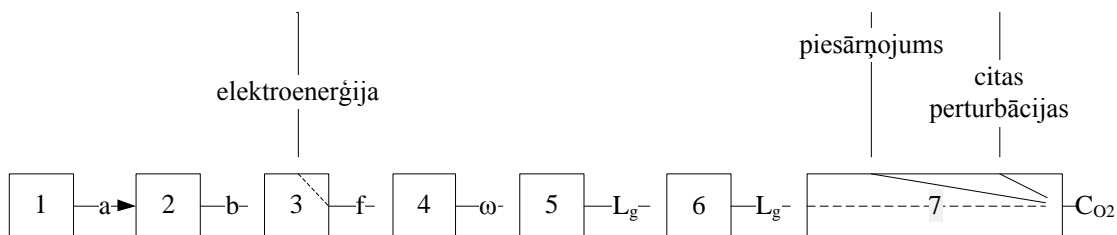
Aerācijas iekārtu vadība tiek reducēta uz aerācijas sistēmas kompresora elektrodzinēja vadības principa izvēli (aerācijas kompresora vadības principu topoloģija dota 1.6.att.).

Aerācijas kompresora piedziņas risinājumi var būt dažādi – gan tiešā palaišana, gan t.s. „mīkstā” palaišana, izmantojot Y/Δ komutācijas režīmu, un tālāka tiešā barošana no tīkla, gan arī palaišana un barošana, izmantojot vadāmu frekvenču pārveidotāju, kas nodrošina gan palaišanas, gan darba režīmus, gan arī ļauj bezpakāpju režīmā mainīt aerācijas kompresora ražīgumu (Bolles, 2011; Dzelzītis, 2005; Olsson, et al., 2005; Thompson, Song, Lekov, s.a.; Rosen, Olsson, 2002; Spellman, 2009; Vesilind, 2003; Шнидерс, 2002).

Vienkāršākās Latvijas NAI pielietotās NAIS vadības sistēmas blokshēma parādīta 1.7.attēlā. Tā ir atvērta tipa aerācijas tiešās vadības sistēma, izmantojot aerācijas kompresoru tiešās piedziņas sistēmu ar asinhrono elektrodzinēju. Elektrodzinēja vadība notiek vai nu manuāli (vadības aparāturu vada cilvēks – operators), vai izmantojot automātisko programvadību ar noteiktu darbības algoritmu kā laika funkciju. Vadības laikā netiek saņemta informācija par aerācijas tvertnē notiekošiem procesiem. Šādu principu ilgstoši izmanto, piemēram, Preiļu NAI (gan pirms rekonstrukcijas – operatora vadīts process, gan pēc rekonstrukcijas – programmējamie mikrokontrolleri darbojas kā laika releji) un Gulbenes NAI.



1.6.att. Aerācijas kompresora vadības topoloģija



**1.7.att. Atvērtās notekūdeņu aerācijas vadības sistēmas bez atgriezeniskās saites blokhēma**

1 – operators vai programaparāts (laika relejs), 2 – komutācijas ierīce, 3 – jaudas komutācija, 4 – asinhronais elektrodzinējs, 5 – aerācijas kompresors, 6 – gaisa sadales iekārta, 7 – aerācijas tvertne, a – vadības signāls, b – jaudas signāls, f – barošanas tīkla frekvence,  $\omega$  – aerācijas kompresora rotācijas frekvence

Manuālās programvadības gadījumā aerācijas kompresora elektrodzinēja vadību veic operators, izmantojot noteiktu kompresora piedziņas elektrodzinēja stāvokļu laika grafiku.

Šo laika grafiku sastāda, balstoties uz mērījumiem par gaisa padeves nepieciešamību aerācijas tvertnē atbilstoši notekūdeņu pieplūdes intensitātei un piesārņojuma līmenim. Šo vadības metodi lieto tad, kad nav iespēju automatizēt aerācijas vadību – galvenokārt līdzekļu trūkuma dēļ.

Manuālās programvadības galvenie trūkumi:

- cilvēka – operatora subjektīvais faktors – programvadības grafika (algoritma) izpildes kvalitāti ietekmē daudzi subjektīvi faktori (kavēta grafika izpilde vai pat tā neizpilde aizņemtības, slimības vai nolaidības dēļ);
- nav atgriezeniskās saites no aerācijas tvertnes par skābekļa nepieciešamību.

Tādējādi programvadības grafikā paredzētais aerācijas režīms konkrētā laikā var būtiski atšķirties no šobrīd notekūdeņu attīrīšanai nepieciešamā aerācijas režīma, jo ir notikušas būtiskas ar notekūdeņu kvalitatīvajiem un kvantitatīvajiem rādītājiem, kā arī ar notekūdeņu attīrīšanas ietaišu tehnoloģiskajiem parametriem saistītas izmaiņas, kuras netiek ņemtas vērā (novecojis programvadības grafiks).

Manuālās programvadības izmantošana ir pieļaujama tikai avārijas apstākļos, ja nestrādā automātiskā programvadība (tad iespējama arī manuāla regulējamās elektropiedziņas vadība), vai arī NAI ar skaidri definētiem, nemainīgiem (ar vairākkārtīgiem mērījumiem pārbaudītiem) darba režīmiem.

Izmantojot automatizācijas pirmā līmeņa uzlabojumu – manuālo vadību aizstājot ar automātisko divpozīciju programvadību, kura darbojas pēc iestatīta laika grafika, un nodrošina kompresora elektrodzinēja ieslēgšanu un izslēgšanu pēc noteiktiem laikiem, tiek novērsts manuālās programvadības galvenais trūkums – subjektīvā faktora ietekme, tajā pašā laikā saglabājot pārējos trūkumus, it īpaši nespēju nodrošināt aerācijas kvalitāti, un parādot ļoti zemu energoefektivitāti. To apliecina arī turpmākajās nodaļās atspoguļotie autora veiktie pētījumi.

Viens no populārākajiem moderno NAI aerācijas vadības principiem, kura realizācijā novērsts atgriezeniskās saites trūkums no aerācijas tvertnes – tiek mērīts no aerācijas tvertnes izplūstošajos notekūdeņos izšķīdušā skābekļa līmenis, un izmantojot šo signālu, tiek vadīts aerācijas kompresora elektrodzinējs (Rosen, Olsson, 1998; Smith, s.a.; Sniders, 1997; Ollson, Stephenson, Chapman, 1986; Laizāns, Šnīders, 2008; Ferrer 1998; Haimi, et al., s.a.; Vesilind, 2003; Siemens, s.a.; Spellman, 2009; Stone, s.a.).

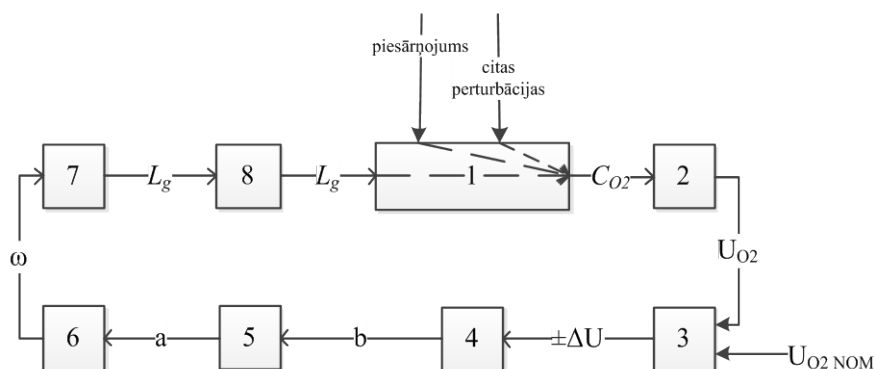
Vadības principa priekšrocība – no aerācijas tvertnes izplūstošajos notekūdeņos izšķīdušā skābekļa līmenis netieši rāda notekūdeņu attīrīšanas pakāpi.

Tā trūkums – mērot skābekļa līmeni izplūstošajos notekūdeņos un pēc tā vadot aerācijas kompresoru, nav iespējams pietiekoši kvalitatīvi kompensēt lēcienveida slodzes pieaugumu aerācijas tvertnes ieplūdē.

Aerācijas kompresora elektrodzinēja vadība, izmantojot atgriezenisko saiti, tiek veikta divos veidos (Rosen, Olsson, 1998; Smith, s.a.; Sniders, 1997; Ollson, Stephenson, Chapman, 1986; Laizāns, Šnīders, 2008; Ferrer, 1998; Haimi, et al., s.a.; Vesilind, 2003, Siemens, s.a.; Spellman, 2009.):

- neregulējamas elektropiedziņas automātiskā vadība ar atgriezenisko saiti – aerācijas kompresors ieslēgts ar pilnu jaudu, ja izplūstošajos notekūdeņos izšķīdušā skābekļa līmenis ir zemāks nekā nepieciešamais (parasti tas tiek iestatīts  $1.5...3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), un izslēgts, kad izplūstošajos notekūdeņos izšķīdušā skābekļa līmenis ir augstāks nekā nepieciešamais;
- regulējamas elektropiedziņas automātiskā vadība ar atgriezenisko saiti – pēc noteikta likuma izmainot gaisa padevi uz aerācijas tvertni atbilstoši izplūstošajos notekūdeņos izšķīdušā skābekļa līmenim (parasti tiek mainīta aerācijas kompresora rotācijas frekvence, bet iespējama arī plūsmas droselēšana ar vadāmiem aizvāriem).

NAIS vadības sistēmas blokshēma, kurā tiek izmantota atgriezeniskā saite ar informāciju par skābekļa koncentrāciju aerācijas tvertnē, un aerācijas kompresora divpozīciju vadību, parādīta 1.8.attēlā.



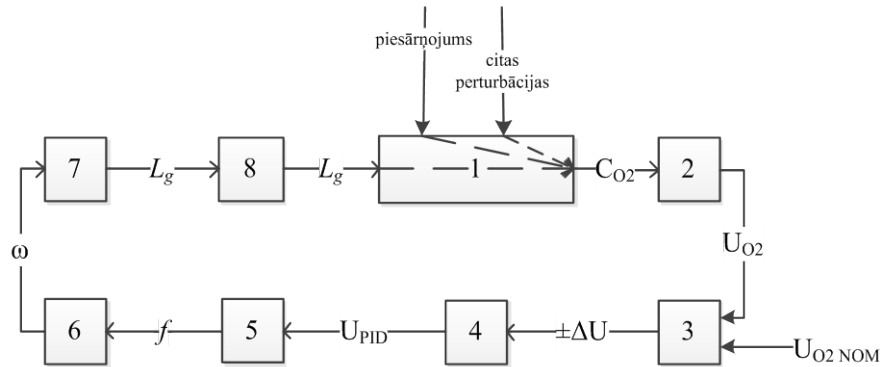
**1.8.att. Notekūdeņu aerācijas vadības sistēmas ar atgriezenisko saiti no aerācijas tvertnes, tiešo piedziņu un divpozīciju vadību blokshēma**

1 – aerācijas tvertne, 2 – skābekļa koncentrācijas sensors, 3 – mērīšanas pārveidotāja un atbalstsignāla salīdzināšanas shēma, 4 – vadības ierīce (darba režīmi „Ieslēgts”/”Izslēgts”, 5 – jaudas slēdzis, 6 – asinhronais dzinējs, 7 – aerācijas kompresors, 8 – gaisa sadales iekārta

Ir zināmas notekūdeņu aerācijas sistēmas ar integrēto vadību, kas satur skābekļa koncentrācijas sensoru, gaisa kompresoru ar frekvenču pārveidotāju un regulējamo asinhrono elektropiedziņu, un PID vadības iekārtu (Dzelzītis, 2005; Spellman2009; Vesilind 2003).

NAIS vadības sistēmas blokshēma, kurā tiek izmantota atgriezeniskā saite ar informāciju par skābekļa koncentrāciju aerācijas tvertnē, un aerācijas kompresora frekvenču vadību, parādīta 1.9.attēlā.

Tās galvenais trūkums – netiek nodrošināta galveno perturbāciju (notekūdeņu pieplūdes daudzums un bioloģiskā skābekļa patēriņš) iespaids uz atmosfēras skābekļa pārneses procesu notekūdeņu aerācijas tvertnē apsteidzošā kompensācija.

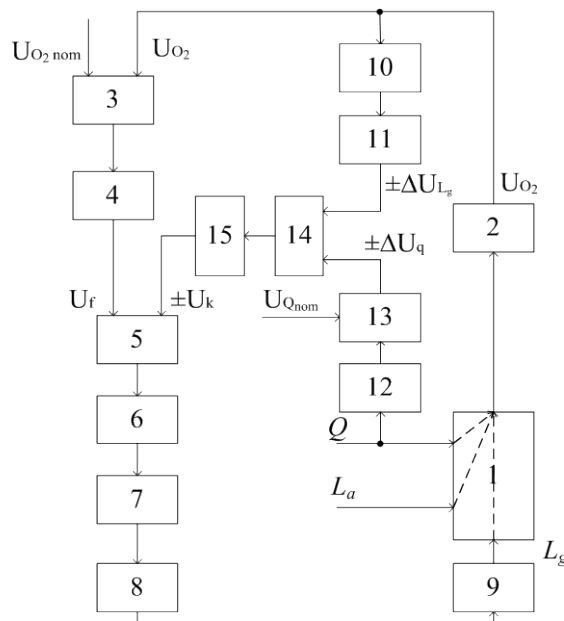


**1.9.att. Notekūdeņu aerācijas vadības sistēmas ar atgriezenisko saiti no aerācijas tvertnes, PID vadības bloku un frekvenču pārveidotāju blokshēma**

1 – aerācijas tvertne, 2 – skābekļa koncentrācijas sensors, 3 – mērīšanas pārveidotāja un atbalsts signāla salīdzināšanas shēma, 4 – PID kontrolle, 5 – frekvenču pārveidotājs, 6 – asinhronais dzinējs, 7 – aerācijas kompresors, 8 – gaisa sadales iekārta,  $f$  – barošanas tīkla frekvence,  $\omega$  – aerācijas kompresora rotācijas frekvence.

Lai paaugstināt notekūdeņu aerācijas procesa norises kvalitāti un energoefektivitāti, jāizmanto notekūdeņu aerācijas iekārtas kvaziinvariantās vadības principu.

Notekūdeņu aerācijas kvaziinvariantā vadības sistēmas blokshēma parādīta 1.10.attēlā (šo vadības principu aizsargā LR patents (Laizāns, Šnīders, Greivulis, 2009).



**1.10.att. Notekūdeņu aerācijas kvaziinvariantās sistēmas blokshēma (Laizāns, Šnīders, Greivulis, 2009)**

1 – aerācijas tvertne, 2 – skābekļa koncentrācijas sensors, 3 – pirmā diferencējošā shēma, 4 – PID kontrolle, 5 – pirmais summators, 6 – frekvenču pārveidotājs, 7 – asinhronais dzinējs, 8 – kompresors, 9 – gaisa sadales iekārta, 10 – diferencējošā ķēde, 11 – signāla ierobežotājs, 12 – notekūdeņu pieplūdes sensors, 13 – otrā diferencējošā shēma, 14 – otrais summators, 15 – kompensācijas shēma

Tā satur aerācijas tvertni ar gaisa sadales iekārtu, skābekļa koncentrācijas sensoru, PID kontrolle, frekvenču pārveidotāju un gaisa kompresoru ar asinhronā dzinēja piedziņu. Virknē starp PID kontrolle un frekvenču pārveidotāju slēgts pirmais summators, kura vienai ieejai pievienota PID kontrolle izeja, bet otrai ieejai pievienota kompensācijas shēmas izeja ar otro summatoru ieejā. Otrā summatora vienai

ieejai pievienota otrā diferenciālā shēma ar notekūdeņu plūsmas sensoru ieejā, bet otrai ieejai pievienota diferencējošā ķēde ar izejas signāla ierobežotāju. Diferencējošās ķēdes ieeja pievienota skābekļa koncentrācijas sensora izejai un pirmās diferencējošās shēmas ieejai.

Galvenie resursi enerģijas taupīšanā NAI operatīvajā darbībā ir sekojoši (Carns, 2005):

- izlīdzinot notekūdeņu slodzi diennakts garumā – problemātiski realizējams, jo nepieciešamas liela izmēra notekūdeņu uzkrāšanas tvertnes, kas amortizē maksimuma stundu pieplūdi, un nodrošina pastāvīgu un optimālu NAI noslodzi – 10..15% ekonomija;
- frekvenču regulējamās elektropiedziņas ieviešana un mazefektīvu elektrodzinēju nomaiņa ar ekonomiskiem dzinējiem – 5..15% ekonomija (dažos Latvijas NAI konstatēta pat 300% aerācijas kompresoru elektrodzinēju jaudas rezerve);
- procesu optimizācija un uzlabotas procesu vadība (piemēram, ieviešot mazāku izplūstošajos notekūdeņos pieļaujamo izšķīdušā skābekļa koncentrāciju) – 10..20%.

Tehnoloģiskie risinājumi NAI aerācijas sistēmās, un to ietekme uz enerģijas ekonomiju (Carns, 2005):

- kvalitatīvu aerācijas difuzoru ieviešana aerācijas sistēmā – ekonomija 37..55 kWh uz katrām 1000 m<sup>3</sup> notekūdeņu;
- izšķīdušā skābekļa mērīšanas ierīces uzstādīšana divpozīciju programvadības sistēmā – ekonomija 13..26 kWh uz katrām 1000 m<sup>3</sup> notekūdeņu;
- aerācijas kompresoru automātiskās frekvenču regulējamās elektropiedziņas vadības sistēmas uzstādīšana – ekonomija 26..40 kWh uz katrām 1000 m<sup>3</sup> notekūdeņu;
- energoefektīvu aerācijas kompresoru izmantošana – ekonomija 26..40 kWh uz katrām 1000 m<sup>3</sup> notekūdeņu.

### **1.5. Ārējās vides faktoru ietekme uz skābekļa izmantošanas efektivitāti**

Ārējās vides apstākļi, kas ietekmē skābekļa izmantošanas efektivitāti, ir sekojoši:

- nokrišņu daudzums un apjoms NAI darbības reģionā – izmaina notekūdeņu koncentrāciju un sastāvu, liekot aktīvo dūņu struktūrai pārkārtoties atbilstoši šiem parametriem;
- sezonālitate gadalaiku griezumā – izmainās temperatūras un nokrišņu režīmi, ietekmējot aktīvo dūņu mikroorganismu metabolismu;
- sezonālitate darba dienu un brīvdienu (svētku dienu) griezumā – izmainās notekūdeņu parametri gan nedēļas dienu ritmā (5 darba dienas un 2 brīvdienas ar dažādu amonija sāļu un organisko atkritumu ieplūdes cikliskuma režīmu);
- sezonālitate ikdienas režīmā – 24 stundu ciklā, kurā mainās cilvēku aktivitāte un notekūdeņu kvalitatīvie un kvantitatīvie rādītāji;
- gaisa sastāvs un tā izmaiņas gan gada, gan nedēļas, gan arī diennakts laikā – skābekļa koncentrācija tajā.

Jāņem vērā, ka ārējo faktoru ietekmē skābekļa izmantošanas efektivitāte mainās plašā diapazonā, un, summējoties dažādiem faktoriem, var atšķirties pat līdzīgos ārējos apstākļos.

Notekūdeņu aerācijas tvertnes tehnoloģiskie un tehniskie parametri, kas ietekmē skābekļa izmantošanas efektivitāti:

- notekūdeņu aerācijas difuzora iegremdēšanas dziļums, kas ietekmē no aerācijas sistēmas notekūdeņos izplūdušā gaisa burbulīša saskares ilgumu ar notekūdeņiem, un tajā esošā skābekļa izšķīšanu – jo lielāks iegremdēšanas dziļums, jo augstāka skābekļa izšķīšanas pakāpe.
- notekūdeņu caurplūdes ātrums caur aerācijas tvertni, kā arī difuzoru konstrukcija un izvietojums – jo lielāks difuzoru izvietojuma blīvums, jo vienmērīgāks gaisa sadalījums pa notekūdeņu tilpumu un labāka notekūdeņu apskābekļošana.

## 1.6. Skābekļa pārnese procesu ietekmējošie faktori

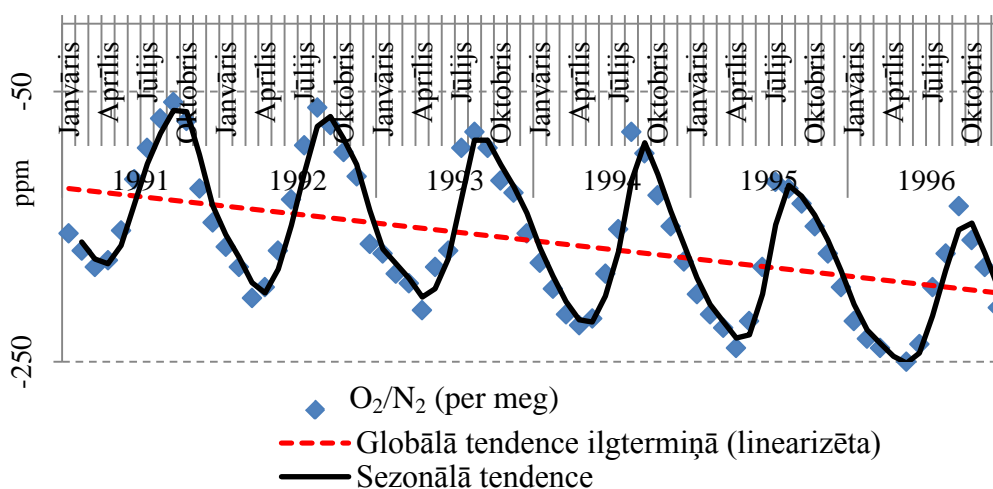
Lai sastādītu skābekļa pārnese procesa analītisko modeli notekūdeņu aerācijas ietaisēs, tika apkopota un izanalizēta zinātniskā informācija par fizikālajiem procesiem, kas ietekmē skābekļa koncentrācijas izmaiņas notekūdeņos.

### 1.6.1. Skābekļa koncentrācijas pievadītajā gāzu maisījumā ietekme

Vispārīgā gadījumā skābekli aerācijas tvertnē piegādā divos veidos – vai nu veidojot mākslīgu gāzu maisījumu – pievadot tehnisko skābekli (koncentrācija 99.7%), vai arī pievadot atmosfēras gaisu (izmantojot gatavu dabisku gāzu maisījumu) (skat. 1.3. nod.).

Pētījumi par skābekļa koncentrāciju gaisā apliecina, ka tai ir sezonāls raksturs. Kā iemeslus šai sezonālībai var minēt augu fotosintēzes procesa izmaiņas ziemas–vasaras sezonā, skābekļa šķīdības pieaugumu ziemas periodā, kā arī cilvēku industriālās darbības izmaiņas (skābekļa izmantošana kurināmā sadedzināšanai rudens – ziemas periodā) (Moiseeva, 1995; Keeling, McEvoy, Manning, 1998). Vidējā skābekļa koncentrācija gaisā ir 20.97% pēc tilpuma un 23% pēc masas (Мануйлов, s.a.).

Grafiski skābekļa koncentrācijas gaisā sezonālībai parādīta 1.11.attēlā (pēc Princetown University studies, s.a.; BIO2 International, s.a.). Tajā parādīta skābekļa O<sub>2</sub> un slāpekļa N<sub>2</sub> relatīvās attiecības izmaiņa pret pieņemto attiecības atskaites sistēmu  $(O_2/N_2/(O_2/N_2)^{ref}) \cdot 10^6$ .



1.11.att. Skābekļa koncentrācijas izmaiņas atmosfērā (pēc BIO2 International, s.a.)

Uz 2006.gada martu – aprīli  $O_2/N_2$  ir nokritis jau uz  $-400$  ppm. Tiek lēsts, ka fosilā kurināmā izmantošanas dēļ atmosfēra katru gadu zaudē ap  $3 \cdot 10^9$  tonnas  $O_2$  (NOAA, 2010).

Pētījumi (BIO2 International, s.a.) apstiprina arī pieņēmumu par to, ka cilvēku intensīvi apdzīvotā vidē – lielpilsētās, skābekļa koncentrācija gaisā ir ievērojami mazāka, nekā neurbanizētā vidē – mežos, u.c.

Skābekļa koncentrācijas gaisā izmaiņas ir pietiekami būtiskas, un tiks izmantotas skābekļa pārneses analītiskās izteiksmes izveidē, lai ievērtētu to ietekmi uz aerācijas procesu.

### 1.6.2. Ūdens temperatūras ietekme uz skābekļa šķīdību

Skābekļa šķīšana ūdenī ir fizikāls process, kuru ietekmē ūdens un skābekļa temperatūra. Eksperimentālie pētījumi rāda, ka atvērtas tilpnes ūdenī ar temperatūru  $21^\circ C$  (vasaras režīms), parastos apstākļos ir izšķīduši  $13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  slāpekļa  $N_2$ ,  $9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  skābekļa  $O_2$ , un  $35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  oglekļa dioksīda  $CO_2$ . (Meck, s.a.; Mack, s.a.). Mainoties ūdens temperatūrai, mainās visu gāzu, arī ūdenī izšķīdušā skābekļa, piesātinājuma līmenis (Colby, s.a.; Colt, 1984). Parastos apstākļos līdz ar temperatūras pieaugumu samazinās gaisa sastāvā esošo gāzu šķīdība ūdenī (Colt, 1984; FAO, 1998)).

Maksimāli iespējamo skābekļa koncentrāciju ūdenī parasti nosaka pēc sagatavotām tabulām, kas iegūtas galvenokārt no eksperimentāliem datiem (Colt; 1984; YSI, s.a.). Analītisko formulu ir ievērojami mazāk (Truesdale, Downing, 1954; Weiss, 1970, Garcia, Gordon, 1992; Tromans, 2000). Viena no veiksmīgākajām temperatūru ievērtējošām analītiskām izteiksmēm, ar kuru var aprēķināt maksimāli iespējamo skābekļa koncentrāciju noteiktas temperatūras ūdenī, izmanto nelineāru polinomiālu sakarību (Šnīders, 2003; Sniders, 2004):

$$C_s(\Theta) = 0.0025 \cdot \Theta^2 - 0.3 \cdot \Theta + 14.2 \quad (1.4)$$

kur  $C_s(\Theta)$  – skābekļa šķīdība ūdenī,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

$\Theta$  – ūdens temperatūra,  $^\circ C$ .

Autora veikta korelatīvā analīze rāda, ka šī izteiksme pietiekoši kvalitatīvi apraksta šķīdības procesa izmaiņas temperatūras iespaidā ( $R^2=0.97$ , izmantojot izejas datus no (Colt, 1984)), tomēr tā neprecīzi apraksta šķīšanas laikā notiekošos procesus.

### 1.6.3. Notekūdeņu sāļainības ietekme uz skābekļa šķīdību

Notekūdeņi nav tīrs ūdens, tas drīzāk ir dažādu sāļu šķīdums ūdenī, kopā ar suspendētām nešķīstošām daļiņām un dzīvīem organismiem. Pētījumi rāda, ka maksimālo skābekļa piesātinājuma līmeni notekūdeņos nosaka tajos izšķīdušo sāļu daudzums – pieaugot sāļainībai, samazinās skābekļa piesātinājuma līmenis (Colt, 1984).

Tāpēc aprēķinos pieņem īpašu bezdimensiju koeficientu, kuram būtu jāievērtē visu ārējo faktoru iedarbību un jāparāda notekūdeņu fizikālo īpašību atšķirību no tīra ūdens (YSI, s.a.). Tomēr šāda pieeja neļauj novērtēt izmaiņas, kas notiek notekūdeņos dažādu sāļu sastāva un koncentrācijas dēļ, kā arī neievērtē konkrētas NAI specifiku.

Pētījumi (Mack, s.a.; Han, 2002) rāda, ka skābekļa šķīdību sāļainā ūdenī apraksta sekojoša sakarība:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = \sum_{i=1}^n K_i C_i, \quad (1.5)$$



G50

kur  $C_0$  – skābekļa koncentrācija tīrā ūdenī,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  
 $i$  – jona kārtas skaitlis,  
 $K_i$  – semiempīriskā  $i$ -tā jona konstante,  
 $c_i$  –  $i$ -tā jona molaritāte ūdens šķīdumā,  
 $C$  – skābekļa koncentrācija ūdenī, kurā izšķīdināti  $i$  joni,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Dažu notekūdeņos visizplatītāko sāļu jonu konstantes dotas 1.1.tabulā (Ahmad,s.a., Han, 2002; Гройсман, Хомутов, 1990).

No tabulas redzams, ka skābekļa šķīdība būtiski atšķiras tīrā ūdenī un notekūdeņos to sāļainības dēļ, līdz ar to ir nepieciešams ievērtēt arī šo parametru, lai izveidotu notekūdeņu aerācijas augstas kvalitātes vadības sistēmu.

Jāvērtē arī izšķīdušo sāļu sastāvs, kas ir atšķirīgs katrai NAI, un tam ir atšķirīga dinamika un izteikta sezonālitate (diennakts, nedēļas, gadalaika), jo dažādi sāļi dažādi ietekmē skābekļa šķīdību.

Neveicot vadības algoritma darbības korekciju, regulēšanas precizitātes kļūda tikai sāļainības dēļ vien būs 2..4% vidēja piesārņojuma diapazonā, un būtiski pieaugs ekstrēmo maksimuma stundu piesārņojumu gadījumā, kad piesārņojums 2..3 reizes pārsniedz vidējo.

1.1.tabula

**Šķīšanas konstantes  $K_i$  vērtības izplatītāko sāļu joniem, un to koncentrācijas  $c_i$  diapazons notekūdeņos**

<i>Jons <math>i</math></i>	$K_i$	$c_i, \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
$\text{NH}_4^+$	0.033	
$\text{K}^+$	0.099	7–15
$\text{Na}^+$	0.107	40–70
$\text{Zn}^{2+}$	0.108	
$\text{Mg}^{2+}$	0.119	15–40
$\text{Ca}^{2+}$	ND	15–40
$\text{NH}_3$	0.007	
$\text{NO}_3^-$	0.013	
$\text{Cl}^-$	0.029	20–50
$\text{HSO}_4^-$	0.069	
$\text{OH}^-$	0.081	100–250
$\text{HCO}_3^-$	0.083	
$\text{SO}_4^{2-}$	0.121	15–30
$\text{PO}_4^{3-}$	ND	20–40
Kopējais slāpeklis $\text{N}^-$	ND	20–40
Kopējie izšķīdušie sāļi	ND	100 – 300

ND – dati nav pieejami

#### 1.6.4. Atmosfēras gaisa spiediena un temperatūras kompleksā ietekme

Pētījumi (Colt, 1984) rāda, ka atmosfēras gaisa spiediens ietekmē skābekļa šķīdību – līdz ar spiediena samazinājumu samazinās skābekļa šķīdības piesātinājuma līmenis. Lai noskaidrotu spiediena un temperatūras savstarpējo mijiedarbību, tika veikti padziļināti fizikālā šķīdības procesa teorētiskie pētījumi.

Gāzu šķīdību nosaka Henri izteiksme (Broecker, Peng, 1982):

$$C_x = p_x \cdot k_H^x, \quad (1.6)$$

kur  $C_x$  – gāzes šķīdība,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $k_H^x$  – Henri konstante gāzei x noteiktā temperatūrā,  $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot \text{Pa}^{-1}$ ;  
 $p_x$  – gāzes x parciālais spiediens, Pa.

Tā kā netika atrasta analītiska izteiksme Henri konstantei skābekļa šķīšanas procesam ūdenī, Henri konstante tika aizvietota ar Bunzena koeficientu (Broecker, Peng, 1982):

$$k_H^x = A \cdot N_A \cdot \alpha^x, \quad (1.7)$$

kur  $N_A$  – Avogadro skaitlis,  $\text{mol}^{-1}$ ;  
 $A$  – gāzes blīvumu ievērtējošs koeficients;  
 $\alpha^x$  – Bunzena koeficients gāzei noteiktā temperatūrā,  $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Bunzena koeficients, tāpat kā Henri konstante, ir nelineārs, no gāzes temperatūras un sastāva atkarīgs lielums (Weiss 1970), tomēr pieejamajā literatūrā netika atrasta ne Henri konstantes, ne arī Bunzena koeficienta analītisko sakarību aprakstoša izteiksme skābeklim.

Izmantojot Bunzena koeficient izteiksmi, tika iegūta jauna gāzu šķīdības izteiksme:

$$C_x = p_x \cdot A \cdot N_A \cdot \alpha^x. \quad (1.8)$$

Gāzes spiediena ietekmi uz tās šķīdību nosaka modificēta Henri likuma izteiksme (Broecker, Peng, 1982; Sawyer, McCarty, 1978):

$$C_1 \cdot p_1^{-1} = C_2 \cdot p_2^{-1}, \quad (1.9)$$

kur  $C_1$  un  $C_2$  – gāzes šķīdības,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $p_1$  un  $p_2$  – gāzes spiedieni, Pa.

### 1.6.5. Notekūdeņu blīvuma ietekme uz skābekļa šķīdību

Aerācijas tvertnē gaisa padevei ir jābūt ar paaugstinātu spiedienu, ja aerācija notiek no tvertnes apakšas. Lai aerācijas sistēmas gaisa kompresors varētu pārvarēt ūdens pretspiedienu aerācijas tvertnē, tam jāattīsta spiediens, kas papildus atmosfēras spiedienam nedaudz pārsniedz ūdens spiedienu dziļumā  $h$ , piemēram, ja aerācijas difuzoru iegremdēšanas dziļums  $h=4$  m, aerācijas kompresoram jāattīsta spiediens ne mazāks kā  $p=400$  mbar. To nosaka spiediena un aeratora iegremdēšanas dziļuma sakarība (Han, 2002):

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h, \quad (1.10)$$

kur  $p_h$  – ūdens staba spiediens, Pa;  
 $\rho$  – ūdens blīvums,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $h$  – ūdens staba augstums (aerācijas difuzoru iegremdēšanas dziļums), m;  
 $g$  – gravitācijas konstante,  $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Kā var redzēt no (1.10) izteiksmes, ūdens blīvuma izmaiņa ietekmē aerācijas kompresoram attīstāmā spiediena lielumu. Vienlaicīgi jāņem vērā tas, ka viena no fizikālajām īpašībām, ar kurām ūdens atšķiras no citiem šķīdumiem, ir tā blīvuma nelineārās izmaiņas temperatūras iespaidā. Šo ietekmi neapskata neviens no pieejamajiem skābekļa šķīdības modeļiem.

## 1.7. Turpmāko pētījumu pamatojums, struktūra un metodika

Pieejamo informācijas avotu un zinātnisko pētījumu analīze liecina, ka līdzšinējie pētījumi notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas elementu jomā ir plaši, tomēr trūkst vienota viedokļa un izpratnes par aerācijas tvertnes dinamisko raksturu, un to, kā dažādi vadības principi un procesi ietekmē aerācijas kvalitāti un energoefektivitāti. Aerācijas tvertnē notiekošais tiek analizēts galvenokārt saistībā ar bioloģiskajiem procesiem, bet tehnisko un tehnoloģisko risinājumu iespaida pētījumu ir maz. Nav izpētīta regulējošās iedarbes un perturbācijas inerces un jutības rādītāju savstarpējā mijiedarbība un to mainīgā daba. Netiek piedāvāti tehniski risinājumi kvalitatīvai un energoefektīvai aerācijas kompresoru vadībai, kas ievērtē aerācijas tvertnes dinamiku.

Pētījumi par skābekļa šķīdību ūdenī ir veikti, apskatot dažādu faktoru individuālo iedarbi, bet trūkst to kompleksu iedarbi vienojošas skābekļa šķīdību notekūdeņos aprakstošas analītiskas sakarības.

Tādēļ jāveic padziļināti pētījumi aerācijas inženiersistēmas dinamisko nestacionāro parametru pētīšanai, un skābekļa šķīdības procesa analītiskai pētīšanai, lai būtu iespējams piedāvāt NAIS vadības principu, kas nodrošina gan atbilstošu notekūdeņu kvalitāti, gan arī energoefektīvu NAIS darbību.

### 1.7.1. Pētījumu hipotēze, mērķi un uzdevumi

Pētījumu veikšanai izvirzītas **hipotēzes**:

- notekūdeņu aerācijas inženiersistēma ir nestacionāra tehnoloģiska sistēma ar mainīgiem jutības un inerces rādītājiem, kuras darbību apraksta nelineāru diferenciālvienādojumu sistēma ar mainīgiem parametriem;
- notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas optimālu (kvalitatīvu un energoefektīvu) darbību var nodrošināt ar adaptīvu vadību, kas spēj veikt nepārtrauktu regulējošās iedarbes un slodzes mainīgo parametru pārrēķinu un ievadi aerācijas tvertnes pārvades funkcijas diferenciālvienādojumu sistēmā.

Izvirzītās hipotēzes iekļauj sevī skābekļa šķīdības ūdenī procesa izpēti, aerācijas tvertnes regulējošās iedarbes un slodzes nestacionāro jutības un inerces rādītāju izpēti, un vadības principa pārbaudi notekūdeņu aerācijas inženiersistēmās.

**Zinātniskā darba mērķis ir** teorētiski un eksperimentāli pamatot notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas kā nestacionāras sistēmas jutības un inerces rādītāju mainīgo dabu, un piedāvāt inovatīvu notekūdeņu aerācijas tehnoloģisko iekārtu elektropiedziņas automātiskās vadības principu, kas nodrošina to optimālu (kvalitatīvu un energoefektīvu) darbību.

**Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti un risināti šādi uzdevumi:**

1. Veikt pētījumus par notekūdeņu attīrīšanas ietaišu enerģijas patēriņa tendencem, likumsakarībām un ietekmējošiem faktoriem.
2. Veikt pētījumus par notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas sastāvdaļu ietekmi uz enerģijas patēriņu un notekūdeņu attīrīšanas kvalitāti.
3. Veikt pētījumus par skābekļa pārnesei un patēriņu notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs, izpētot skābekļa šķīdības ūdenī procesu ietekmējošos faktorus un to iedarbības analītiskās likumsakarības, un izveidot kompleksu skābekļa pārnesei matemātisko modeli.

4. Veikt pētījumus par aerācijas tvertnes dinamiku, noskaidrojot tās nestacionaritāti nosakošo nelineāro jutības un inerces parametru analītiskās likumsakarības.
5. Izveidot aerācijas tvertnes virtuālo modeli, un noskaidrot dažādu faktoru komplekso ietekmi uz notekūdeņu attīrīšanas kvalitāti un energoefektivitāti.
6. Veikt eksperimentālos pētījumus Preiļu notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs, un noskaidrot izšķīdušā skābekļa koncentrācijas izmaiņu likumsakarības aerācijas tvertnē.
7. Veikt aerācijas tvertnes virtuālā modeļa atbilstības novērtēšanu, salīdzinot eksperimentālo pētījumu un simulācijas datus.
8. Veikt notekūdeņu aerācijas inženiersistēmu vadības principu efektivitātes un to optimizācijas iespēju izpēti, izmantojot aerācijas tvertnes virtuālo modeli.
9. Izveidot uzlabotu notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas automātiskās vadības principu, kas ievērtē aerācijas tvertnes nestacionāro dabu, adaptīvi koriģējot vadības ierīces darbību, tādējādi nodrošinot konkrētai attīrīšanas sistēmai optimālus elektropiedziņas enerģētiskos un ekonomiskos parametrus.

### **1.7.2. Darba tautsaimnieciskā nozīmība**

- Pētījuma rezultātu ieviešana Latvijas mazpilsētu un ciematu notekūdeņu attīrīšanas ietaišu aerācijas inženiersistēmu automātiskās vadības sistēmās dos vērā ņemamu aerācijas kvalitātes pieaugumu, kas rezultējas arī ekonomiskos ieguvumos, tādējādi ietaupot budžeta resursus, it īpaši šībrīža apstākļos, kad strauji pieaug energoresursu cena gan Latvijā, gan pasaulē.
- Iegūta analītiska sakarība starp notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas konstruktīvajiem parametriem (aerācijas tvertnes izmēri, aeratoru konstrukcija un izvietojums, aerācijas kompresora tehniskie parametri), notekūdeņu kvalitatīvajiem rādītājiem (izšķīdušā skābekļa daudzums, notekūdeņu temperatūra, notekūdeņu sāļainība), un ārējās vides parametriem (gaisa spiediens, skābekļa koncentrācija gaisā), kas ļauj uzlabot aerācijas kompresora izvēles inženieraprēķinu kvalitāti, tādējādi nodrošinot optimālu aerācija inženiersistēmas izveidi.
- Iegūtās likumsakarības ļauj pamatot enerģiju taupošas notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas konstruktīvos risinājumus, izstrādāt katrai šādai sistēmai pielāgotu automātiskās vadības algoritmu, kas nodrošinās energoefektīvu, ekonomiski un tehniski optimālu darbības režīmu notekūdeņu attīrīšanas sistēmās Latvijas pilsētās.

### **Pētījuma ierobežojumi un priekšlikumi tālākai tēmas izpētei**

1. Pētījums apskata tikai notekūdeņu aerācijas inženiersistēmu tehnoloģiskos, enerģētiskos, un ekonomiskos jautājumus.
2. Pilnīgai jautājuma izpētei nepieciešami padziļināti pētījumi saistībā ar notekūdeņu bioloģisko un ķīmisko dabu, tos sasaistot ar iegūtajiem rezultātiem.

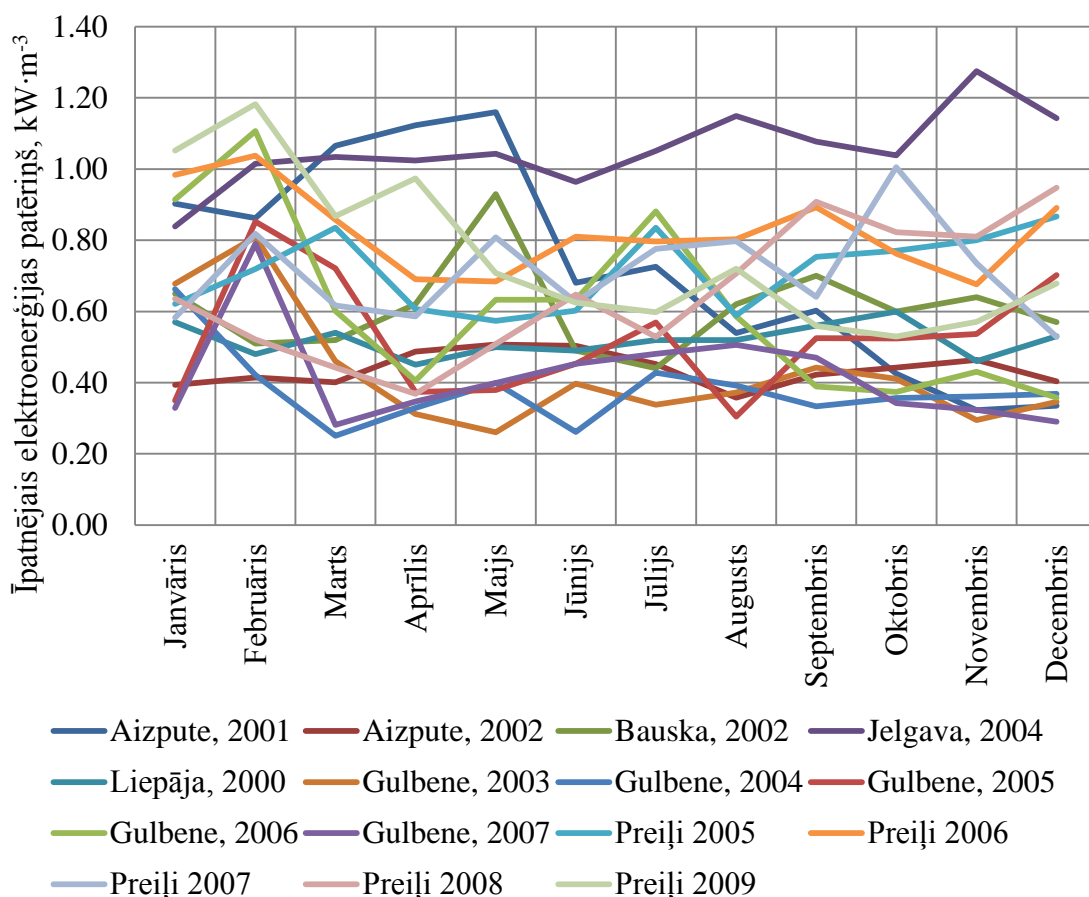
## 2. LATVIJAS NOTEKŪDEŅU ATTĪRĪŠANAS IETAIŠU DARBĪBAS ANALĪZE

Lai būtu iespējams noskaidrot Latvijas NAI energoefektivitāti iespaidojošos faktoros, tika veikta to vēsturisko energopatēriņa un apstrādāto notekūdeņu apjomu datu analīze.

### 2.1. Notekūdeņu attīrīšanas ietaišu energopatēriņa datu statistiskā analīze

Iepriekšējo pētījumu analīzes rezultātā tika izvirzīta hipotēze, ka elektroenerģijas patēriņš NAI ar novecojušu aerācijas kompresoru vadības tehnoloģiju ir ievērojami augstāks, nekā rekonstruētajās NAI. Lai to pārbaudītu, tika veikta Latvijas NAI datu statistiskā analīze.

Tika apkopota un statistiski apstrādāta informācija no vairākām NAI – gan no tādām, kur nav notikusi rekonstrukcija, gan no tādām, kur daļēji vai pilnībā notikusi modernizācija. Lai novērstu dažādu mēnešu garuma ietekmi uz datiem, tika veikta NAI īpatnējā enerģijas patēriņa datu normalizācija, koriģējot datus atbilstoši dienu skaitam katra gada mēnesī. Īpatnējā enerģijas patēriņa grafiks mēnešu griezumā dots 2.1.att.



2.1.att. Latvijas NAI īpatnējais enerģijas patēriņš pa mēnešiem

Vizuālā analīze rāda, ka elektroenerģijas patēriņš dažādās Latvijas pilsētu NAI ir atšķirīgs.

Lai noskaidrotu, vai atšķirības ir būtiskas pa gadiem un pa mēnešiem, tika veikta dispersijas analīze ANOVA (Тюрин, Макаров, 2003; Crompt, Davison, Hargraves, 2001; Derenzo, 2003). Tās rezultāti doti 2.1.tab.

### Latvijas NAI īpatnējā enerģijas patēriņa dispersijas analīzes rezultāti

<i>Izmaiņu avots</i>	<i>F</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>p vērtība</i>	<i>F<sub>krit</sub></i>
Rindas	1.791	0.486	11	0.044	0.060	1.851
Kolonnas	16.23	5.602	14	0.400	8.66E-25	1.756
Kļūda		3.797	154	0.025		
Kopā		9.885	179			

Tā kā  $F=1.791 < F_{krit}=1.851$ , un  $p=0.06 > 0.05$ , tad ar 95% varbūtību var apgalvot, ka īpatnējais enerģijas patēriņš dažādu pilsētu NAI nav atkarīgs no gada mēneša – nav konstatējama izteikta īpatnējā enerģijas patēriņa sezonālitate.

Tā kā  $F=16.23 > F_{krit}=1.756$ , un  $p=8.66E-25 < 0.001$ , tad ar 99.9% varbūtību var apgalvot, ka īpatnējais enerģijas patēriņš dažādu pilsētu NAI būtiski atšķiras pa gadiem.

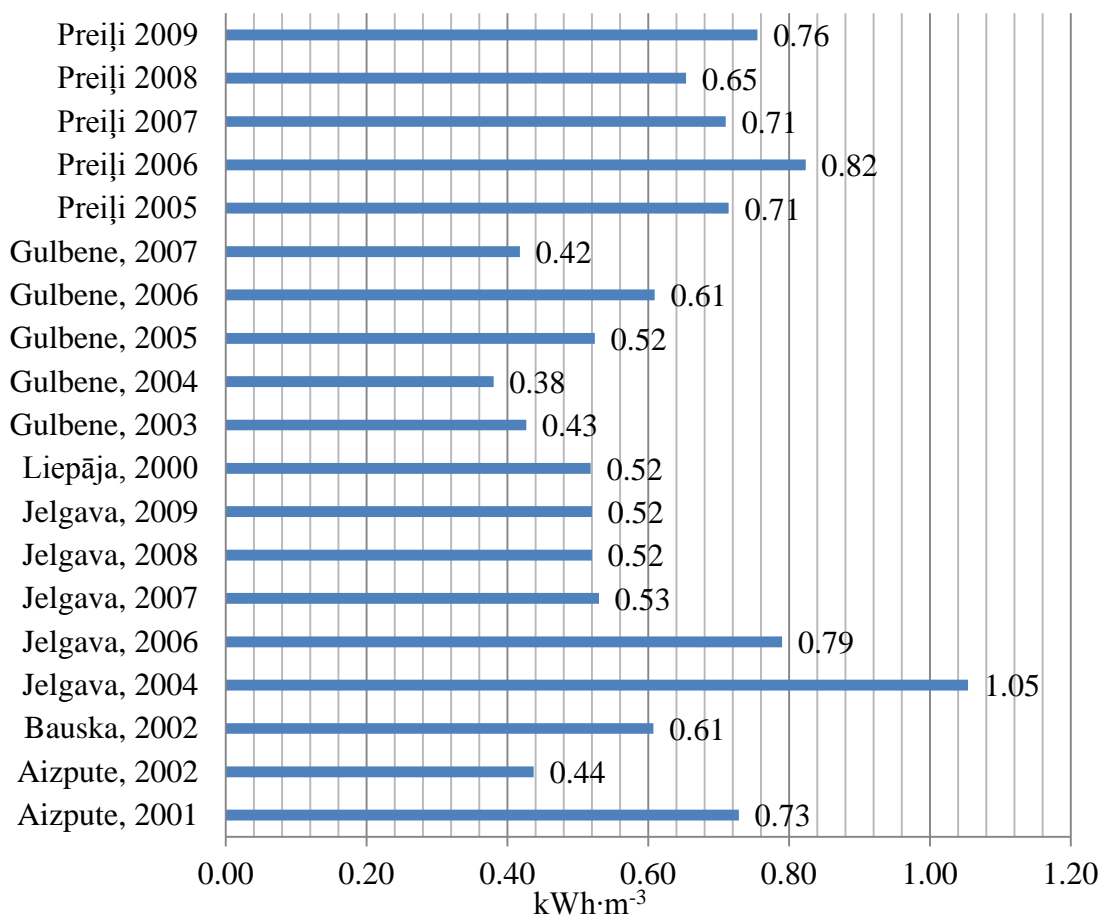
Tika veikta datu korelatīvā analīze tiem datiem, kas atbilst vienam un tam pašam laika periodam (2.2.tabula).

### Latvijas NAI īpatnējā energopatēriņa datu korelatīvā analīze

<i>Pilsētas, gadi</i>		<i>Aizpute, 2002</i>	<i>Jelgava, 2004</i>	<i>Gulbene, 2005</i>	<i>Gulbene, 2006</i>	<i>Gulbene, 2007</i>
<i>Bauska, 2002</i>	$R^2$	0.039				
	Sig. p (2-tailed)	0.905				
<i>Gulbene, 2004</i>	$R^2$		0.021			
	Sig. p (2-tailed)		0.948			
<i>Preiļi, 2005</i>	$R^2$			0.750		
	Sig. p (2-tailed)			0.005		
<i>Preiļi, 2006</i>	$R^2$				0.284	
	Sig. p (2-tailed)				0.372	
<i>Preiļi, 2007</i>	$R^2$					0.566
	Sig. p (2-tailed)					0.055

Korelāciju analīze rāda, ka ir konstatējama vāja ( $R^2 < 0.33$ ) un statistiski neapstiprināma ( $p >> 0.05$ ) īpatnējā elektroenerģijas patēriņa korelācija rekonstruētās NAI Aizpute un Bauska 2002.gadā, nerekonstruētās NAI Jelgava un Gulbene 2004.gadā, statistiski neapstiprināma ( $p > 0.05$ ) īpatnējā elektroenerģijas patēriņa korelācija Preiļu nerekonstruētā NAI un Gulbenes rekonstruētā NAI 2006. un 2007.gados, stipra ( $R^2 > 0.33$ ) un statistiski apstiprināma ( $p = 0.05$ ) īpatnējā elektroenerģijas patēriņa korelācija Preiļu nerekonstruētā NAI un Gulbenes rekonstruētā NAI 2005.gadā.

Tika sīkāk analizēts gada vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš uz  $1 \text{ m}^3$  notekūdeņu (2.2.attēls.)



### 2.2.att. Gada vidējais īpatnējais enerģijas patēriņš Latvijas NAI

Vizuālā grafiku analīze rāda, ka NAI īpatnējais elektroenerģijas patēriņš (kWh·m<sup>-3</sup>) ir dažāds.

Lai noskaidrotu modernizācijas ietekmi uz energoefektivitāti, tika veikts *t*-tests, sagrupējot NAI pēc modernizācijas pakāpes (Jelgavā no 2007.gada, Bauskā, Liepājā, Aizputē no 2002.gada un Gulbenē darbojās automātiskās vadības sistēmas (grupai īpatnējā elektroenerģijas patēriņa vidējā vērtība  $M=0.50$  kWh·m<sup>-3</sup>,  $SD=0.075$  kWh·m<sup>-3</sup>), bet Preiļos 2005.–2009.gg., Jelgavā 2004.–2006.gados – NAIS ar manuālo programvadību (grupai īpatnējā elektroenerģijas patēriņa vidējā vērtība  $M=0.78$  kWh·m<sup>-3</sup>, standartnovirze  $SD=0.123$  kWh·m<sup>-3</sup>).

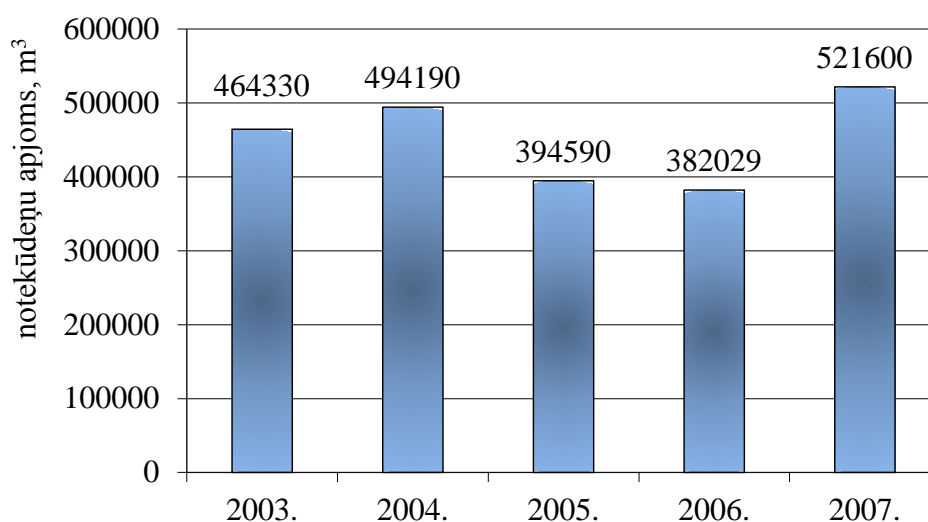
Tā kā  $t=5.71 > t_{krit}=2.201$  ( $p=0.0001$ ), var secināt, ka atšķirība starp abu grupu īpatnējiem enerģijas patēriņiem ir statistiski nozīmīga, un ka rekonstruēto NAI enerģijas patēriņš ir būtiski mazāks nekā nerekonstruētajās NAI.

Lielākie elektroenerģijas patērētāji NAI ir notekūdeņu aerācijas kompresori, kuru automātiskās vadības pilnveidošana dod būtisku skābekļa koncentrācijas  $C_{O_2}$  regulēšanas kvalitātes un procesa energoefektivitātes rādītāju uzlabojumu.

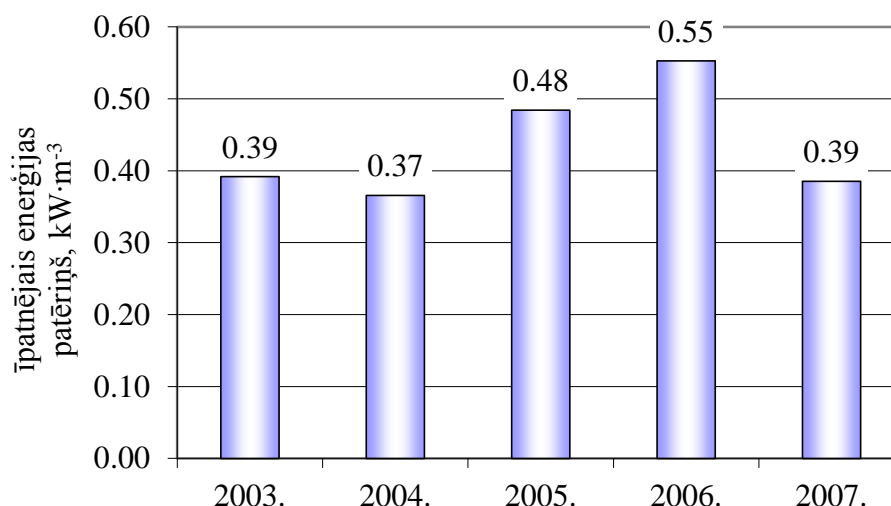
Enerģijas izmantošanas intensitāte dažādās pasaules NAI ir dažāda – tā ir robežās no 0.29 kWh·m<sup>-3</sup> līdz 1.2 kWh·m<sup>-3</sup>, vidēji 0.32 kWh·m<sup>-3</sup> (California Energy Commission, 2005).

Lai noskaidrotu NAI darbības efektivitāti laika griezumā, tika veikts padziļināts rekonstruētās Gulbenes NAI energoefektivitātes datu statistiskais pētījums. Izejas dati statistikas datu analīzei apkopoti tabulā 1.pielikumā.

Summārais notekūdeņu apjoms un īpatnējais enerģijas patēriņš pa gadiem laika periodam no 2003.gada līdz 2007.gadam Gulbenes NAI, dots 2.3. un 2.4.attēlā.



**2.3.att. Gulbenes NAI notekūdeņu apjoma izmaiņas, pa gadiem**



**2.4.att. Īpatnējais elektroenerģijas patēriņš Gulbenes NAI, pa gadiem**

Lai noskaidrotu, vai ir būtiskas atšķirības Gulbenes NAI īpatnējā enerģijas patēriņā pa gadiem un pa mēnešiem, tika veikta divfaktoru dispersijas analīze ANOVA (Тюрин, Макаров, 2003; Croft, Davison, Hargraves, 2001; Derenzo, 2003). Tās rezultāti doti 2.3.tabulā.

2.3.tabula

**Gulbenes NAI īpatnējā enerģijas patēriņa divfaktoru dispersijas analīzes rezultāti**

<i>Izmaiņu avots</i>	<i>F</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>p vērtība</i>	<i>F<sub>krit</sub></i>
Rindas	4.030	0.7977	11	0.07252	0.00043	2.014
Kolonnas	5.825	0.4193	4	0.10482	0.00075	2.583
Kļūda		0.7917	44	0.01799		
Kopā		2.0087	59			

Tā kā  $F=4.030 > F_{krit}=2.014$ , un  $p=0.00043 < 0.001$ , tad ar 99.9% varbūtību var apgalvot, ka īpatnējais enerģijas patēriņš Gulbenes NAI ir atkarīgs no gada mēneša, un tam ir izteikta sezonālitate.



Tā kā  $F=5.825 > F_{krit}=2.583$ , un  $p=0.00075 < 0.001$ , tad ar 99.9% varbūtību var apgalvot, ka īpatnējais enerģijas patēriņš Gulbenes NAI būtiski atšķiras pa gadiem.

Lai noskaidrotu, vai ir būtiskas atšķirības Gulbenes NAI notekūdeņu apjomā pa gadiem un pa mēnešiem, tika veikta divfaktoru dispersijas analīze ANOVA. Tās rezultāti doti 2.4.tabulā.

2.4.tabula

### Gulbenes NAI notekūdeņu apjoma divfaktoru dispersijas analīzes rezultāti

Izmaiņu avots	SS	df	MS	F	p vērtība	$F_{krit}$
Rindas	2228861	11	202624	2.152	0.036	2.014
Kolonnas	1325006	4	331252	3.519	0.014	2.584
Kļūda	4142263	44	94142			
Kopā	7696130	59				

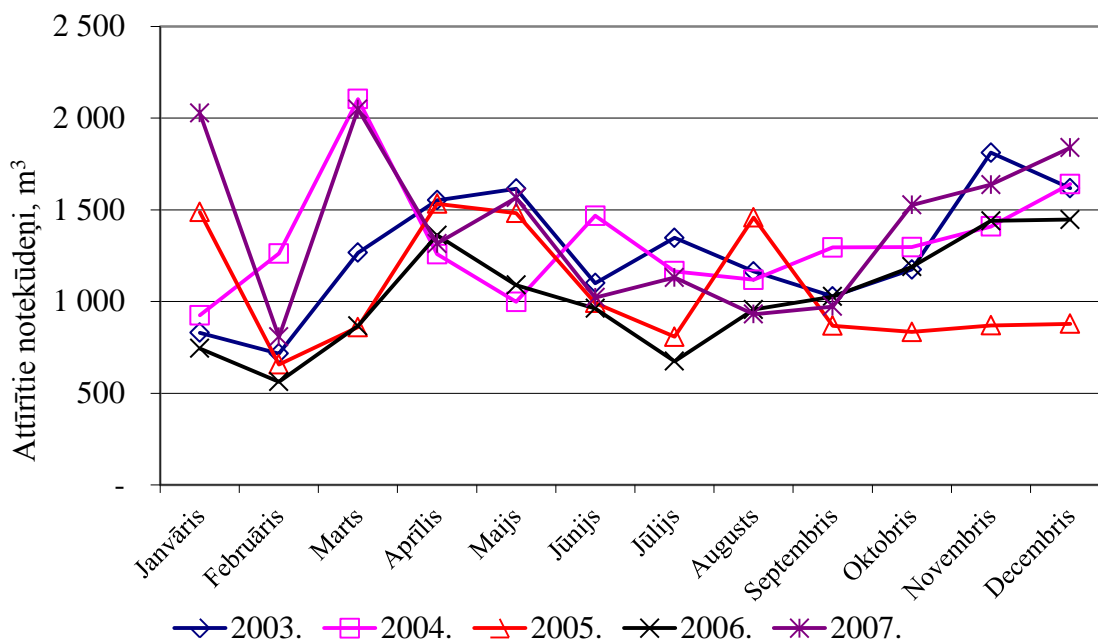
Tā kā  $F=2.152 > F_{krit}=2.014$ , un  $p=0.036 < 0.05$ , tad ar 95% varbūtību var apgalvot, ka notekūdeņu apjoms Gulbenes NAI ir atkarīgs no gada mēneša, tātad tam ir izteikta sezonālitate.

Tā kā  $F=3.519 > F_{krit}=2.584$ , un  $p=0.014 < 0.05$ , tad ar 95% varbūtību var apgalvot, ka notekūdeņu apjoms Gulbenes NAI būtiski atšķiras pa gadiem.

Redzams, ka nevar runāt par skaidri samānu tendenci notekūdeņu apjoma izmaiņā un energoefektivitātē, jo 2005. un 2006.gados notekūdeņu apjomi samazinājās pret 2004.gada apjomu, kaut arī ekonomiskā aktivitāte šajā periodā Lāvijā bija ar augošu tendenci. Apjomu izmaiņas nevar izskaidrot arī ar nokrišņu daudzuma būtiskām atšķirībām, jo tās netika konstatētas.

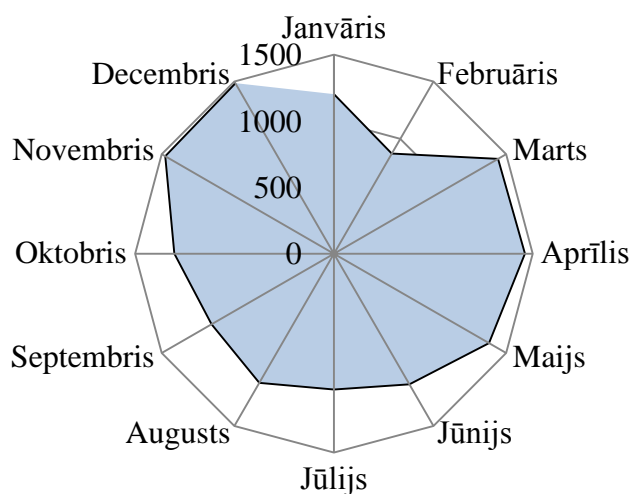
## 2.2 Aerācijas ietaišu energopatēriņa sezonālitate iespaids izpēte

Gadalaiku ietekmes sezonālā rakstura novērtēšanai apstrādāto notekūdeņu apjoma dati pārrēķināti uz  $m^3 \cdot d^{-1}$  (2.5.att.)



2.5.att. Gulbenes NAI vidējā notekūdeņu apjoma izmaiņas

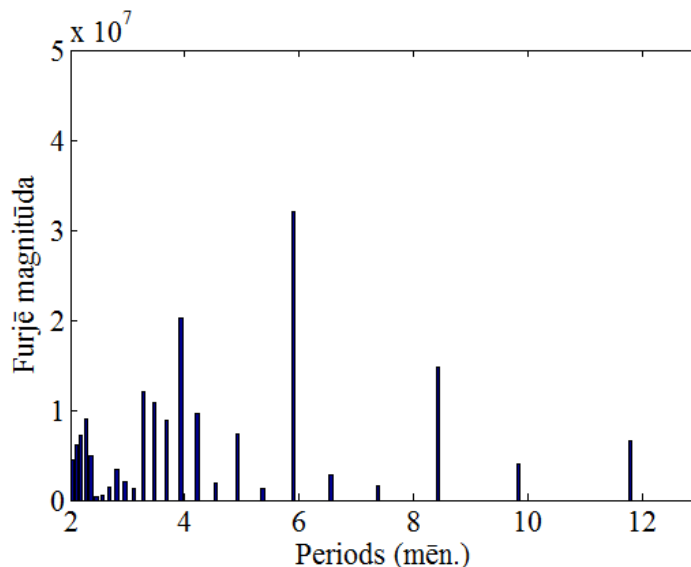
Vizuālā analīze apliecina, ka ir pamanāma izteikta notekūdeņu apjoma sezonālitate, kas izpaužas marta, aprīļa un maija mēnešos, un novembrī, decembrī. Veicot tālāku analīzi, tika sagrupēti vidējie mēneša notekūdeņu apjomi, un aprēķināts vidējais notekūdeņu apjoms (2.6.att.).



**2.6.att. Gulbenes NAI vidējā notekūdeņu apjoma izmaiņas pa mēnešiem, m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>**

Var konstatēt nelielu paaugstinātu notekūdeņu apjomu pavasara un rudens mēnešos. Tā iespējamais iemesls – paaugstināts nokrišņu daudzums (IV kvadrants – rudens, un I kvadranta otrā puse un II kvadranta pirmā puse – 2.6.att.)

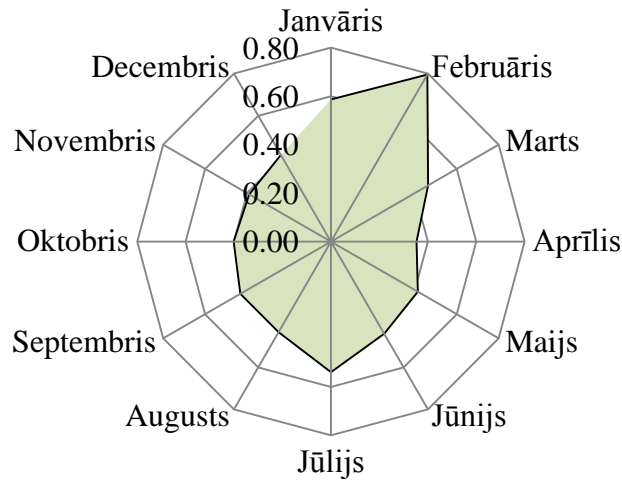
Precīzāka sezonālitates novērtēšana tika veikta, izmantojot vienu no datu multiplās regresijas analīzes instrumentiem laika rindām – Furjē analīzes metodi. Notekūdeņu vidējā apjoma mēnesī laika rindas datiem tiek veikta spektrālā analīze. Analīzes rezultāti parādīti 2.7.attēlā, bet programma datu apstrādei Matlab vidē dota 2.pielikumā (Дьяконов, Абраменкова, 2002).



**2.7.att. Furjē analīzes rezultāti Gulbenes NAI notekūdeņu apjoma izmaiņām**

Furjē analīze rāda, ka ir notekūdeņu apjoma datiem raksturīga sezonālitate, kas atkārtojas ik 4, 6 un 12 mēnešus (paaugstinātas Furjē magnitūdas) – tāpat Gulbenes NAI notekūdeņu apjoma izmaiņu datiem ir raksturīga sezonālitate ar cikliskumu 4, 6 un 12 mēneši. Paaugstinātais rezultāts Furjē magnitūdai ir arī 8 mēnešu ciklā, kas skaidrojams ar aptuveno lietainās sezonas atkārtošanos ik 7..9 mēnešu ciklā Latvijā.

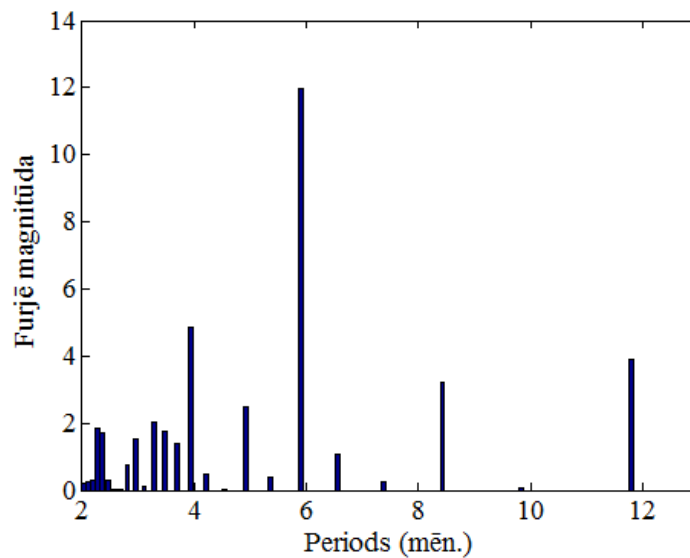
Analizējot īpatnējo enerģijas patēriņu, tika konstatēts, ka tas nav tieši saistīts ar notekūdeņu apjoma pieaugumu nokrišņu dēļ, jo grafiski parādījās pastiprināts īpatnējais elektroenerģijas patēriņš jūlija mēnesī, kam nav atrodams tiešs meteoroloģisks un tehnoloģisks skaidrojums (2.8.att.).



**2.8.att. Gulbenes NAI vidējais enerģijas patēriņš kWh·m<sup>-3</sup>, pa mēnešiem**

Enerģijas patēriņa pieaugums janvārī un februārī ir skaidrojams ar pazeminātu āra gaisa temperatūru, kuras dēļ bija nepieciešama papildus aerācija, lai veicinātu aktīvo dūņu metabolismu.

Spektrālā (Furjē) analīze (2.9.att.) parādīja sezonālītāti 4 un 6 mēnešu ciklā (gadalaiki), kā arī 12 mēnešu (gada) ciklā, apstiprinot īpatnējā enerģijas patēriņa sezonālo raksturu.



**2.9.att. Furjē analīzes rezultāti Gulbenes NAI īpatnējā enerģijas patēriņa datiem**

Lai noskaidrotu sezonālītātes ietekmi uz āra gaisa temperatūru un nokrišņu daudzumu, tika savākti un apkopoti Latvijas meteoroloģiskie dati – vidējā gaisa temperatūra un nokrišņu daudzums pa mēnešiem laika periodam no 2003.gada līdz 2009.gadam.

Vispirms bija jāpārbauda hipotēze, ka vidējai gaisa temperatūrai un nokrišņu daudzumam Latvijā ir sezonāls raksturs, kas atkārtojas gadu no gada.

Lai pārbaudītu nokrišņu sezonālo raksturu, tika veikta meteoroloģisko datu (datu tabula 2.pielikumā) divfaktoru dispersijas analīze ANOVA, kuras rezultāti apkopoti 2.5.tab.).

2.5.tabula

### Latvijas nokrišņu apjoma dispersijas analīzes rezultāti, 2003.–2009.gads

<i>Izmaiņu avots</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p vērtība</i>	<i>F<sub>krit</sub></i>
Rindas	36389	11	3308	7.059	9.37E-08	1.936
Kolonnas	4086	6	681	1.453	0.2081	2.239
Kļūda	30930	66	468			
Kopā	71405	83				

Tā kā  $F=7.059 > F_{krit}=1.937$ , un  $p=9.369E-08 \ll 0.01$  tad ar 99% varbūtību var apgalvot, ka nokrišņu apjoms Latvijā ir atkarīgs no gada mēneša. Tātad apstiprinās nokrišņu sezonālais raksturs.

Tomēr, tā kā  $F=1.453 < F_{krit}=2.239$ , ar 95% varbūtību nevar apgalvot, ka nokrišņu apjoms Latvijā būtiski atšķiras pa gadiem. Tātad nokrišņu sezonālitate atkārtojas no gada uz gadu.

Lai apstiprinātu vidējo mēneša temperatūru sezonālo raksturu, tika veikta meteoroloģisko datu (datu tabula 2.pielikumā) divfaktoru dispersijas analīze ANOVA (rezultāti apkopoti 2.6.tab.).

2.6.tabula

### Latvijas vidējo mēneša temperatūru divfaktoru dispersijas analīzes rezultāti, 2003.–2009.gads

<i>Izmaiņu avots</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p vērtība</i>	<i>F<sub>krit</sub></i>
Rindas	4532.6156	11	412.055	79.607	1.092E-33	1.937
Kolonnas	20.3061905	6	3.384	0.653	0.686	2.239
Kļūda	341.625238	66	5.176			
Kopā	4894.54702	83				

Tā kā  $F=79.607 > F_{krit}=1.937$ , un  $p=1.092E-33 \ll 0.01$  tad ar 99% varbūtību var apgalvot, ka vidējā mēneša temperatūra Latvijā ir atkarīgs no gada mēneša. Tātad apstiprinās temperatūru sezonālais raksturs.

Tajā pašā laikā, tā kā  $F=0.686 < F_{krit}=2.239$ , tad ar 95% varbūtību nevar apgalvot, ka vidējās mēneša temperatūras Latvijā būtiski atšķiras pa gadiem. Tātad vidējo mēneša temperatūru sezonālitate atkārtojas no gada uz gadu.

Lai noskaidrotu nokrišņu un vidējo mēneša temperatūru ietekmi uz notekūdeņu apjomu un īpatnējo enerģijas patēriņu to attīrīšanai, tika veikta korelāciju analīze. Tās rezultāti parādīti 2.7.tabulā.

Ļoti cieša negatīva korelatīva sakarība ( $R^2=-0.800$ ) ir starp notekūdeņu apjomu un īpatnējo enerģijas patēriņu. Tieša skaidrojuma šai korelācijai nav, tomēr citas korelācijas – vidēja laika ridām raksturīga pozitīva korelācija starp nokrišņu daudzumu un notekūdeņu apjomu ( $R^2=0.246$ ), un vidēji cieša negatīva korelācija starp īpatnējo enerģijas patēriņu un nokrišņu daudzumu ( $R^2=-0.430$ ), rāda, ka nokrišņi nonāk tieši

NAI, tā samazinot notekūdeņu piesārņojumu, un mazinot nepieciešamību pēc aerācijas, kas savukārt samazina enerģijas patēriņu.

2.7.tabula

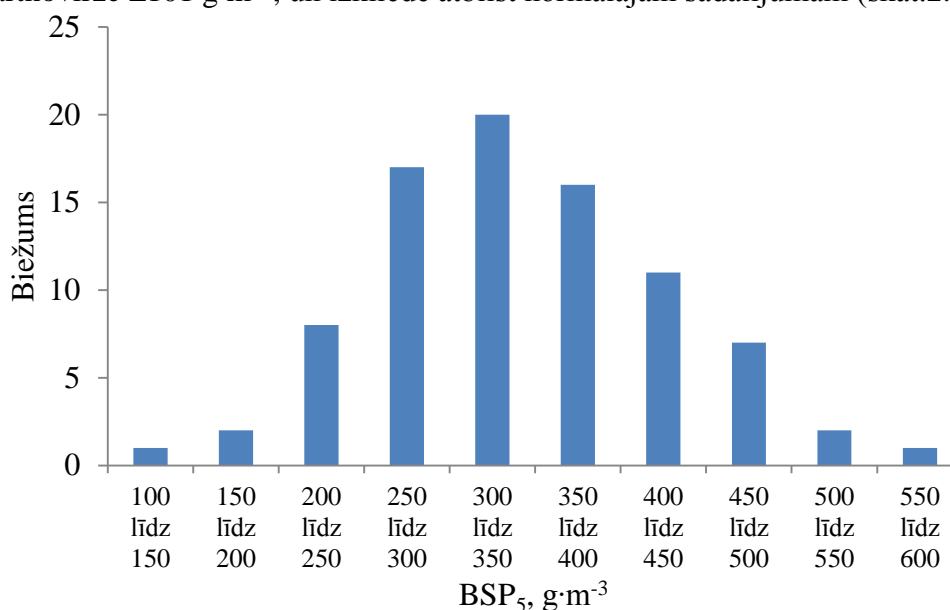
**Nokrišņu daudzuma, vidējo mēneša temperatūru, notekūdeņu apjomu un īpatnējā enerģijas patēriņa datu korelatīvā analīze, Gulbenes NAI, ( $p=0.05$ )**

Mainīgie	Nokrišņi, mm/ mēnesī	Īpatnējais enerģijas patēriņš, kWh·m <sup>-3</sup>	Mēneša vidējā temperatūra, °C
Īpatnējais enerģijas patēriņš, kWh·m <sup>-3</sup>	-0.430	1	
Mēneša vidējā temperatūra, °C	0.510	-0.316	1
Notekūdeņu apjoms, m <sup>3</sup> dienā	0.246	-0.800	-0.051

Kā redzams no tabulas, cieša negatīva korelācija ( $R^2 = -0.800$ ) konstatēta starp īpatnējo enerģijas patēriņu un notekūdeņu apjomu, rādot, ka nokrišņi atšķaida notekūdeņus, tā nodrošinot mazāku enerģijas patēriņa nepieciešamību. Toties āra gaisa temperatūra nekorelē ar notekūdeņu apjoma izmaiņām ( $R^2 = -0.051$ ). Tajā pašā laikā starp mēneša vidējo temperatūru un īpatnējo enerģijas patēriņu ir vidēja negatīva korelācija ( $R^2 = -0.316$ ), kas apstiprina pieņēmumu, ka temperatūras izmaiņām ir būtiska ietekme uz enerģijas patēriņu.

**2.3. Notekūdeņu sastāva pētījumi**

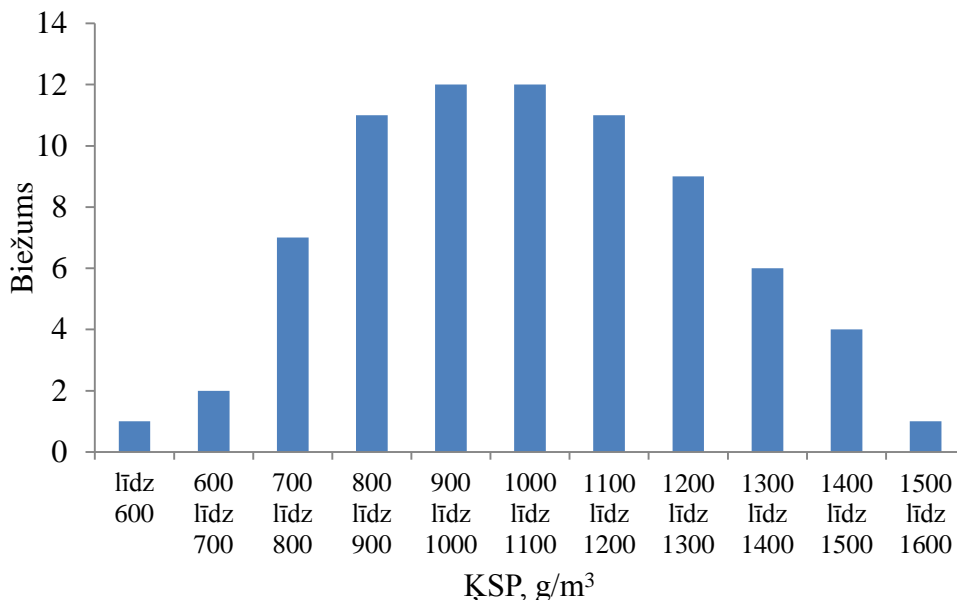
Šo pētījumu turpinājumā bija nepieciešams noskaidrot, vai Latvijas pilsētu notekūdeņu sastāvs un piesārņojuma līmenis atbilst ES pilsētu notekūdeņu piesārņojumu līmenim. Pētījuma veikšanai tika izvēlēta Jelgava, jo tā ir pilsēta ar vidēji lielu iedzīvotāju skaitu (uz 2009.gada 1.janvāri 65 872 iedzīvotāju). Autora veiktā Jelgavas NAI datu apstrāde par 2009.gadu rāda, ka vidējais BSP<sub>5</sub> līmenis ir 342 g·m<sup>-3</sup>, standartnovirze ±101 g·m<sup>-3</sup>, un izkliede atbilst normālajam sadalījumam (skat.2.10.att.).



**2.10.att. BSP<sub>5</sub> ieplūdē Jelgavas NAI 2009.gadā**

Var secināt, ka Jelgavas NAI konstatētais vidējais BSP<sub>5</sub> līmenis ir būtiski zemāks nekā iepriekšminētajos pētījumos konstatētais vidējais BSP<sub>5</sub> piesārņojums ES valstīs.

Autora veiktā Jelgavas NAI datu apstrāde par 2009.gadu rāda, ka vidējais ŪSP līmenis ir 1064 g·m<sup>-3</sup>, standartnovirze ±244 g·m<sup>-3</sup> (skat.2.11.att.).



### 2.11.att. ŪSP ieplūdē Jelgavas NAI 2009.gadā

Var secināt, ka Jelgavas NAI konstatētais ŪSP līmenis ir būtiski augstāks pret BSP līmeni (ŪSP/BSP=3.1), nekā citos pētījumos konstatētais vidējais ŪSP piesārņojums ES valstīs (ŪSP/BSP=1.5..2).

Datu korelatīvā analīze Jelgavas NAI rāda ļoti ciešu sakarību starp BSP un ŪSP līmeni (2.8.tab.) – determinācijas koeficients pārsniedz 0.9 pie ticamības intervāla 0.01.

2.8.tabula

### Jelgavas NAI piesārņojuma datu korelatīvā analīze, 2009.gads

<i>Piesārņojuma rādītāji</i>		<i>Notekūdeņu pieplūde, m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup></i>	<i>BSP, g·m<sup>-3</sup></i>	<i>ŪSP, g·m<sup>-3</sup></i>	<i>Suspendētās vielas (SV)</i>	<i>Slāpeklis N</i>
BSP	R <sup>2</sup>	-0.239*				
	p	0.034				
ŪSP	R <sup>2</sup>	-.342**	0.902***			
	p	0.002	0.000			
Susp.vielas	R <sup>2</sup>	-0.130	0.409***	0.398***		
	p	0.252	0.000	0.000		
Slāpeklis N	R <sup>2</sup>	-0.678**	0.087	0.188	0.194	
	p	0.000	0.444	0.098	0.087	
Fosfors P	R <sup>2</sup>	-0.680***	0.133	0.254*	0.104	0.829***
	p	0.000	0.241	0.024	0.362	0.000

\*p<0.05; \*\*p<0.01; \*\*\*p<0.001

## 2.nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Latvijas NAI iekļaujas enerģijas izmantošanas intensitātes pasaules NAI diapazonā, kaut gan vidējie enerģijas patēriņa rādītāji ir nedaudz augstāki (robežas no  $0.38 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  līdz  $1.05 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , vidēji  $0.61 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , turpretī pasaulē tā ir robežās no  $0.29 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  līdz  $1.2 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , vidēji  $0.32 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ). To var izskaidrot gan ar Latvijas ģeogrāfisko atrašanās vietu – virs 50.paralēles, kura raksturojas ar mēreni kontinentālu/jūras klimatu, un līdz ar to ar paaugstinātu energopatēriņu, gan ar pielietotajām tehnoloģijām un vadības ierīcēm.
2. Enerģijas patēriņa datu dispersiju analīze Latvijas NAI rāda, ka būtiski atšķiras īpatnējais enerģijas patēriņš dažādās Latvijas pilsētās, un, ja neievērtē to, vai šajās NAI ir notikusi rekonstrukcija, nevar konstatēt sezonālās iespaidu uz enerģijas patēriņu.
3. Veicot padziļinātus pētījumus Gulbenes NAI pēc rekonstrukcijas, tika konstatēta sezonālās enerģijas patēriņā, kas cieši korelēja ar notekūdeņu pieplūdi (4, 6 un 12 mēnešu cikls).
4. Notekūdeņu pieplūdes cikliskumu nodrošina nokrišņu sezonālās, kas Latvijas ģeogrāfiskajās koordinātēs saglabājas katru gadu ar augstu varbūtību ( $p < 0.001$ ). Līdz ar to Latvijas NAI ir jāņem vērā notekūdeņu piesārņojuma svārstību ietekme uz aerācijas kvalitāti.
5. Vides temperatūras izmaiņu dispersijas analīze liecina par būtiskām atšķirībām temperatūras režīmos Latvijā gada griezumā ( $p < 0.001$ ), un to ikgadēju atkārtanos. Līdz ar to Latvijas pastākļos ir jāņem vērā notekūdeņu un pievadītā gaisa temperatūras ietekme uz aerācijas kvalitāti.
6. Latvijas NAI datu analīze liecina, ka nepieciešama veco NAI rekonstrukcija, jo tās strādā neefektīvi (īpatnējais enerģijas patēriņš nerekonstruētajās NAI ir 1.5..2 reizes augstāks nekā rekonstruētajās NAI, piemēram, Jelgavas NAI pirms rekonstrukcijas patērēja  $1.05 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , bet pēc rekonstrukcijas  $0.52 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ).
7. Notekūdeņu sastāva pētījumi apstiprina, ka Latvijas municipālie notekūdeņi atbilst ES notekūdeņu sastāvam, un darbā izstrādātie NAIS vadības uzlabošanas principi ir izmantojami arī citu ES valstu municipālo notekūdeņu attīrīšanai.

### Conclusions

1. Although intensity of energy consumption in different countries worldwide differs (range between  $0.29 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  up to  $1.2 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , mean value  $0.32 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ), specific energy consumption of Latvian wastewater treatment systems (WWTS) fits well in this range – from  $0.38 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  up to  $1.05 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , mean  $0.61 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  for observed municipalities WWTS, which is a bit higher than worldwide average. This slight increase can be described by geographical position of Latvia – above 50–th parallel with maritime/continental climate, which asks for higher energy consumption. ion for heating .
2. Dispersion analysis of specific energy consumption in Latvia WWTS shows substantial difference in energy consumption for different municipalities and towns. There is no common pattern if reconstruction level is not being taken in account. There is no seasonality pattern in energy consumption revealed also.

3. Gulbene WWTS was chosen as the place where reconstruction of the system including aeration technologies and control principles change took place. Dispersion analysis revealed substantial seasonal fluctuations of specific energy consumption with frequencies of 4, 6 and 12 months.
4. Analysis of wastewater inflow and comparison with cyclical precipitation based on four seasons in Latvia revealed high correlation of both patterns (probability  $p \ll 0.001$ ). This lets us to conclude that seasonality of precipitation must be taken in account for high quality wastewater treatment organization.
5. Analysis of environment temperature revealed the pattern of the same 4, 6 and 12 month based seasonality (probability  $p \ll 0.001$ ). As the temperature difference is substantial, it must be taken in account for high quality wastewater treatment organization.
6. As there was substantial difference in the specific energy consumption data from old WWTS and renewed WWTS, (energy consumption differs 1.5..2 times), the reconstruction must be accomplished in all Latvia municipalities (example – Jelgava WWTS before reconstruction used 1.05 kWh, after reconstruction 0.52 kWh per each cubic meter of wastewater).
7. Research of wastewater composition and BOD and COD values revealed that there is no substantial difference between average EC municipalities and Latvia municipalities wastewater, proving the statement that the research results from this thesis work can be implemented in other EC countries WWTS.

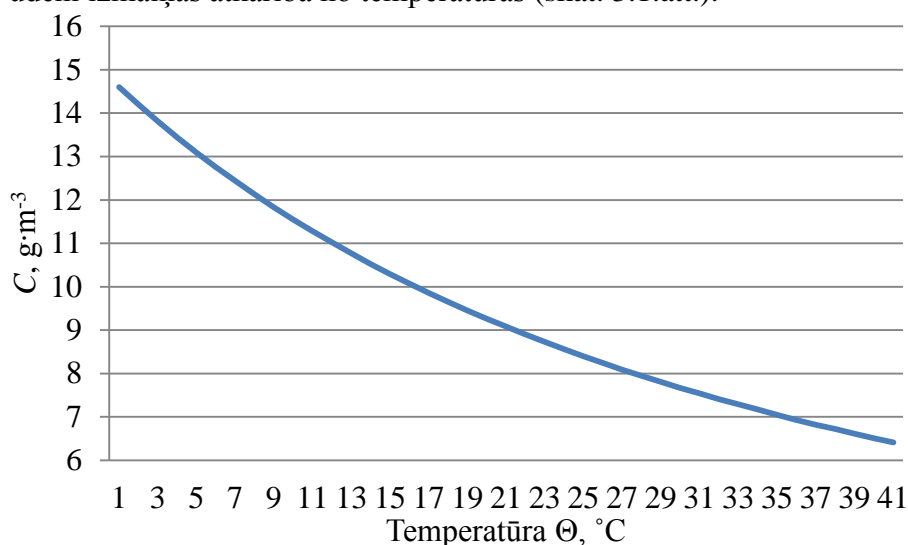


### 3. SKĀBEKĻA PĀRNESES PROCESA IZPĒTE UN MODELĒŠANA

Lai sastādītu skābekļa pārneses procesa analītisko modeli notekūdeņu aerācijas ietaisēs, tika dziļāk analizēti izpētīti 1.nodaļā aprakstītie fizikālie procesi, kas ietekmē skābekļa koncentrācijas izmaiņas notekūdeņos.

#### 3.1. Ūdens temperatūras ietekmes izpēte uz skābekļa šķīdību

Lai skābekļa šķīdības analītiskajā modelī varētu iekļaut temperatūras ietekmi, bija nepieciešams izveidot šo procesu aprakstošu izteiksmi. Izmantojot eksperimentālos datus (Colt, 1984; Mack, s.a.; YSI, 2003), tika izveidots grafiks, kas parāda skābekļa šķīdības ūdenī izmaiņas atkarībā no temperatūras (skat. 3.1.att.).



#### 3.1.att. Ūdens temperatūras ietekme uz izšķīdušā skābekļa koncentrāciju

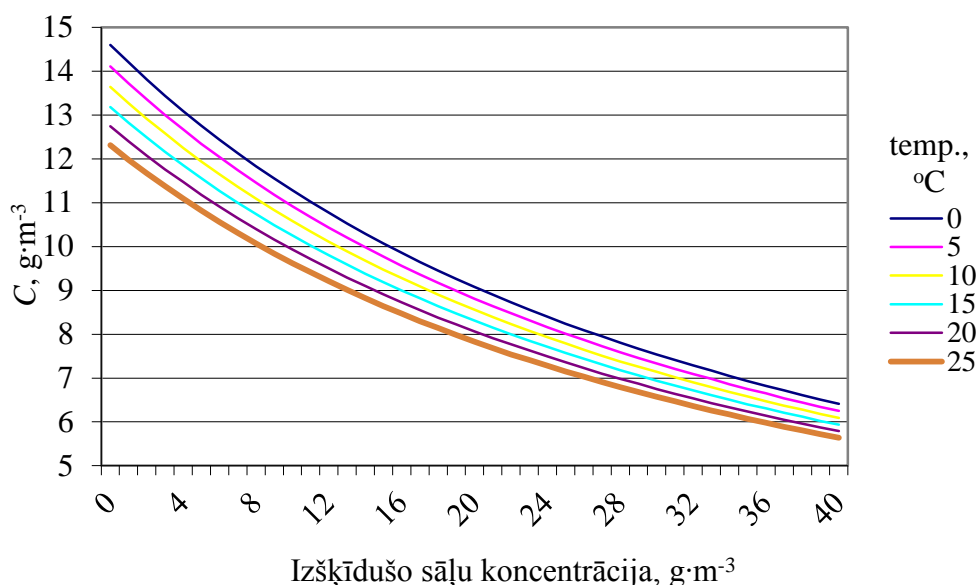
Veicot ūdens temperatūras ietekmes uz skābekļa piesātinājuma līmeni datu regresijas analīzi, tika atrasta sekojoša sakarība:

$$C_s(\Theta) = 14.208 \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta). \quad (3.1)$$

Šī eksponenciālā izteiksme daudz atbilstošāk apraksta procesa fizikālo jēgu ( $R^2 = 0.997$ ), tajā pašā laikā ļauj veikt vienkāršākas matemātiskās operācijas kopējā skābekļa šķīdības izteiksmes izveidei, tā radot iespēju izveidot pilnīgāku skābekļa šķīdības daudzfaktoru modeli.

#### 3.2. Notekūdeņu sāļainības ietekmes izpēte

Lai skābekļa šķīdības analītiskajā modelī varētu iekļaut notekūdeņu sāļainības ietekmi, bija nepieciešams izveidot šo procesu aprakstošu izteiksmi. Izmantojot eksperimentālos datus (Colt, 1984), tika izveidots grafiks, kas parāda skābekļa šķīdības ūdenī izmaiņas atkarībā no sāļainības (skat. 3.2.att.). Kā redzams, maksimālo skābekļa piesātinājumu notekūdeņos nosaka tajos izšķīdušo sāļu daudzums – pieaugot sāļainībai, samazinās skābekļa piesātinājuma līmenis.



**3.2.att. Skābekļa piesātinājuma līmeņa atkarība no ūdenī izšķīdušo sāļu koncentrācijas un ūdens temperatūras**

Izmantojot 1.1.tabulas datus, tika aprēķināta minimālais un maksimālais sāļainības koeficients notekūdeņiem:

$$\text{MIN}\left(\exp\left(\sum_{i=1}^n K_i c_i\right)\right) = \exp((0.099 \cdot 7 + 0.107 \cdot 40 + 0.119 \cdot 15 + 0.029 \cdot 20 + 0.081 \cdot 100 + 0.121 \cdot 15 + 20 \cdot (0.033 + 0.007 + 0.013)/3)/1000) = 1.0177 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\text{MAX}\left(\exp\left(\sum_{i=1}^n K_i c_i\right)\right) = \exp((0.099 \cdot 15 + 0.107 \cdot 70 + 0.119 \cdot 40 + 0.029 \cdot 50 + 0.081 \cdot 250 + 0.121 \cdot 30 + 40 \cdot (0.033 + 0.007 + 0.013)/3)/1000) = 1.0406 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

Aprēķinātās sāļainības koeficienta vērtības rāda, ka skābekļa šķīdība tīrā ūdenī būtiski (par 1.7 – 4% atkarībā no sāļu koncentrācijas) atšķiras no tā šķīdības notekūdeņos to sāļainības dēļ. Tomēr šis secinājums nav vispārināms, jo jāvērtē arī notekūdeņos izšķīdušo sāļu sastāvs, kas var būt atšķirīgs katrai NAI.

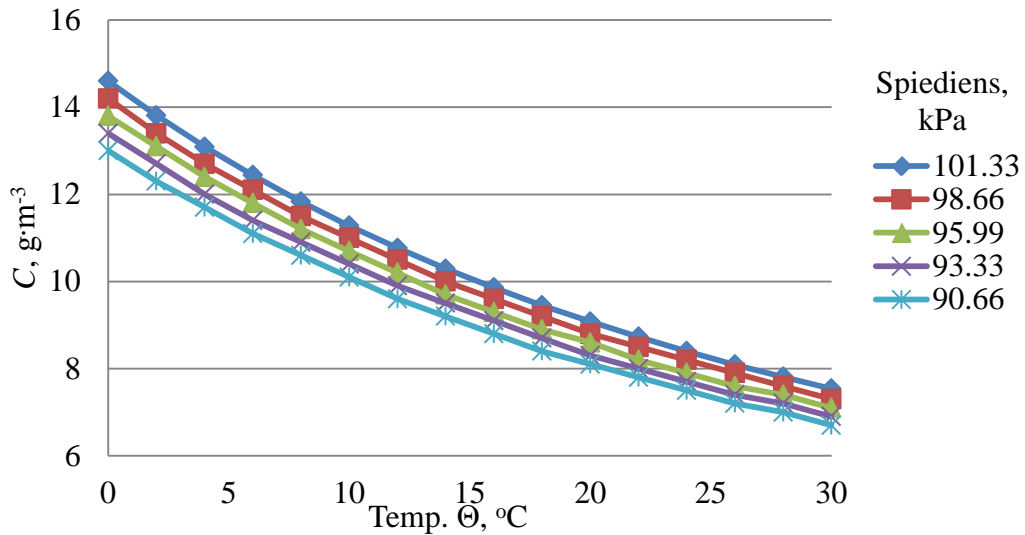
### 3.3. Atmosfēras gaisa spiediena ietekmes izpēte

Izmantojot eksperimentālo pētījumu datus, tika izveidots grafiks, kas rāda atmosfēras gaisa spiediena ietekmi uz skābekļa šķīdību. Kā redzams no grafika (3.3.att.), līdz ar spiediena samazinājumu un notekūdeņu temperatūras pieaugumu samazinās skābekļa koncentrācija (3.3.att.) (Colt 1984).

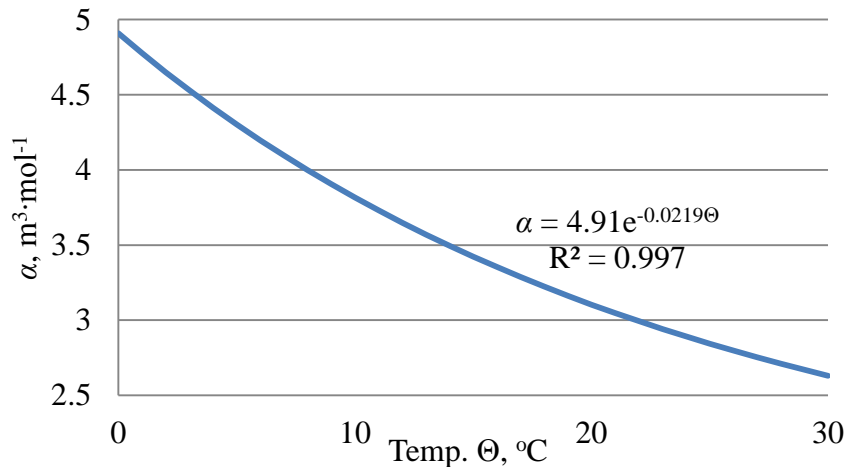
Tā kā šo sakarību aprakstošajā vienādojumā ir parametrs, kura vērtība mainās atkarībā no temperatūras – Bunzena koeficients, bija nepieciešams atrast tā analītisko izteiksmi skābekļa šķīdībai ūdenī. Bunzena koeficienta sakarību ar gāzes temperatūru skābeklim aprakstošais grafiks parādīts 3.4.attēlā (pēc Weiss, 1970).

Sakarību aprakstošais vienādojums tika atrasts, veicot datu nelineārās regresijas analīzi:

$$\alpha = 4.91 \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta) \quad (3.2)$$



3.3.att. Skābekļa koncentrācijas ūdenī atkarība no atmosfēras gaisa spiediena un ūdens temperatūras



3.4.att. Bunzena koeficients  $\alpha$  skābekļa šķīdībai ūdenī

Kā var ievērot, Bunzena koeficientu aprakstošā vienādojuma eksponenciālā daļa ir tāda pati kā iepriekš atrastajam temperatūras iespaidu ievērtējošajam vienādojumam ((3.1.)izteiksme). Tas liecina par to, ka apstiprinās sakarības eksponenciālais raksturs, un ir jāatrod atbilstošie koeficienti, lai ievērtētu temperatūras un spiediena mijiedarbību uz skābekļa šķīdību ūdenī.

Modificējot izteiksmi (1.8) atbilstoši notekūdeņu aerācijas procesam, tika iegūta matemātiskā sakarībam kas raksturo atmosfēras spiediena ietekmi uz skābekļa šķīdību ūdenī:

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot p_2}{p_1} = \frac{C_1^0 \cdot p_2}{p_1^0}, \quad (3.3)$$

- kur
- $C_2$  – skābekļa šķīdība pie spiediena  $p_2$ ,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
  - $C_1$  – skābekļa šķīdība pie spiediena  $p_1$ ,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
  - $p_1^0$  – gaisa spiediens normālos apstākļos,  $1.01325 \cdot 10^5$  Pa;
  - $C_1^0$  – skābekļa šķīdība pie spiediena  $p_1^0$ ,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
  - $p_2$  – gaisa spiediens, Pa.

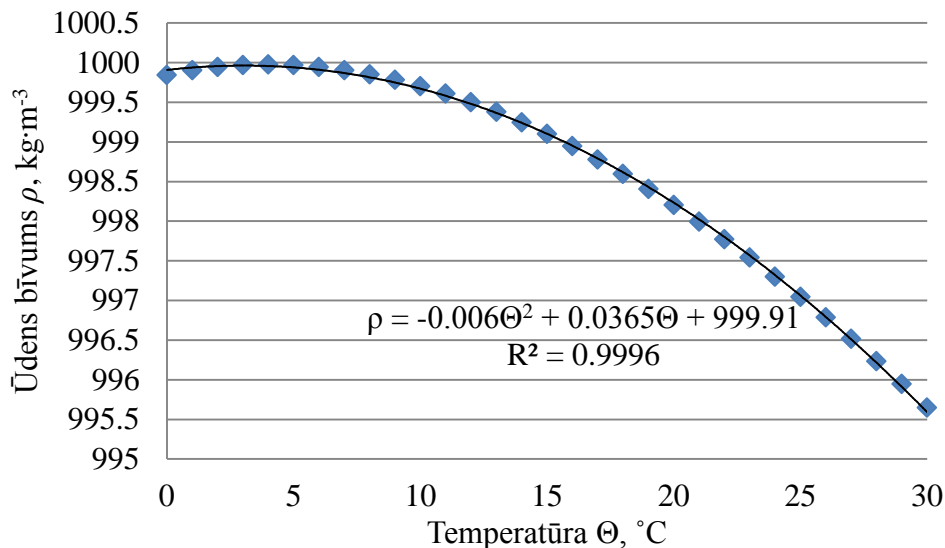
Izmantojot iegūtās izteiksmes (3.1), (3.2) un (3.3), un veicot nelineārās regresijas analīzi, tika iegūta sakarība, kas ievērtē gaisa spiediena un ūdens temperatūras ietekmi uz skābekļa šķīdību ūdenī:

$$C_0 = 0.669 \cdot r_{O_2} \cdot p_a \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta), \quad (3.4)$$

kur  $C_0$  – skābekļa šķīdība ūdenī,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $r_{O_2}$  – skābekļa proporcija gaisā;  
 $p_a$  – atmosfēras spiediens, kPa;  
 $\Theta$  – ūdens temperatūra, °C.

### 3.4. Notekūdeņu blīvuma ietekmes izpēte

Lai skābekļa šķīdības modelī ievērtētu ūdens blīvuma izmaiņas, tika izveidots notekūdeņu blīvuma izmaiņas grafiks, izmantojot eksperimentālo pētījumu datus (ThermExcel, 2003). Grafiski šī sakarība parādīta 3.5.attēlā.



### 3.5.att. Ūdens blīvuma atkarība no ūdens temperatūras

Sakarību aprakstošais vienādojums tika atrasts, veicot datu nelineārās regresijas analīzi. Tas ir sekojošs:

$$\rho = -0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91. \quad (3.5)$$

Iegūtā binomiālā sakarība ir ar augstu ticamību ( $R^2=0.999$ ), tāpēc to var izmantot tālākos aprēķinos.

Ievietojot iegūto ūdens blīvuma regresijas vienādojumu izteiksmē (1.9), tika iegūta sakarība, kas apraksta aerācijas kompresora attīstāmā spiediena atkarību no aeratoru iegremdēšanas dziļuma un ūdens temperatūras:

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h = (-0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91) \cdot g \cdot h. \quad (3.6)$$

Šī sakarība tiks izmantota tālākai skābekļa koncentrācijas ūdenī modelēšanai.

### 3.6. Skābekļa šķīdības matemātiskais modelis

Iepriekšējās nodaļās apskatītā dažādu faktoru ietekme normālos NAI darba apstākļos nav nošķirta – tie visi kompleksi mijiedarbojas. Apvienojot šo mijiedarbību,

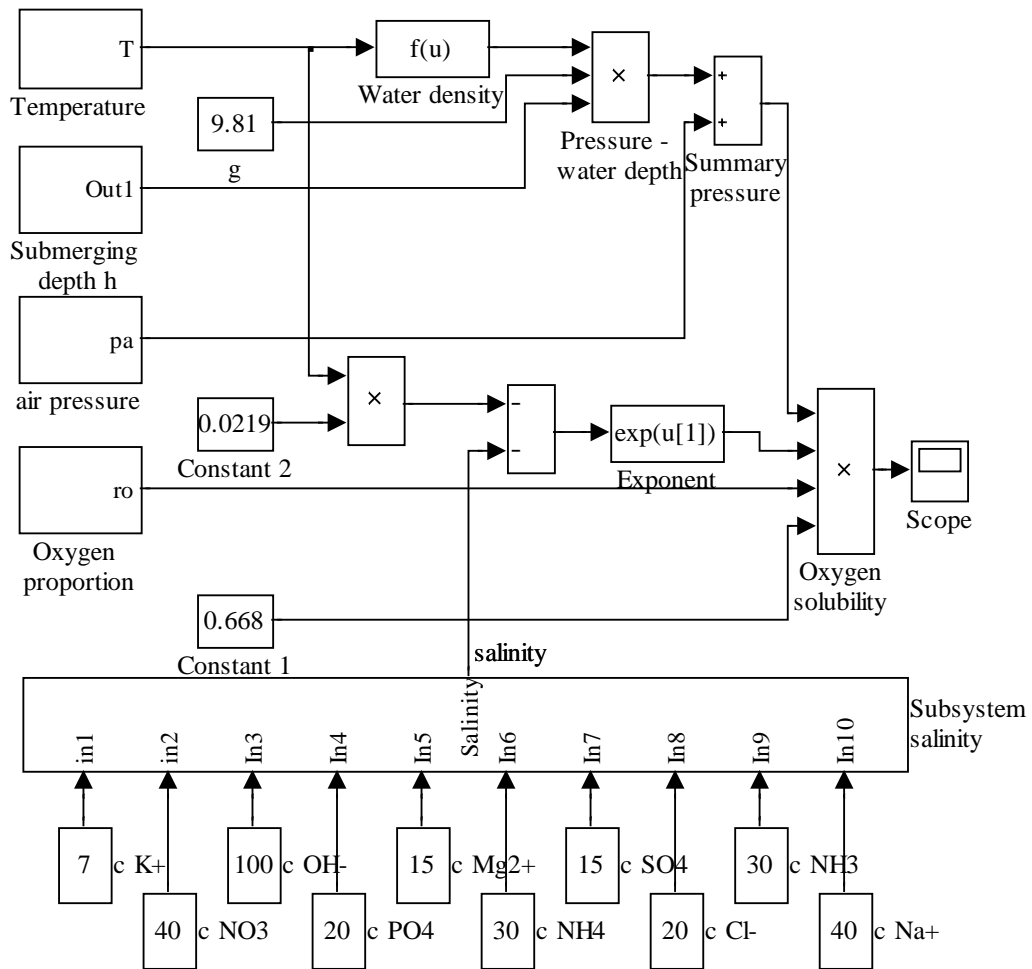
un izmantojot (3.4) un (3.6) izteiksmes, tika izveidota vienota izteiksme – autora izveidots skābekļa šķīdības matemātiskais modelis:

$$C_s = C(r_{O_2}, p_a, \Theta, K, c_i, h) = \frac{0.668 \cdot r_{O_2} \cdot \left( p_a + (-0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91) \cdot g \cdot h \cdot 10^{-3} \right)}{\exp\left(\sum K_i c_i + 0.0219 \cdot \Theta\right)} \quad (3.7)$$

Šī izteiksme apraksta dažādu faktoru kompleksu iedarbi uz skābekļa šķīdību notekūdeņos. Tā ietver gan notekūdeņu temperatūras, gan atmosfēras spiediena, gan skābekļa koncentrācijas gaisā, gan aeratoru iegremdēšanas dziļuma, gan notekūdeņos izšķīdušo sāļu koncentrācijas un jonu sastāva ietekmi uz skābekļa šķīdību notekūdeņos.

### 3.7. Ārējo faktoru ietekmes uz skābekļa šķīdību novērtējums

Skābekļa šķīdību notekūdeņos ietekmē dažādi faktori, un to ietekme ir ar dažādu intensitāti un zīmi. Lai to izpētītu, tika veikta datorsimulācija. Šim nolūkam tika izveidots 3.11.izteiksmi aprakstošs modelis Matlab programmas Simulink (Дьяконов, 2008; Дьяконов, Абраменкова, 2002; Поршнеv, 2003; Черных, 2008; Шнидерс, Лайзанс, 2008) aprakšprogrammā (3.6.attēls.).



3.6.att. Skābekļa šķīdības virtuālais modelis

Galvenās šī modeļa sastāvdaļas:

- „Temperature” blokā iespējams iestatīt notekūdeņu temperatūru, °C;
- „g” blokā atrodas gravitācijas konstante  $g=9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;
- „Submerging depth” blokā tiek iestatīts aeratoru iegremdēšanas dziļums, m;
- „Atmospheric pressure” blokā tiek iestatīts atmosfēras spiediens, kPa;
- „Oxygen proportion” blokā tiek iestatīta skābekļa proporcija gaisā;
- bloki „Constant 1” un „Constant 2” apraksta konstantes 0.668 un 0.0219;
- „Water density” blokā notiek ūdens blīvuma pārrēķins atbilstoši tā temperatūrai;
- „Exponent” blokā tiek veikts ieejošā lieluma eksponentes aprēķins;
- blokos ar indeksiem „c.” tiek iestatīta attiecīgā jona koncentrācija notekūdeņos,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;
- blokos „Pressure – water depth”, „Subsystem salinity”, „Summary pressure” un „Oxygen solubility” tiek veiktas matemātiskās darbības, lai iegūtu skābekļa šķīdību, un izvadītu to uz displeja „C”.

Skābekļa šķīdības procesa simulācijas veikšanai tika izveidota virtuāla NAI ar noteiktiem aerācijas tvertnes tehniskajiem parametriem un notekūdeņu parametriem.

Sākuma nosacījumi modelēšanai:

- notekūdeņu temperatūra  $\Theta=10^\circ\text{C}$ ;
- aerācijas difuzoru iegremdēšanas dziļums  $h=4 \text{ m}$ ;
- atmosfēras spiediens 101.325 kPa;
- skābekļa koncentrācija gaisā 20.97% , ka satbilst skābekļa proporcijai gaisā  $r_{\text{O}_2}=0.2097$ ;
- minimālā izšķīdušo sāļu kombinācija –  $c_{\text{K}^+}=7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{OH}^-}=100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{Mg}^{2+}}=15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{SO}_4^{2-}}=15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{PO}_4^{3-}}=20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{Cl}^-}=20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{Na}^+}=40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{NH}_3}=30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{NH}_4^-}=30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{\text{NO}_3^-}=40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Modelēšana tika veikta pēc sekojošas metodikas:

- visos mainīgo un konstanšu blokos tika ievadīti sākuma nosacījumi, un veikta simulācija;
- pēc rezultātu fiksēšanas tika veikta pēc kārtas sekojošu mainīgo skaitlisko vērtību izmaiņa, simulācija un datu fiksēšana;

Mainīgo faktoru izmaiņas secība un izmaiņas lielums ir sekojošs:

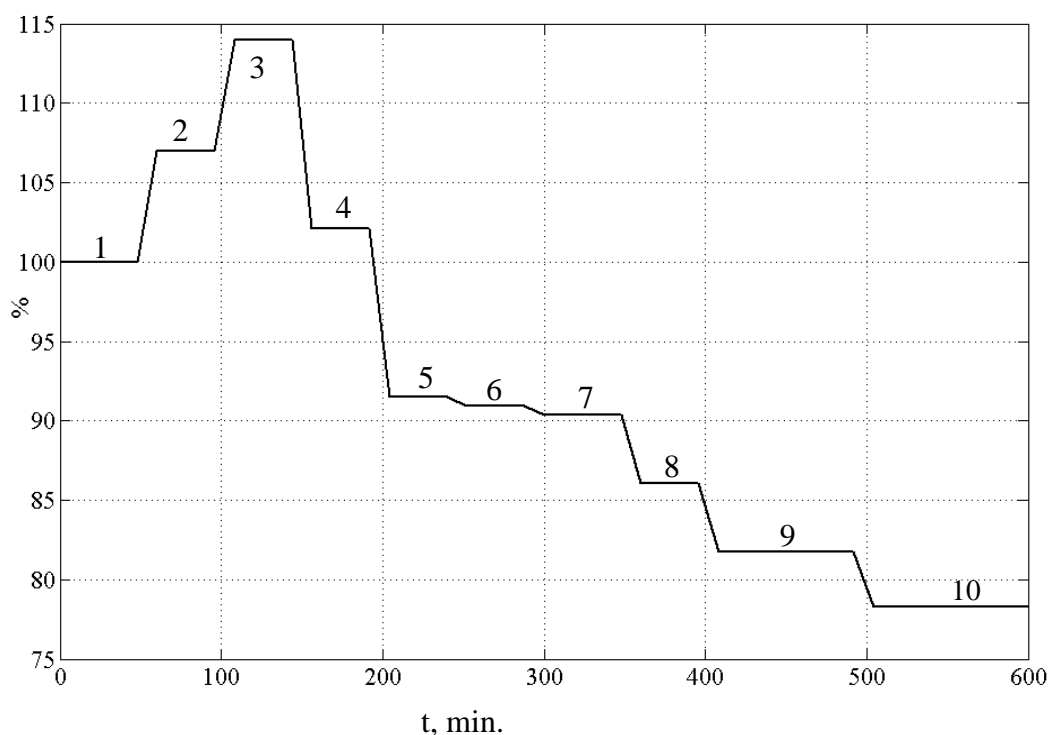
1. modelēšana, izmantojot sākuma nosacījumus;
2. aerācijas difuzoru dziļuma izmaiņa – iegremdēšana par 1 metru dziļāk (izmaiņa pret sākuma vērtību +25%). Visi pārējie parametri paliek nemainīgi (*Ceteris Paribus* jeb CP);
3. aerācijas difuzoru dziļuma izmaiņa – iegremdēšana par 1 metru dziļāk (izmaiņa pret sākuma vērtību vēl +25%). Visi pārējie parametri paliek nemainīgi (CP);
4. notekūdeņu temperatūra pieaug par  $+5^\circ$ ,  $\Theta=+15^\circ\text{C}$ , (CP);
5. notekūdeņu temperatūra pieaug par  $+5^\circ$ ,  $\Theta=+20^\circ\text{C}$ , (CP);
6. atmosfēras spiediens samazinās par  $-0.5 \text{ kPa}$  ( $p_g=100.725 \text{ kPa}$ );
7. atmosfēras spiediens samazinās par  $-0.5 \text{ kPa}$  ( $p_g=100.225 \text{ kPa}$ );
8. skābekļa koncentrācija gaisā samazinās par  $-1\%$  ( $r_{\text{O}_2}=0.1997$ );
9. skābekļa koncentrācija gaisā samazinās par  $-1\%$  ( $r_{\text{O}_2}=0.1897$ );
10. izšķīdušo sāļu koncentrācija pieaug par  $+100\%$  (maksimuma slodze).

Modelēšanas rezultātu skaitliskās vērtības dotas 3.1.tabulā, grafiski modelēšanas rezultāti parādīti 3.7.attēlā.

3.1.tabula

### Skābekļa šķīdības modelēšanas rezultāti

<i>Modelēšanas posma Nr.</i>	<i>Parametra izmaiņa</i>	<i>Skābekļa šķīdības izmaiņa pret sākumstāvokli, %</i>
1	Sākuma nosacījumi	100%
2	Aerācijas difuzoru iegremdēšans dziļums +1 m, $h=5\text{m}$	106.98%
3	Aerācijas difuzoru iegremdēšans dziļums +2 m, $h=6\text{m}$	113.95%
4	Notekūdeņu temperatūra +5°, $\Theta=+15^\circ\text{C}$	102.11%
5	Notekūdeņu temperatūra +10°, $\Theta=+20^\circ\text{C}$	91.50%
6	Atmosfēras spiediens -0.5 kPa ( $p_g=100.725\text{ kPa}$ )	90.92%
7	Atmosfēras spiediens -1 kPa ( $p_g=100.225\text{ kPa}$ )	90.35%
8	Skābekļa koncentrācija gaisā -1% ( $r_{O_2}=0.1997$ )	86.04%
9	Skābekļa koncentrācija gaisā -2% ( $r_{O_2}=0.1897$ )	81.73%
10	Izšķīdušo sāļu koncentrācija +100% (maksimuma slodze)	78.31%



### 3.7.att. Skābekļa šķīdības modelēšanas rezultāti

Modelēšanas rezultāti rāda, ka visu mainīgo parametru izmaiņas būtiski ietekmē skābekļa šķīdību notekūdeņos, pie tam temperatūras pieaugums, sāļu koncentrācijas pieaugums, atmosfēras spiediena samazinājums un skābekļa koncentrācijas gaisā samazinājums samazina izšķīdušā skābekļa koncentrāciju, bet

aerācijas difuzora iegremdēšanas dziļuma palielināšana palielina, izšķīdušā skābekļa koncentrāciju.

### 3.8. Aerācijas iekārtas konstruktīvo parametru ietekme uz skābekļa izmantošanas efektivitāti

Gaisa skābekļa izmantošanas efektivitātes novērtēšanai tika veikts padziļināts pētījums par aerācijas tvertnes dziļuma ietekmi.

Gaisa skābekļa izmantošanas koeficienta  $\eta_o$  aprēķināšanai izmantota pusempīriska izteiksme (Sniders 1997; Sniders, Skrastins, 1995; Šniders, 2003):

$$\eta_o = [1 - \exp(-0.083h)] \cdot \left[ \exp \left[ (-0.11 - 0.008h) \cdot \lambda \cdot \exp(-2.2 \cdot \sigma) \right] \right], \quad (3.8)$$

kur  $h$  – notekūdeņu aerācijas difuzora iegremdēšanas dziļums, m;  
 $\lambda$  – gaisa padeves daudzums caur vienu diskveida difuzoru,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ;  
 $\sigma$  – diskveida difuzoru nosegtais laukums attiecībā pret visu aerācijas laukumu.  
 Gaisa padeves daudzums caur vienu diskveida difuzoru  $\lambda$  aprēķina, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$\lambda = L_g / (n_d \cdot S_a), \quad (3.9)$$

kur  $n_d$  – diskveida difuzoru īpatnējais daudzums uz aerācijas tvertnes grīdas,  $\text{m}^{-2}$ ;  
 $S_a$  – notekūdeņu aerācijas virsmas laukums,  $\text{m}^2$ ;  
 $L_g$  – uz notekūdeņu aerācijas tvertni padotais gaisa daudzums,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .  
 Diskveida difuzoru nosegtā laukuma attiecību pret visu aerācijas laukumu  $\sigma$  aprēķina, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$\sigma = n_d \cdot S_d, \quad (3.10)$$

kur  $S_d$  – diskveida difuzora aktīvais laukums,  $\text{m}^2$ .

Skābekļa izmantošanas efektivitāti nosaka, aprēķinot notekūdeņos izšķīdušā gaisa skābekļa daudzuma attiecību pret ar aerācijas iekārtām pievadītā gaisa skābekļa daudzumu, jo mikroorganismi, kas tieši piedalās notekūdeņu attīrīšanas procesā, spēj izmantot tikai notekūdeņos izšķīdušo skābekli. Skābeklis, kas tiek pievadīts notekūdeņiem, bet nepaspēj tajos izšķīst, paceļas notekūdeņu virspusē, un aizplūst atmosfērā. Jo mazāki no aerācijas sistēmas izplūstošā gaisa burbulīši, jo lielāks saskares virsmas laukums ar notekūdeņiem, un jo ilgāks šo burbulīšu kontakta laiks ar notekūdeņiem (ilgāks pacelšanās laiks līdz notekūdeņu aerācijas tvertnes virspusei), jo vairāk skābekļa izšķīst notekūdeņos (Šniders, Laizāns, 2006<sup>a</sup>).

Simulācijas modelī tika ievadīti Latvijā izmantoto NAI konstruktīvie parametri. Šo parametru izmaiņas diapazons aptver visu veidu notekūdeņu attīrīšanas ietaises – mazas, vidējas un lielas. Mazas jaudas NAI aerācijas tvertņu dziļums ir 3..4 m, vidējas jaudas – 4..6 m, bet lielas jaudas – 6..9 m. Latvijai raksturīgajās mazpilsētās un pilsētās ar iedzīvotāju skaitu no 2 līdz 70 tūkst. tiek izmantotas vidējas jaudas NAI, līdz ar to arī aerācijas tvertnes ir ar dziļuma diapazonu 4..6 m.

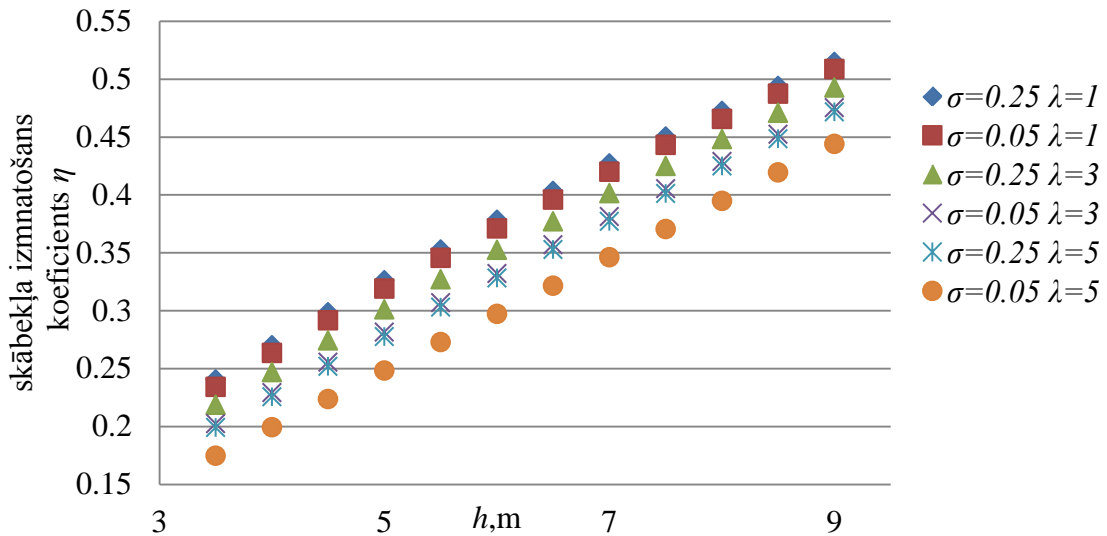
Diskveida difuzoru nosegtais laukums attiecībā pret visu aerācijas laukumu izteikts procentos, un ir robežās no 5 līdz 25%, kas pēc firmas „Flygt” datiem (Flygt, 2010) atbilst 0.6..6 diskiem uz  $1 \text{ m}^2$ .

Izmantojot izteiksmi (3.12), tika iegūtas raksturlīknes (3.8.att.), kas parāda gaisa skābekļa izmantošanas atkarību no aerācijas iekārtas konstruktīvajiem parametriem  $\eta = f(h, \lambda, \sigma)$ .

Iegūtās raksturlīknes (3.9.att.) rāda, ka skābekļa izmantošanas efektivitāti būtiski iespaido difuzoru iegremdēšanas dziļums  $h$  un gaisa padeves intensitāte  $\lambda$  caur vienu disku. Gaisa padeves intensitāti savukārt iespaido diskveida difuzoru nosegtais



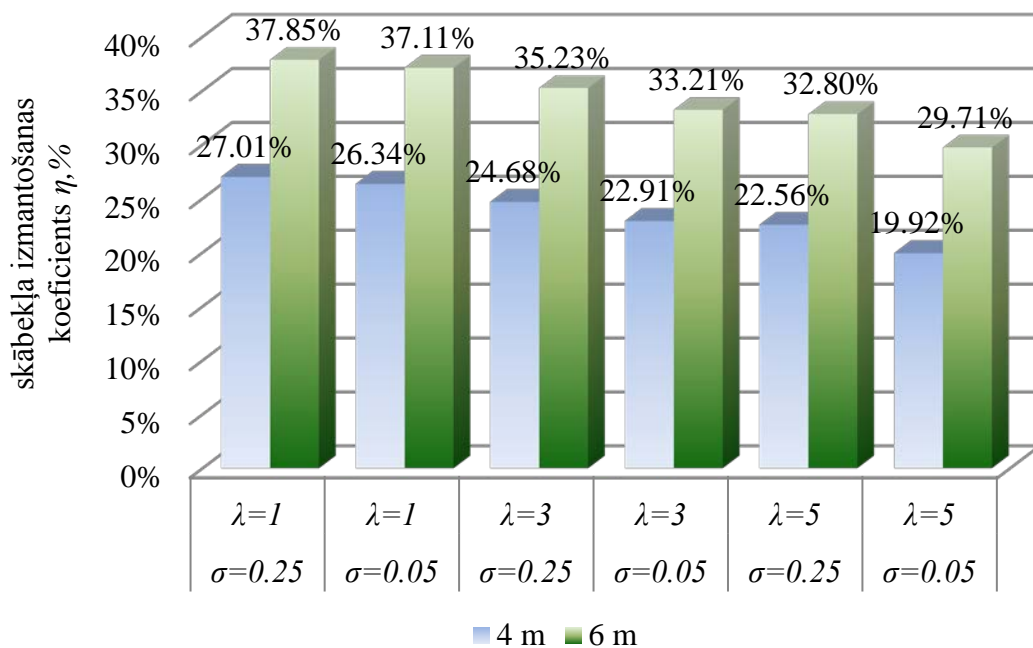
laukums attiecībā pret visu aerācijas laukumu  $\sigma$ . Jo lielāks  $\sigma$ , jo mazāks gaisa padeves daudzums caur vienu difuzoru, un līdz ar to augstāka skābekļa izmantošanas efektivitāte.



**3.8.att. Gaisa skābekļa izmantošanas koeficienta  $\eta$  atkarība  $h$ ,  $\sigma$  un  $\lambda$**

Skābekļa izmantošanas efektivitāte mainās, mainoties gan aerācijas tvertnes dziļumam  $h$ , gan difuzoru izvietojanas parametriem  $\sigma$  un gaisa padeves daudzuma caur vienu difuzoru  $\lambda$  (skat 3.9.att.).

Palielinoties aerācijas tvertnes dziļumam  $h$ , būtiski palielinās skābekļa izmantošanas efektivitāte. Savukārt, samazinot gaisa padeves daudzumu uz vienu difuzoru, kā arī samazinot spiedienu aerācijas sistēmā, samazinās gaisa pūslīšu uzpeldēšanas ātruma kinētiskā komponente, kā rezultātā palielinās pūslīšu uzpeldēšanas laiks, un pieaug to kontakta laiks ar notekūdeņiem – līdz ar to pieaug skābekļa koncentrācija notekūdeņos.



**3.9.att. Skābekļa izmantošanas efektivitāte, iegremdējot difuzoru 4 m un 6 m dziļumā, pie dažādiem  $\sigma$  un  $\lambda$**

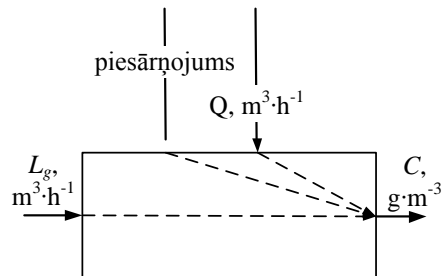
Kā ierobežojošs faktors difuzoru skaita palielināšanai un difuzoru blīvuma pieaugumam ir ekonomiskie faktori – lai palielinātu  $\sigma$ , nepieciešamas papildus investīcijas gan difuzoros, gan arī aerācijas sistēmā notekūdeņu aerācijas tvertnē. Tāpēc, izvēloties aerācijas sistēmas komponentu konstruktīvos parametrus, jāveic rūpīga tehniski ekonomiska analīze. Galvenais šīs analīzes kritērijs ir kapitālieguldījumu atmaksāšanās laiks katram aerācijas sistēmas modelim. Šo atmaksāšanās laiku būtiski ietekmē tieši ekonomiskais efekts no aerācijas procesa optimizācijas rezultātā ietaupītās elektroenerģijas (Sniders, 2004; Šnīders, Laizāns, 2006<sup>b</sup>).

Kā redzams no attēliem, visos gadījumos skābekļa izmantošanas efektivitātes pieaugums, iegremdējot difuzorus dziļāk (no 4 m uz 6 m dziļumu) dod būtisku efektivitātes pieaugumu ~3%.

Būtisku efektu dod arī aerācijas difuzoru skaita palielinājums un gaisa plūsmas intensitātes samazinājums (attiecīgi 3 un 4%), tomēr šos faktoru izmaiņas ir tieši saistītas ar investīciju apjoma pieaugumu NAI izveidē (Šnīders, Laizāns, 2007<sup>b</sup>).

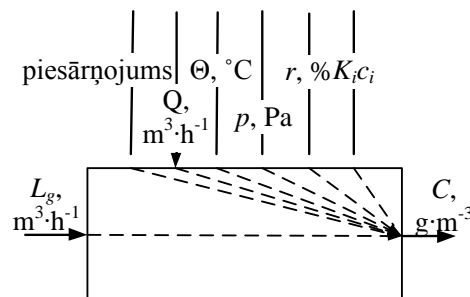
### 3.9. Aerācijas tvertnes skābekļa pārnesei statistiskā režīma matemātiskais modelis

Aerācijas tvertnes skābekļa pārnesei modelis, kuru lieto NAI, ietver sevī tikai vienu perturbāciju – notekūdeņu piesārņojumu (kas iekļauj sevī gan BSP un ŪSP). To šobrīd mēra netiešā veidā (jo trūkst operatīvu metožu un ierīču tiešas piesārņojuma intensitātes mērīšanai), nosakot skābekļa koncentrāciju attīrītajos notekūdeņos (3.10.att.). Notekūdeņu pieplūdes intensitāte  $Q$  tiek uzskaitīta, bet NAI automatiskajā vadībā netiek izmantota, kā galveno argumentu minot korelācijas trūkumu starp pieplūdes intensitāti un piesārņojuma līmeni (Olsson, et al., 2005; Spellman, 2009; Veslind, 2003).



3.10.att. Aerācijas tvertnes vienkāršotā shēma

Ievērtējot arī citas ārējās vides perturbācijas – notekūdeņu temperatūru, gaisa spiedienu un skābekļa koncentrāciju gaisā, izveidota paplašinātā aerācijas tvertnes funkcionālā shēma ar perturbācijām (3.11.attēls).



3.11.att. Aerācijas tvertnes shēma ar perturbācijām

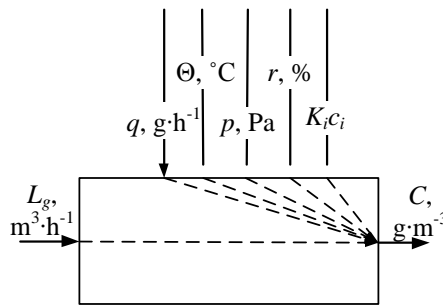
Notekūdeņu piesārņojuma līmeni var noteikt tikai laboratorijā, veicot BSP un ŪSP testus, kas prasa ievērojamu laiku – vairākas stundas. Kvalitatīvas automātiskās vadības veikšanai šāda metode neder, tādēļ tiek ieviesta kompleksa iedarbe  $q$  – skābekļa patēriņa intensitāte,  $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ , ko aprēķina pēc sekojošas izteiksmes (Šnīders, 2007<sup>a</sup>):

$$q = Q \cdot (L_a - L_t), \quad (3.11)$$

kur  $q$  – skābekļa patēriņa intensitāte,  $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  
 $L_a$  – skābekļa patēriņš notekūdeņu pilnīgai attīrīšanai,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $L_t$  – skābekļa patēriņš attīrītajos notekūdeņos,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $Q$  – notekūdeņu pieplūdes intensitāte,  $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ .

Atbilstoši regulējošajiem noteikumiem (3.pielikums, (LR MK, 2007)), summārais maksimālais skābekļa patēriņš attīrītajos notekūdeņos nedrīkst pārsniegt  $L_t = (\text{BSP}_5 + \text{ŪSP}) = (25+125) = 150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Izveidotais NAI matemātiskais modelis paredz pilnīgu notekūdeņu attīrīšanu, kuras rezultātā paliekošais BSP un ŪSP ir 0. Līdz ar to teorētiskais modelētais enerģijas patēriņš būs augstāks nekā reālās NAI, kurās tiek ievēroti LR MK noteikumos ieviestie normatīvi.

Ieviešot skābekļa patēriņa intensitātes rādītāju  $q$ , aerācijas tvertnes funkcionālā shēma mainās (3.12.attēls).



### 3.12.att. Pilnveidotā aerācijas tvertnes funkcionālā shēma ar perturbācijām

Izmantojot pētījumu rezultātus par skābekļa pārneses efektivitāti notekūdeņu aerācijas procesā (Šnīders, 2003), iegūta precīzēta izteiksme gaisa pūtēju nepieciešamā ražīguma  $L_g$  aprēķināšanai:

$$L_g = \frac{Q \cdot (L_a - L_t)}{K \cdot \eta_o \cdot (C_S - C)} = \frac{Q \cdot (L_a - L_t)}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (C_S - C)} = \frac{q}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (C_S - C)}, \quad (3.12)$$

kur  $Q$  – notekūdeņu pieplūdes daudzums,  $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ;  
 $L_a$  – skābekļa patēriņš (BSP+ŪSP) notekūdeņu pilnīgai attīrīšanai,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $L_t$  – paliekošais skābekļa patēriņš (BSP+ŪSP),  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $\eta_o$  – gaisa skābekļa izmantošanas koeficients;  
 $K$  – korekcijas koeficients, kas ievērtē aktīvo dūņu sastāvu un to aktivitāti;  
 $k_1$  – korekcijas koeficients pēc gaisa difuzoru iegremdēšanas dziļuma;  
 $k_2$  – korekcijas koeficients pēc notekūdeņu temperatūras  $\Theta$ , kas ievērtē notekūdeņus attīrošo mikroorganismu aktivitāti;  
 $k_3$  – korekcijas koeficients pēc difuzoru blīvuma  $\sigma$ , un gaisa padeves caur vienu difuzoru  $\lambda$ ,  $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ;  
 $k_4$  – korekcijas koeficients, kas ievērtē aktīvo dūņu sastāvu, konkrētā pētījumā, uzskatot, ka aktīvo dūņu aktivitāte ir optimāla,  $k_4=1$ ;  
 $C_S$  – skābekļa šķīdība,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $C$  – skābekļa koncentrācija notekūdeņos,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Korekcijas koeficients  $k_1$ , kurš raksturo skābekļa burbulīšu saskares laiku un skābekļa koncentrācijas burbulītī ietekmi uz skābekļa šķīdību, tiek aprēķināts,

izmantojot empīrisku formulu (3.13) (Šnīders, Laizāns, 2007<sup>a</sup>), un to pilnveidojot, ieviešot saistību ar skābekļa koncentrāciju gaisā, ko pievada aerācijas kompresors:

$$k_1 = 5,8(1 - \exp(-0.1 \cdot h)) = 27.66 r_{O_2} (1 - \exp(-0.1 \cdot h)), \quad (3.13)$$

kur  $h$  – difuzoru iegremdēšanas dziļums, m;  
 $r_{O_2}$  – skābekļa koncentrācija gaisā pēc tilpuma.

Korekcijas koeficients  $k_2$ , kas ievērtē notekūdeņus attīrošo mikroorganismu aktivitātes atkarību no temperatūras, tiek aprēķināts, izmantojot empīrisku formulu (3.14) (Šnīders, Laizāns, 2007<sup>a</sup>):

$$k_2 = 0.02\Theta + 0.6, \quad (3.14)$$

kur  $\Theta$  – notekūdeņu temperatūra, °C.

Korekcijas koeficients  $k_3$ , kas ievērtē aerācijas tvertnes konstruktīvos parametrus – tvertnes dziļumu, apskābekļojošo difuzoru izvietojumu un gaisa padevi caur difuzoriem, tiek aprēķināts, izmantojot empīrisku formulu (3.15) (Šnīders, Laizāns, 2007<sup>a</sup>):

$$k_3 = \exp(-(0.11 - 0.008 \cdot h) \cdot \lambda \cdot \exp(-2.2 \cdot \sigma)), \quad (3.15)$$

kur  $\sigma$  – difuzoru blīvums;  
 $\lambda$  – gaisa padeve caur vienu difuzoru, m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>;  
 $h$  – difuzoru iegremdēšanas dziļums, m.

Izvērsta gaisa pūtēju nepieciešamā ražīguma  $L_g$  aprēķināšanas izteiksme, ievērtējot izteiksmes (3.7), (3.12), (3.13), (3.14) un (3.15), kas apraksta skābekļa šķīdību  $C_0$  un koeficientus  $k_1$ ,  $k_2$ , un  $k_3$ , iegūst sekojošu izskatu (3.16):

$$L_g = \frac{q}{27.66 \cdot r_{O_2} \cdot (1 - \exp(-0.1 \cdot h)) \cdot (0.02 \cdot \Theta + 0.6) \cdot (\exp(-(0.11 - 0.008 \cdot h) \cdot \lambda \cdot \exp(-2.2 \cdot \sigma))) \cdot (C_0 - C)} = \frac{q \cdot (\exp((0.11 - 0.008 \cdot h) \cdot \lambda \cdot \exp(-2.2 \cdot \sigma)))}{27.66 \cdot r_{O_2} \cdot (1 - \exp(-0.1 \cdot h)) \cdot (0.02 \cdot \Theta + 0.6) \left( \frac{0.668 \cdot r_{O_2} \cdot (p_a + (-0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91) \cdot g \cdot h \cdot 10^{-3})}{\exp(\sum K_i c_i + 0.0219 \cdot \Theta)} - C \right)}. \quad (3.16)$$

Kā redzams no (3.16) izteiksmes, skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē ir atkarīga no mainīgiem argumentiem  $L_g$ ,  $Q$ ,  $L_a$ ,  $\Theta$ ,  $r_{O_2}$ ,  $p_a$ ,  $c_i$ , un diviem konstantiem aerācijas tvertnes konstrukciju raksturojošiem parametriem  $h$  un  $\sigma$ .

No izteiksmes (3.12) var izteikt izšķīdušā skābekļa koncentrāciju kā funkciju no četriem mainīgiem argumentiem  $L_g$ ,  $Q$ ,  $L_a$ ,  $\Theta$  un diviem konstantiem parametriem  $h$  un  $\sigma$ .

Pārveidojot izteiksmi (3.12), un izmantojot izteiksmes  $k_1$ ,  $k_2$ , un  $k_3$ , tiek iegūta izteiksme (3.17), kas ļauj aprēķināt skābekļa koncentrāciju attīrītajos notekūdeņos, izmantojot sakarību starp aerācijas tvertnes konstruktīvajiem parametriem  $h$ ,  $\sigma$ , skābekļa šķīdību ūdenī, vides temperatūru  $\Theta$  un gaisa padeves intensitāti  $L_g$ .

$$C = C_0 - \frac{q}{L_g \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (3.17)$$

Izvērstā izteiksmes (3.17) forma, izmantojot izteiksmi (3.7), izskatās sekojoši:

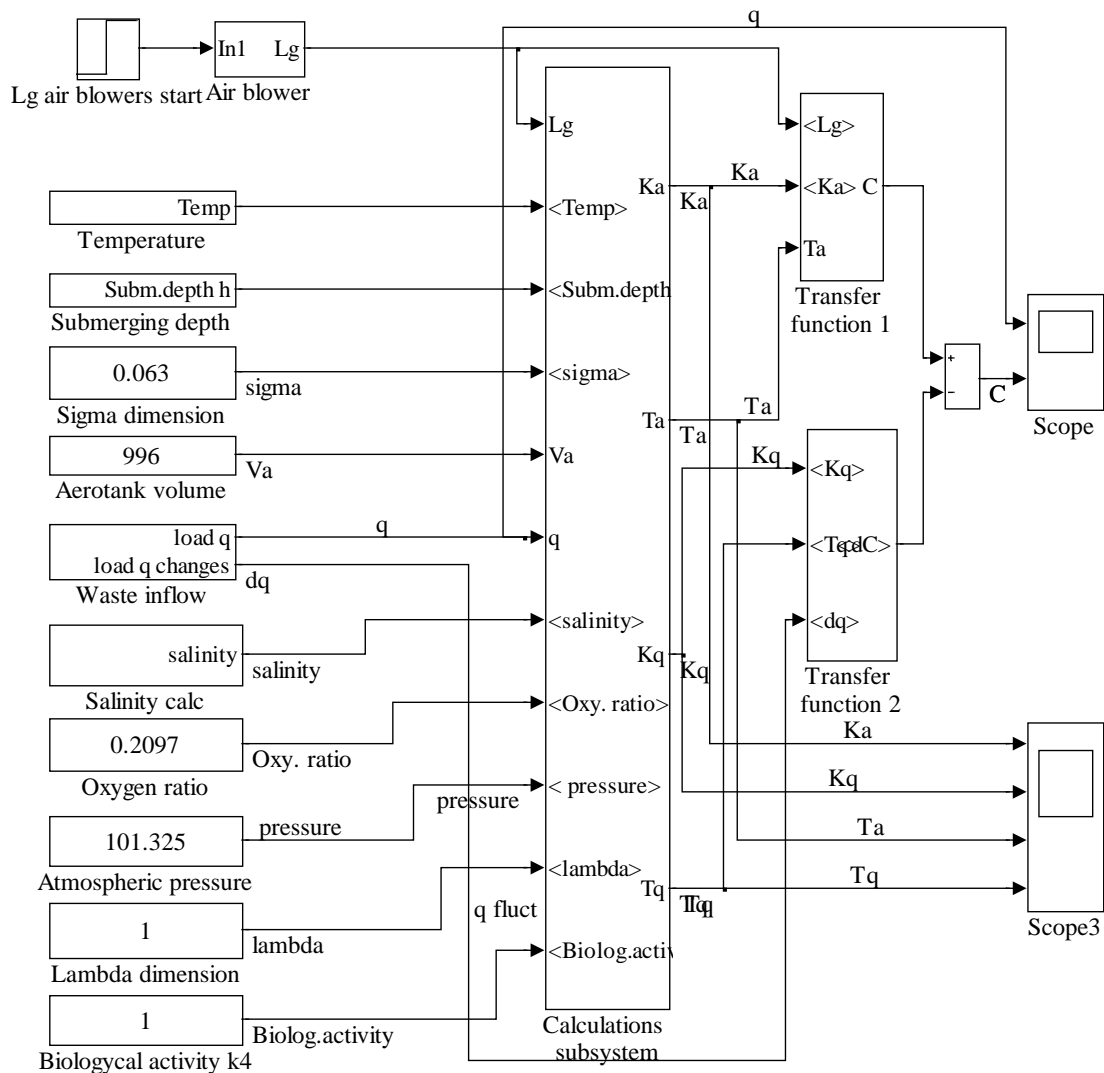
$$C = \frac{0.668 \cdot r_{O_2} \cdot \left( p_a + \left( -0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91 \right) \cdot g \cdot h \cdot 10^{-3} \right)}{\exp\left(\sum K_i c_i + 0.0219 \cdot \Theta\right)} - \frac{q \cdot \left( \exp\left(\left(0.11 - 0.008 \cdot h\right) \cdot \lambda \cdot \exp(-2.2\sigma)\right) \right)}{27.66 \cdot r_{O_2} \cdot \left(1 - \exp(-0.1 \cdot h)\right) \cdot \left(0.02 \cdot \Theta + 0.6\right) \cdot L_g} \quad (3.18)$$

Iegūtā izteiksme (3.18) ir aerācijas tvertnes skābekļa pārneses statistiskais matemātiskais modelis, kurā parādīta saistība starp notekūdeņos izšķīdušā skābekļa koncentrāciju  $C$ , notekūdeņu piesārņojumu  $q$  un gaisa padevi  $L_g$  no aerācijas kompresora.

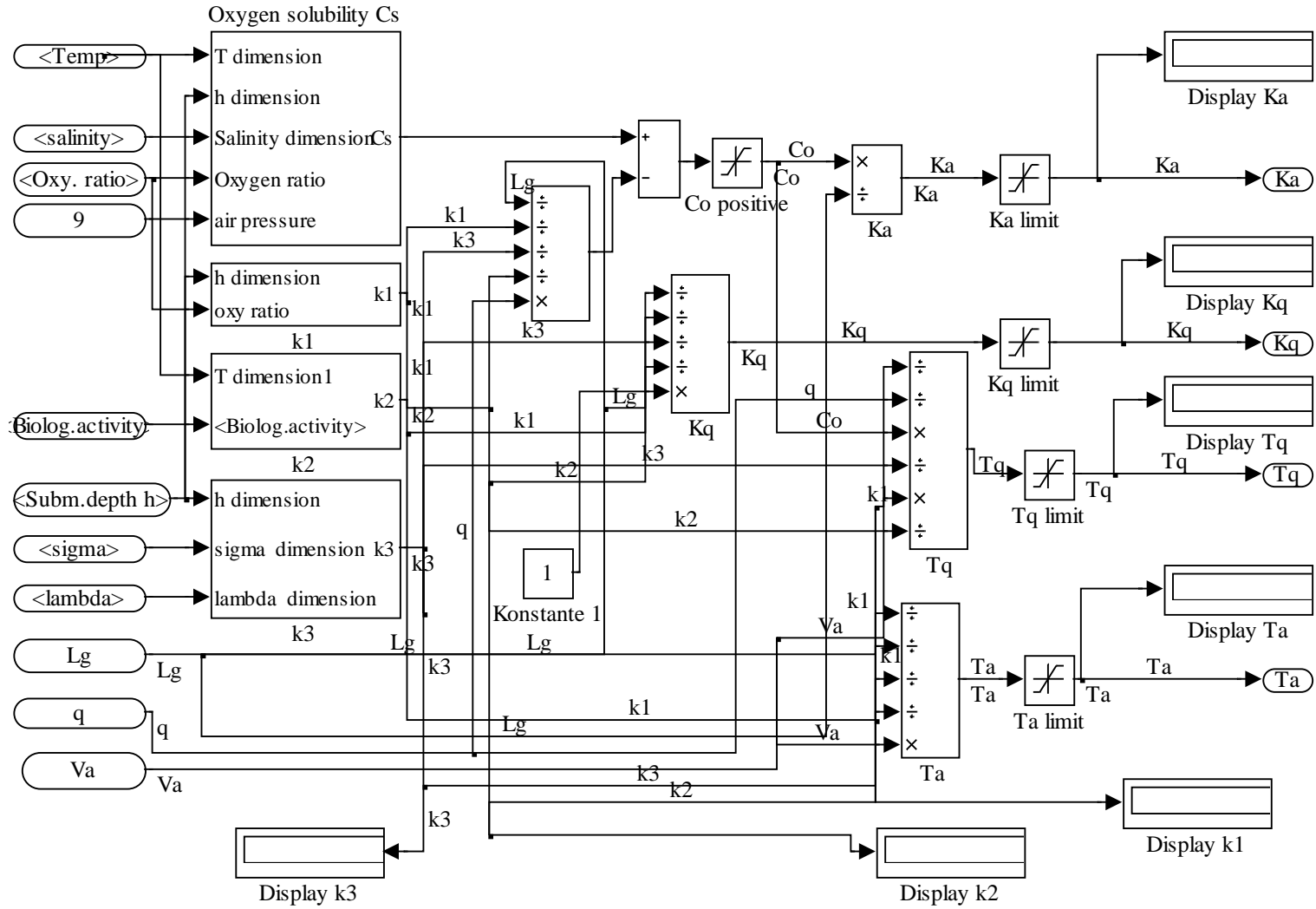
Lai pārbaudītu mainīgo parametru ietekmi uz skābekļa koncentrāciju  $C$ , tika veikta datortsimulācija, izmantojot iegūto statistiskā matemātiskā modeļa izteiksmi (3.18) un Preiļu NAI datus.

Modelēšanai tika izmantots Matlab Simulink vidē izveidots modelis (3.13.att.).

Blokhēmā kreisajā pusē novietotie bloki nodrošina NAI konstruktīvo parametru un perturbāciju ievadi modelī – tajos ir gan nemainīgie aerācijas tvertnes konstruktīvie un tehnoloģiskie parametri, gan ārējās vides parametri – perturbācijas, kas ietekmē skābekļa šķīdību.



3.13.att. Aerācijas tvertnes statisko koeficientu aprēķina blokhēma



3.14.att. Aerācijas tvertnes simulācijas modelis – subsistēma „Calculation subsystem”, inerces un jutības rādītāju aprēķināšanai nepārtrauktā režīmā

Bloks „Calculation subsystem” nodrošina aerācijas tvertnes matemātiskā modeļa simulāciju, bet bloki „Transfer function1” un „Transfer function2” – aerācijas tvertnes pārvades funkcijas aprēķinu simulācijas procesā nepārtrauktā režīmā.

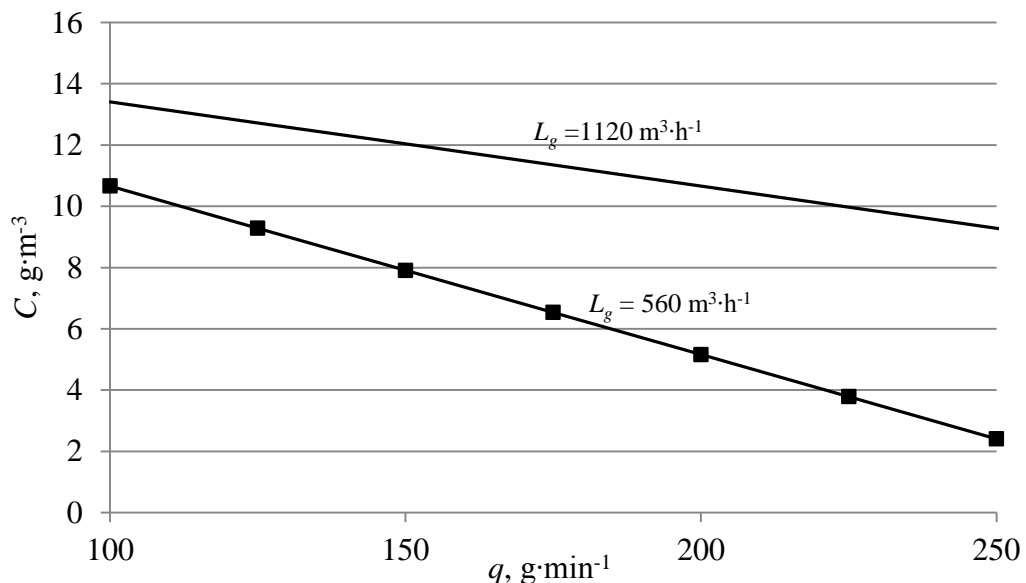
Subsistēma „Calculation subsystem”, kas veic koeficientu aprēķinu, parādīta 3.14.attēlā.

Subsistēmā „Calculation subsystem” ietverti gan skābekļa šķīdības aprēķina bloks  $C_S$ , gan koeficientu  $k_1$ ,  $k_2$  un  $k_3$  aprēķina bloki, gan arī pārvades funkcijas koeficientu aprēķina bloki. Aprēķinam tiek izmantoti gan absolūti nemainīgi parametri – aerācijas tvertnes konstruktīvie parametri, gan kvazinemainīgie parametri –  $\Theta$ ,  $p_a$ ,  $r_{O_2}$ , gan arī mainīgie parametri  $L_g$  un  $q$ .

Sākuma nosacījumi modelēšanai:

- notekūdeņu temperatūra  $\Theta=14^\circ\text{C}$ ;
- aerācijas difuzoru iegremdēšanas dziļums  $h=6\text{ m}$ ;
- atmosfēras spiediens  $p_a=1\text{ bar}$  vai  $760\text{ mmHg}$  vai  $101.325\text{ kPa}$ ;
- skābekļa koncentrācija gaisā  $20.97\%$ , tātad  $r_{O_2}=0.2097$ ;
- minimālā izšķīdušo sāļu kombinācija –  $c_{K^+}=7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{OH^-}=100\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{Mg^{2+}}=15\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{SO_4^{2-}}=15\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{PO_4^{3-}}=20\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{Cl^-}=20\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{Na^+}=40\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{NH_3}=30\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{NH_4^+}=30\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c_{NO_3^-}=40\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- aerācijas tvertnes tilpums  $V_a=996\text{ m}^3$ ;
- aerācijas kompresoru ražīgums  $L_{g1}=560\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , un  $L_{g2}=1120\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
- gaisa padeves daudzums caur vienu diskveida difuzoru  $\lambda=1\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ ;
- diskveida difuzoru nosegtais laukums attiecībā pret visu aerācijas laukumu  $\sigma=0.063$ ;
- piesārņojums (BSP+KSP) mainās robežās no  $100\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  līdz  $500\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- notekūdeņu pieplūdes intensitāte  $Q$  svārstās robežās no  $0.5\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$  līdz  $1\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$  (attiecīgi no  $30\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  līdz  $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ). Aprēķinātais  $q$  tad svārstās robežās no  $50\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  līdz  $500\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  (attiecīgi no  $3000\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$  līdz  $30000\text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

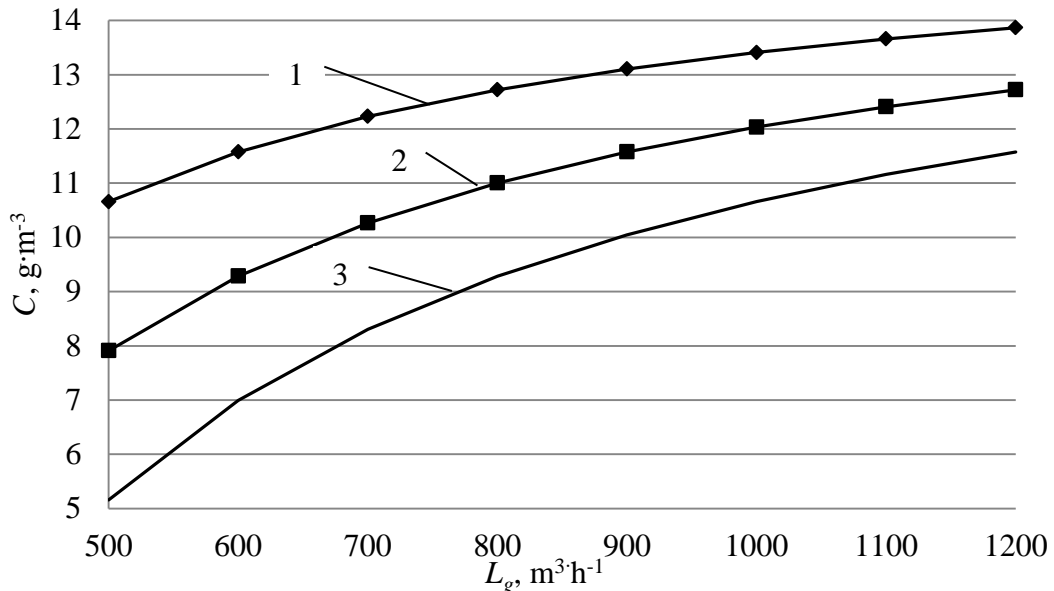
Modelēšanas rezultāti parādīti 3.15. un 3.16.attēlā.



3.15.att. Skābekļa koncentrācijas  $C$  atkarība no slodzes  $q$  pie dažādas aerācijas intensitātes  $L_g$

Modelēšanas rezultātu analīze liecina par to, ka izšķīdušā skābekļa koncentrācija notekūdeņos pieaug, ja pieaug gaisa padeve  $L_g$ , un samazinās, ja pieaug slodze  $q$ .

Grafiks 3.16.attēlā parāda, ka sakarība  $C=f(L_g)$  ir nelineāra, un var tikt linearizēta tikai šauros apgabalos. Līdz ar to nepieciešams nepārtraukts pārvades koeficientu pārrēķins, lai nodrošinātu modeļa atbilstību reāliem procesiem aerācijas tvertnē.



**3.16.att. Skābekļa koncentrācijas  $C$  atkarība no aerācijas intensitātes  $L_g$ ,  $C=f(L_g)$ , pie dažādās slodzēs  $q$**

1–  $q=100$  g·min<sup>-1</sup>; 2–  $q=150$  g·min<sup>-1</sup>; 3–  $q=200$  g·min<sup>-1</sup>

### 3.10. Skābekļa pārneses procesa nestacionārais matemātiskais modelis

Skābekļa pārneses nestacionāro procesu aerācijas tilpnē apraksta, pieņemot, ka gaisa sadale pa visu aerācijas laukumu ir vienmērīga un izšķīdušā skābekļa koncentrācija aerācijas tilpumā ir izlīdzināta. Tad iegūst skābekļa pārneses bilances vispārīgo vienādojumu (Sniders, Skrastins, 1995; Sniders 1997):

$$T_a \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_a \Delta L_g, \quad (3.19)$$

kur  $T_a$  – aerācijas tilpnes laika konstante, min;  
 $K_a$  – aerācijas tilpnes statiskais pārvades koeficients,  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ ;  
 $\Delta C$  – skābekļa koncentrācijas izmaiņa,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $\Delta L_g$  – kompresora ražīguma izmaiņa,  $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ .

Aerācijas tilpnes laika konstanti  $T_a$ , kas raksturo pārejas procesa inerci, var aprēķināt, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$T_a \approx \frac{V_a}{L_g \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (3.20)$$

Kā redzams no 3.20.izteiksmes,  $T_a$  ir mainīgs lielums, jo procesa regulēšanas laikā tā skaitliskā vērtība mainās apgriezti proporcionāli aerācijas kompresora ražīgumam.

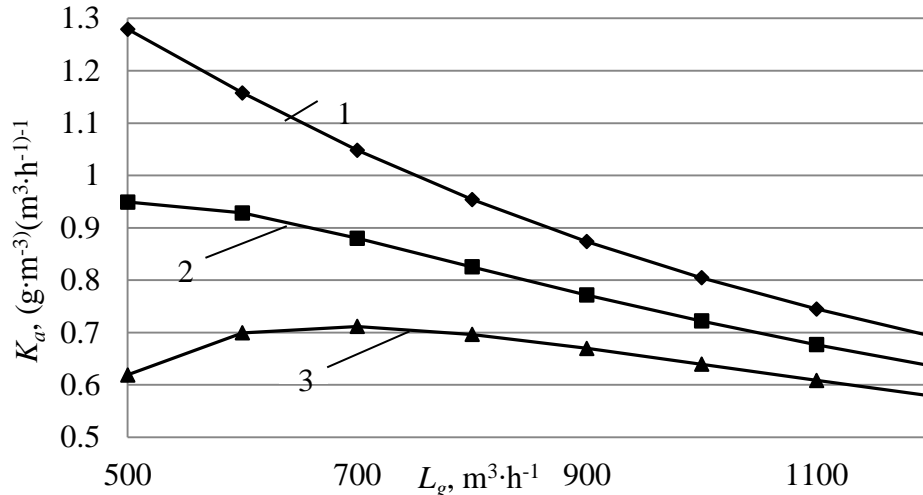
Aerācijas tilpnes pārvades koeficientu  $K_a$ , kas raksturo tās jutību pret regulējošo iedarbi  $\Delta L_g$ , var aprēķināt, izmantojot sekojošu izteiksmi:



$$K_a = \frac{C}{L_g} = \frac{C_s}{L_g} - \frac{q}{L_g^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4} \quad (3.21)$$

Kā redzams no 3.21.izteiksmes,  $K_a$  ir mainīgs lielums, jo procesa regulēšanas laikā tā skaitliskā vērtība mainās pēc sarežģītas sakarības atkarībā no aerācijas kompresora ražīguma un slodzes. Jūtības samazināšanās izskaidrojama ar to, ka palielinot  $L_g$  samazinās skābekļa izmantošanas efektivitāte.

Rādītāja  $K_a$  un  $L_g$  sakarības modelēšanas rezultāti pie nemainīgiem pārējiem parametriem parādīti 3.17.attēlā.

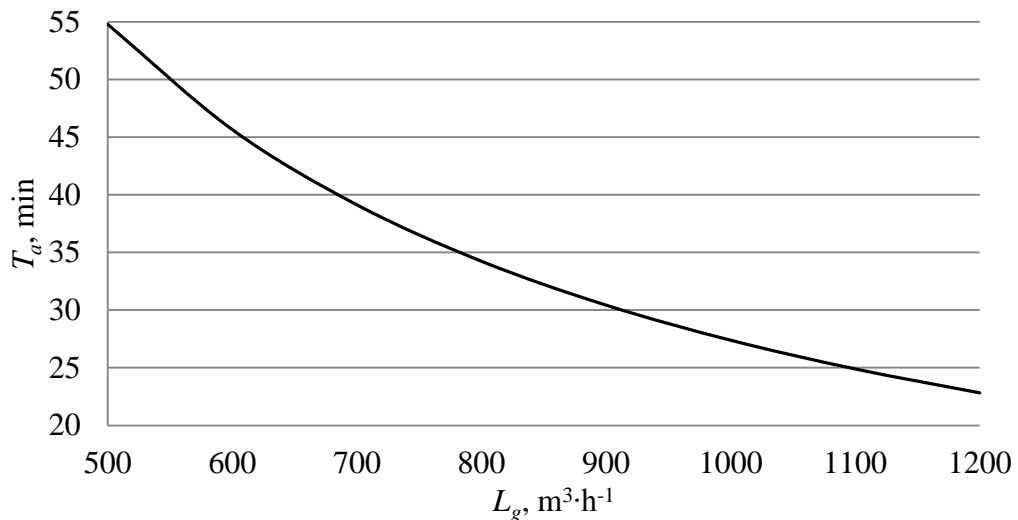


**3.17.att. Aerācijas tilpnes jutības faktora  $K_a$  izmaiņas atkarībā no aerācijas intensitātes  $L_g$ ,  $K_a=f(L_g)$ , pie dažādas perturbācijas  $q$  intensitātes**

1–  $q=100 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 2–  $q=150 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 3–  $q=200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$

Kā redzams no 3.17 attēla,  $K_a$  mainās, mainoties  $L_g$  un  $q$ . Modeļa darbības diapazonā, pieaugot  $L_g$  vai  $q$ ,  $K_a$  samazinās. Vienlaicīgi var ievērot, ka  $K_a$  grafikam ir ekstrēms pie mazām  $L_g$  un lielām piesārņojuma  $q$  vērtībām – līknei ir pārliekuma punkts. Līdz ar to precīzai aerācijas tvertnes modelēšanai ir jāparedz  $K_a$  pārrēķinu. Var secināt arī, ka aerācijas tvertne ir nelineārs nestacionārs objekts ar mainīgu jutību.

Rādītāja  $T_a$  un  $L_g$  sakarības modelēšanas rezultāti pie nemainīgiem pārējiem parametriem parādīti 3.18.attēlā.



**3.18.att. Aerācijas tilpnes inerces faktora  $T_a$  izmaiņas atkarībā no aerācijas intensitātes  $L_g$ ,  $T_a=f(L_g)$**

Kā redzams no 3.18 attēla,  $T_a$  mainās, mainoties  $L_g$ . Modeļa darbības diapazonā, palielinoties  $L_g$ ,  $T_a$  samazinās. Līdz ar to precīzai aerācijas tvertnes modelēšanai ir jāparedz  $T_a$  pārrēķinu. Var secināt arī, ka aerācijas tvertne ir nelineārs nestacionārs objekts ar mainīgu inerci.

Aerācijas tvertnes inerces faktors  $T_a$  un jutības faktors  $K_a$  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. Līdz ar to ir nekorekti saukt tos par konstantēm, tādēļ tiek ierosināts turpmāk  $T_a$  saukt par aerācijas tvertnes inerces faktoru jeb rādītāju, un  $K_a$  – par aerācijas tvertnes jutības faktoru jeb rādītāju.

Tālākai aerācijas tvertnes matemātiskā modeļa izmantošanai ir jānodefinē modeļa darbības diapazons. Svarīgākie ierobežojumi saistīti ar aerācijas kompresora ražīguma un skābekļa koncentrācijas diapazonu.

Kā rāda eksperimentālie pētījumi, skābekļa koncentrācija notekūdeņos parastos apstākļos nevar pārsniegt  $C_{MAX}=20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , bet apakšējo robežu  $C_{MIN}=0.20..0.40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , nosaka tas, ka aerācijas tvertnes virsma ir saskarē ar gaisu, un pat bez ārējās gaisa vai skābekļa piespiedu padeves uz aerācijas tvertni notiek skābekļa šķīšana. Līdz ar to skābekļa šķīdības diapazons ir robežās no  $0.20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3} \leq C \leq 20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Aerācijas kompresora ražīgumu  $L_g$  ierobežo divi faktori – augšējo robežu nosaka aerācijas kompresoru darbība nominālā režīmā ar ražīgumu  $L_{gNOM}$  (aerācijas kompresoru piedziņas asinhrono elektrodzinēju darbība ar nominālo frekvenci 50 Hz), bet apakšējo robežu nosaka nepieciešamība ar aerācijas gaisa plūsmu nodrošināt gan notekūdeņu maisīšanu, lai iegūtu pēc iespējas homogēnāku maisījumu un nodrošinātu aktīvo dūņu piekļuvi visam piesārņojumam, gan cieto suspendēto daļiņu uzturēšanu peldošā stāvoklī, lai nodrošinātu to pārnesei uz nostādinātājiem.

Vadāmu frekvences pārveidotāju izmantošana aerācijas kompresoru elektropiedziņas nodrošināšanā dod iespēju uzturēt stabīlu kompresoru darbību pie samazinātas barošanas sprieguma frekvences. Modernie frekvenču pārveidotāji nodrošina frekvenču diapazonu no 20 Hz līdz 50 Hz, līdz ar to var uzskatīt, ka minimālais aerācijas kompresora ražīgums ir 40% no nominālā. Līdz ar to aerācijas kompresora ražīguma diapazons ir robežās  $0.40 L_{gNOM} \leq L_g \leq L_{gNOM}$ .

Aerācijas tvertnes skābekļa pārnesei matemātiskais modelis tiek izveidots, izmantojot superpozīcijas principu, kurš paredz katra mainīgā sadalīšanu statistiskajā un dinamiskajā komponentē. Statiskā komponente parāda mainīgā statisko vērtību, dinamiskā komponente – tā novirzes no statistiskās vērtības. Dinamiskā komponente var būt gan ar pozitīvām, gan ar negatīvām vērtībām.

Skābekļa koncentrāciju  $C$  un skābekļa patēriņu  $q$  pārveidojam kā statistiskās un dinamiskās komponentes summas:

$$C = C_{ST} \pm \Delta C, \quad (3.22)$$

un

$$q = q_{ST} \pm \Delta q. \quad (3.23)$$

Skābekļa patēriņa  $q$  statistiskā un dinamiskā komponentes sastāv no divām ietekmēm – notekūdeņu pieplūdes intensitātes un skābekļa patēriņa tajos (BSP+KSP):

$$q_S = Q_0 \cdot L_r, \quad (3.24)$$

un

$$\Delta q = \Delta Q \cdot L_r, \quad (3.25)$$

kur  $Q_0$  – notekūdeņu pieplūdes intensitāte,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $\Delta Q$  – notekūdeņu pieplūdes izmaiņa,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;

$L_r$  – skābekļa patēriņš notekūdeņu attīrīšanai (BSP + ĶSP),  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Kā tika parādīts iepriekšējās nodaļās, BSP un ĶSP ir atkarīgs no notekūdeņu sastāva, un to nosaka gan organisko vielu, gan amonija, gan fosfora sāļu koncentrācija, jo visu šo piemaisījumu biodegradācijai nepieciešams skābeklis.

Slodzes bilances vienādojumu apraksta sekojoša izteiksme:

$$T_q \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_q \Delta q, \quad (3.26)$$

kur  $T_q$  – piesārņojuma pārejas procesa laika konstante, min;  
 $K_q$  – slodzes (piesārņojuma) pārvades koeficients,  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ ;  
 $\Delta C$  – skābekļa koncentrācijas izmaiņa,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $\Delta q$  – piesārņojuma izmaiņa,  $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Piesārņojuma pārejas procesa laika konstanti  $T_q$ , kas raksturo piesārņojuma  $q$  pārejas procesa inerci, var aprēķināt, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$T_q \approx \frac{V_a \cdot C}{q \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}, \quad (3.27)$$

kur  $V_a$  – aerācijas tvertnes tilpums,  $\text{m}^3$ .

Kā redzams no 3.27.izteiksmes,  $T_q$  ir mainīgs lielums, jo procesa regulēšanas laikā tā skaitliskā vērtība mainās apgriezti proporcionāli perturbācijai  $q$  un tieši proporcionāla skābekļa koncentrācijai  $C$ .

Līdz ar to ir nekorekti  $T_q$  saukt par konstanti, tādēļ tiek ierosināts turpmāk to saukt par slodzes inerces faktoru jeb rādītāju.

Aerācijas tilpnes slodzes statisko pārvades koeficientu  $K_q$ , kas raksturo tās jutību pret slodzi  $q$ , var aprēķināt, izmantojot sekojošu izteiksmi:

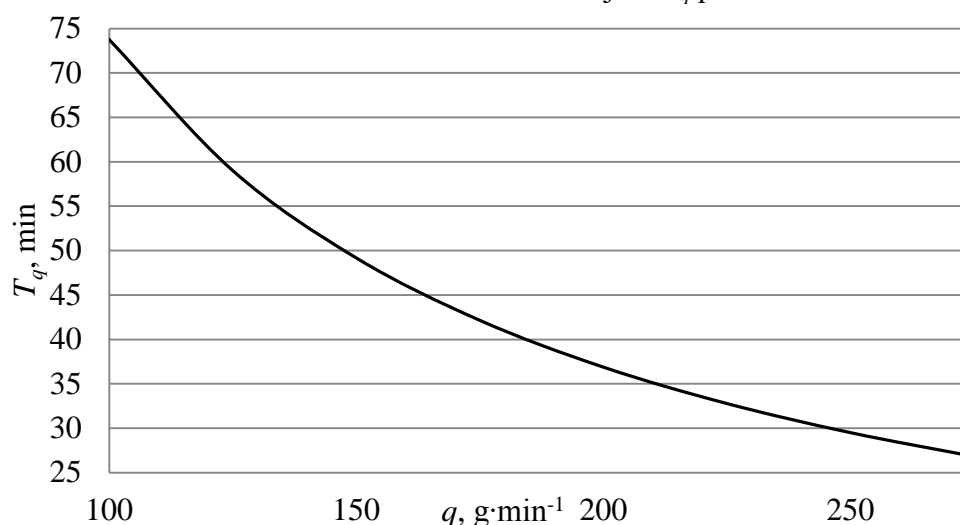
$$K_q = \frac{\Delta C}{\Delta q} = \frac{1}{L_g \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (3.28)$$

Kā redzams no 3.28.izteiksmes,  $K_q$  ir mainīgs lielums, jo procesa regulēšanas laikā tā skaitliskā vērtība mainās apgriezti proporcionāli aerācijas kompresora ražīgumam  $L_g$ .

Līdz ar to ir nekorekti arī  $K_q$  saukt par konstanti, tādēļ tiek ierosināts turpmāk to saukt par slodzes jutības faktoru jeb rādītāju.

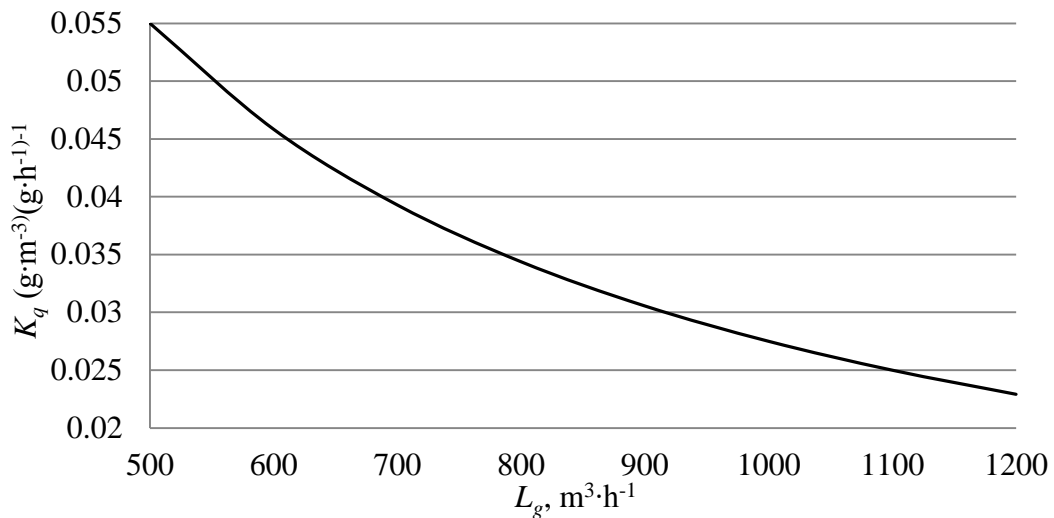
Tika pārbaudīts, kā slodzes perturbāciju iespaidā mainās slodzes jutības faktors  $K_q$  un slodzes inerces faktors  $T_q$  – tika modelētas aerācijas tvertnes dinamiskās īpašības.

Modelēšanas rezultāti slodzes inerces rādītājam  $T_q$  parādīti 3.19.att.



3.19.att. Slodzes inerces faktora  $T_q$  izmaiņas atkarībā no slodzes  $q$ ,  $T_q=f(q)$

Modelēšanas rezultāti aerācijas tvertnes perturbācijas jutības faktoram  $K_q$  parādīti 3.20.att.



**3.20.att. Slodzes jutības faktora  $K_q$  izmaiņas atkarībā no aerācijas intensitātes  $L_g$ ,  $K_q = f(L_g)$**

Kā redzams no 3.19. un 3.20.att.,  $K_q$  un  $T_q$  ir nelineāri mainīgie, kas būtiski mainās aerācijas kompresoru ražīguma izmaiņu iespaidā.

Inerces faktoru un jutības faktoru modelēšana un to analītiskie pētījumi rāda, ka šie faktori ir nelineāri, un to linearizācija aerācijas tvertnes dinamiskajā modelī pieļaujama tikai šauros, iepriekš definētos apgabalos.

Tajā pašā laikā strauju slodzes perturbāciju gadījumā aerācijas tvertnes dinamiskie parametri var ļoti būtiski atšķirties no lieneārzētājā modelī pieņemtajiem lielumiem. Turklāt jāsecina, ka nevar izmantot statistiskus  $T_a$ ,  $T_q$ ,  $K_a$  un  $K_q$  lielumus, bet ir nepieciešams to pārrēķins katrai konkrētai situācijai.

Tādējādi iegūts apstiprinājums hipotēzei, ka aerācijas tvertne ir nelineārs nestacionārs objects ar mainīgu jutību un inerci, un pieaugot perturbācijai  $q$ , tās jutība samazinās.

Slodzes perturbāciju ietekmi uz skābekļa koncentrācijas izmaiņām notekūdeņos nosaka izteiksme, ko iegūst no (3.17) izteiksmes:

$$\Delta C = \pm \frac{\Delta q}{L_g \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4} \quad (3.29)$$

Aerācijas tvertni var uzskatīt par pirmās kārtas inerciālu jeb aperiodisku posmu ar mainīgiem jutības un inerces rādītājiem.

Aerācijas tvertnes dinamiskos pārejas procesus pa regulējošās iedarbes  $L_g$  un perturbācijas iedarbes  $q$  ietekmes kanāliem apraksta pirmās kārtas nelineāru un nestacionāru diferenciālvienādojumu sistēma, kura ievērtē gan tās statiskās, gan dinamiskās īpašības:

$$\begin{cases} T_a(L_g) \cdot \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_a(L_g, q) \cdot L_g \\ T_q(q) \cdot \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_q(L_g) \cdot \Delta q \end{cases} \quad (3.30)$$

Pārvades funkciju iegūst algebrizējot diferenciālvienādojumu. Automātiskās vadības teorijā galvenokārt izmanto Laplasa transformācijas paņēmieni.

Pielietojot Laplasa transformāciju, aerācijas kompresora sistēmas diferenciālvienādojumus var pārvērst normālvienādojumos (operatorvienādojumos):

$$\begin{cases} (T_a(L_g) \cdot s + 1) \cdot C_{ST}(s) = K_a(L_g, q) \cdot L_g(s) \\ (T_q(L_g) \cdot s + 1) \cdot \Delta C(s) = K_q(L_g) \cdot \Delta q(s) \end{cases} \quad (3.31)$$

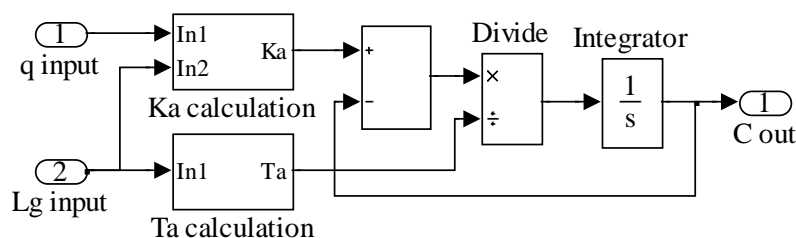
kur  $s$  – Laplasa arguments,  $s^{-1}$ .

Pārvades funkcija (3.33) var tikt pārrakstīta sekojošā fomā:

$$\begin{cases} W_a(s) = \frac{C_{ST}(s)}{L_g(s)} = \frac{K_a(L_g, q)}{T_a(L_g) \cdot s + 1} \\ W_q(s) = \frac{\Delta C(s)}{\Delta q(s)} = \frac{K_q(L_g)}{T_q(L_g) \cdot s + 1} \end{cases} \quad (3.32)$$

Ievērtējot regulējošās iedarbes un perturbācijas jutības un inerces rādītāju mainīgo dabu, šo pārvades funkciju var izmantot aerācijas tvertnes virtuālā modeļa izveidei un vadības principa pārbaudei.

Automātiskās vadības modelēšanā pašreiz lietojamie pārvades funkcijas realizācijas paņēmieni neatļauj tiešā veidā mainīt inerces un jutības rādītāju skaitliskās vērtības, jo tiek uzskatīts, ka tie ir nemainīgi lielumi. Tā kā tika konstatēta šo rādītāju atkarība no regulējošās iedarbes un perturbācijām, bija nepieciešams izveidot īpašu pārvades funkcijas ar mainīgiem inerces un jutības rādītājiem bloku. Analītisko pētījumu rezultātā tika izveidots inovatīvs pārvades funkcijas ar mainīgiem koeficientiem simulācijas bloks. Regulējošās iedarbes pārvades funkcijas  $W_a(s)$  realizācijas piemērs parādīts 3.21.attēlā.



### 3.21.att. Pārvades funkcija $W_a(s)$ ar nestacionāriem inerces un jutības faktoriem

Pa informācijas ievades kanāliem „q input” un „Lg input” pārvades funkcijā tiek ievadītas piesārņojuma un aerācijas kompresora momentānā ražīguma vērtības, blokos „Ka calculation” un „Ta calculation” notiek jutības un inerces faktoru aprēķins, un tālāk tiek realizēta pārvades funkcija, izejā iegūstot skābekļa koncentrācijas aerācijas tvertnē  $C$  vērtību. Tālākai aerācijas sistēmas modelēšanai tika novērtēti arī citu perturbāciju inerces rādītāji. Līdzīgi tiek realizēta arī pārvades funkcija sodzes kanālam  $W_q(s)$ .

Tika pārbaudīta arī citu iedarbes kanālu dinamsikās iedarbe. Aerācijas tvertnes temperatūras iedarbes kanāla inerces rādītājs  $T_\theta$  aprēķināms, izmantojot izteiksmi:

$$T_\theta \approx \frac{V_a}{Q}, \quad (3.33)$$

kur  $V_a$  – aerācijas tvertnes tilpums,  $m^3$ ;  
 $Q$  – notekūdeņu pieplūdes intensitāte,  $m^3 \cdot h^{-1}$ .

Preiļu NAI aerācijas tvertnes tilpums ir  $V_a = 996 \text{ m}^3$ , un notekūdeņu pieplūdes intensitāte  $Q$  svārstās robežās no  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  līdz  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (attiecīgi no  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  līdz  $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ). Aerācijas tvertnes temperatūras iedarbes kanāla inerces faktors pie maksimālās notekūdeņu pieplūdes intensitātes  $Q = 1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  ir:

$$T_{\ominus} = \frac{996}{1} = 996(\text{min}).$$

Modelējot jāņem vērā tas, ka šis inerces faktors ir atkarīgs no notekūdeņu pieplūdes intensitātes  $Q$  – jo mazāka pieplūde, jo lielāka inerce.

Aerācijas inženiersistēmas skābekļa koncentrācijas gaisā iedarbes kanāla inerces faktors  $T_{r_{O_2}}$  aprēķināms, izmantojot izteiksmi:

$$T_{r_{O_2}} \approx \frac{l \cdot S}{L_g} = \frac{l \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot L_g}, \quad (3.34)$$

kur  $l$  – aerācijas cauruļvadu garums, m;  
 $L_g$  – aerācijas ietaises ražīgums,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $S$  – aerācijas cauruļvada šķērsriezuma laukums,  $\text{m}^2$ ;  
 $d$  – aerācijas cauruļvadu diametrs, m.

Preiļu NAI kopējais cauruļvadu garums ir  $l = 60 \text{ m}$ , un to diametrs  $d = 350 \text{ mm} = 0.35 \text{ m}$ . Skābekļa koncentrācijas gaisā iedarbes kanāla inerces faktors pie maksimālās ražības  $L_g = 2 \cdot 560 = 1120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  ir

$$T_{r_{O_2}} = \frac{60 \cdot \pi \cdot 0.35^2}{4 \cdot 1120} = 0.00515(\text{h}) = 0.31(\text{min}).$$

Modelējot jāņem vērā tas, ka šis inerces faktors ir atkarīgs no ražīguma  $L_g$  – jo mazākas ražīgums, jo lielāks inerces faktors. Pieņemot to, ka aerācijas kompresoru ražīgums var tikt samazināts līdz 40% no nominālās (zemāku ražīgumu ierobežo standarta frekvenču pārveidotāju zemākā frekvence 20 Hz), inerces faktors  $T_{r_{O_2}}$  šādā režīmā būtiski palielinās, sasniedzot  $\sim 0.77 \text{ min}$  ( $0.0128 \text{ h}$ ).

Aerācijas inženiersistēmas atmosfēras spiediena iedarbes kanāla inerces faktors  $T_{p_a}$ :

$$T_{p_a} \approx \frac{l \cdot S}{L_g}. \quad (3.35)$$

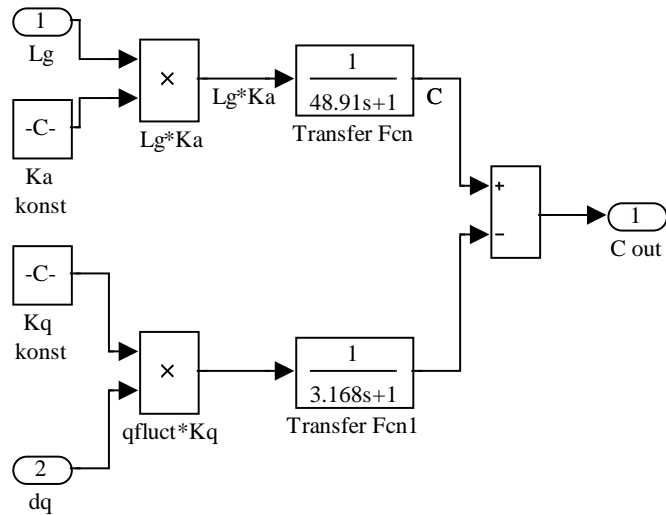
Kā var ievērot,  $T_{r_{O_2}}$  un  $T_{p_a}$  aprēķinu formulas ir vienādas, un atkarīgas no aerācijas kompresora ražīguma  $L_g$  – jo mazāks ražīgums, jo lielāki inerces faktori.

Citu perturbāciju inerces rādītāju analīze liecina, ka tos var neņemt vērā, jo to skaitliskās vērtības ir vai nu par kārtu lielākas, vai par kārtu mazākas, kā piesārņojuma inerces rādītājam un aerācijas tvertnes inerces rādītājam.

### 3.11. Skābekļa pārneses nestacionārā un statiskā modeļa salīdzinošie pētījumi

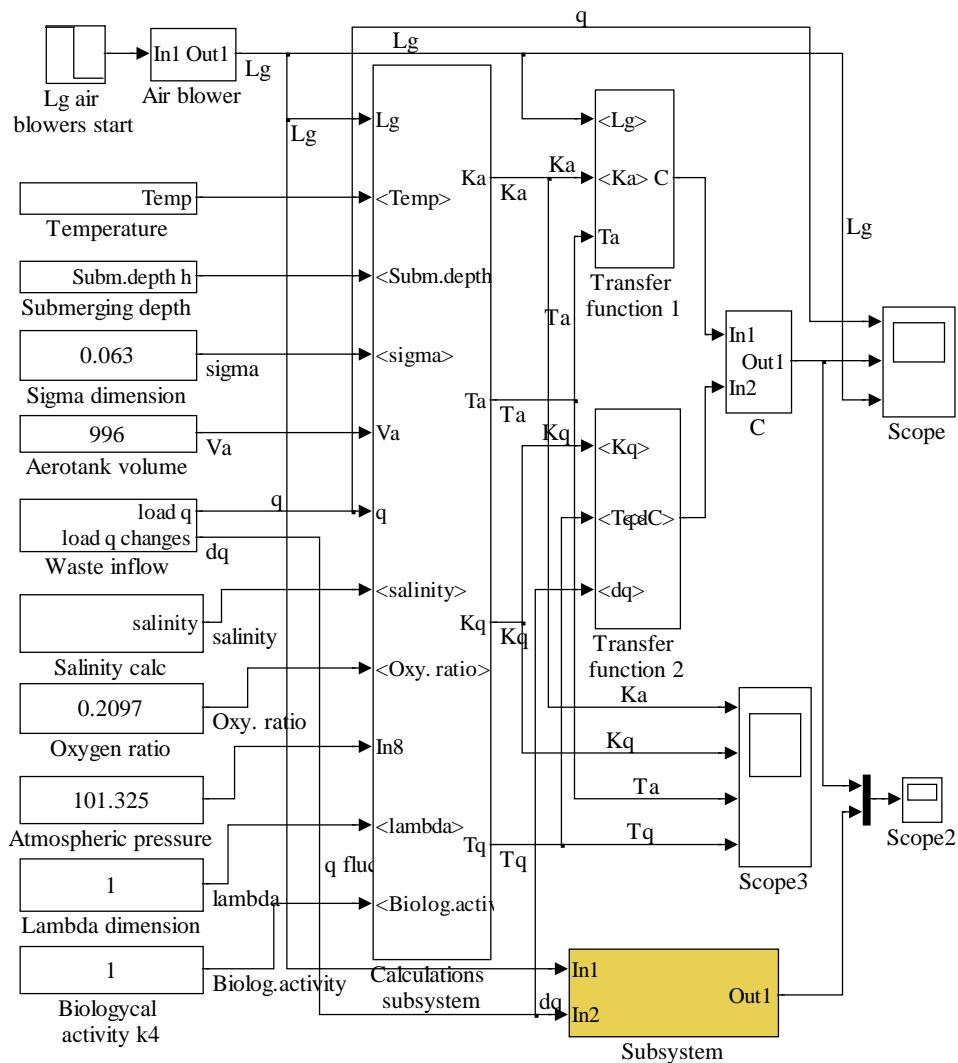
NAIS skābekļa pārneses procesa nestacionārā un statiskā modeļa salīdzinošais pētījums ir nepieciešams, lai noskaidrotu, kā viena vai otra modeļa izvēle automātiskās regulēšanas sistēmā ietekmē regulēšanas kvalitāti un vadības ierīces parametrus.

Salīdzinošā pētījuma veikšanai tika izveidots simulācijas modelis, kurā līdzās nestacionārajam modelim ar mainīgiem inerces un jutības faktoriem tika izveidots modelis ar statiskiem inerces un jutības faktoriem – stacionārais modelis. Tā modelēšanai izveidots subbloks „Subsystem” (3.22.att.).



### 3.22.att. Subbloks ar statistiskiem inerces un jutības faktoriem „Subsystem”

Simulācijas modeļa blokshēma ir parādīta 3.23.attēlā (bloks modelim ar statistiskiem inerces un jutības faktoriem „Subsystem” ietonēts).



3.23.att. Simulācijas modelis nestacionārā un statiskā modeļa salīdzinošajam pētījumam

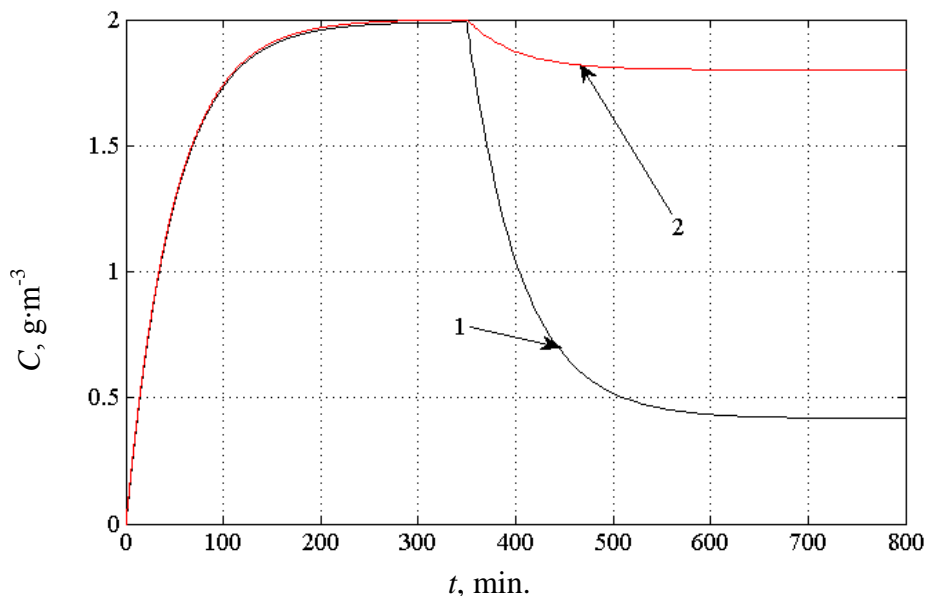
Modelī ar statistiskiem jutības un inerces faktoriem tika ievietotas inerces un jutības faktoru  $K_a$ ,  $K_q$ ,  $T_a$  un  $T_q$  skaitliskās vērtības, kuras izveidojas nestacionārajā modelī, kad tas ir nostabilizējies ( $C=\text{const}$ ).

Blokā „Transfer Fcn” iestatīta  $T_a$  stacionārā vērtība  $T_a=48,91$  min, bet blokā „Transfer Fcn 1” –  $T_q$  stacionārā vērtība  $T_q=3,17$  min. Jutības faktoru  $K_a$  un  $K_q$  skaitliskās vērtības stacionārā režīmā tiek iestatītas attiecīgajos konstanšu blokos „Ka const” un „Kq const”.

Konkrētajā modelī tika izmantoti Preiļu NAI tehniskie un tehnoloģiskie parametri un sekojoši darbības režīmi:

- iestatītais izšķīdušā skābekļa daudzums  $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- modelim ar statistiskiem koeficientiem tiek iestatītas sekojošas to skaitliskās vērtības:
  - $K_a=0.2153(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ ;
  - $T_a=49.91$  min;
  - $K_q=0.0491 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ ;
  - $T_q=3.183$  min.
- aerācijas kompresoru ražīgums laika posmā no 0 līdz 350 minūtēm (stabilizācija)  $L_g=1120 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  (asinchronā elektrodzinēja barošanas sprieguma frekvence 50 Hz);
- pārslēgšanās režīms 350.minūtē;
- aerācijas kompresoru ražība laika posmā virs 350 minūtēm (pēc stabilizācijas)  $L_g=1008 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  (90% no maksimālās ražības, ko nodrošina vadāms frekvenču pārveidotājs asinchronā elektrodzinēja piedziņā ar frekvenču diapazonu 20..50 Hz).

Modelēšanas rezultāti parādīti 3.24.attēlā.



**3.24.att. Salīdzinošā pētījuma rezultāti, aerācijas kompresora ražīguma samazinājums  $\Delta L_g = -10\%$  modelēšanas 350.min.**

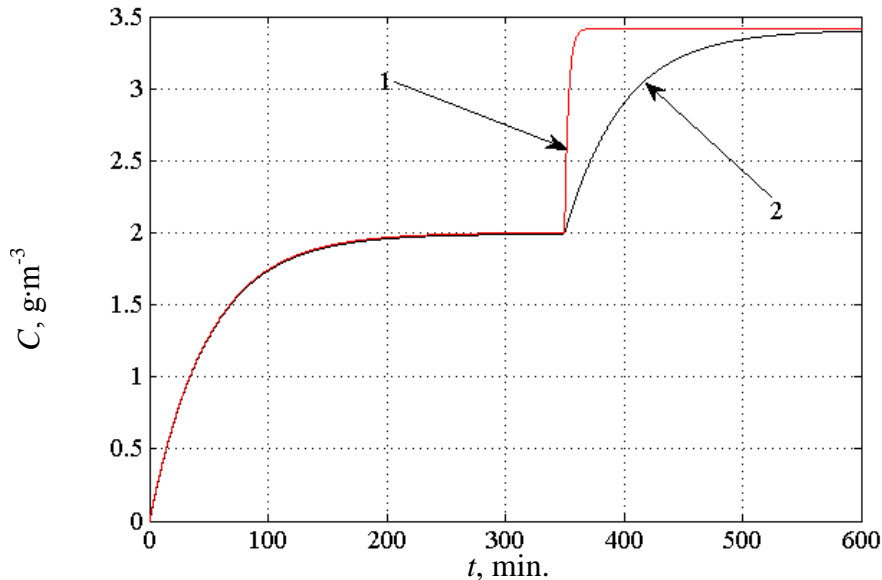
1–nestacionārs modelis; 2– modelis ar statistiskiem jutības un inerces rādītājiem

Modelēšanas rezultāti rāda, ka statistiskajā modelī skābekļa koncentrācija ir samazinājusies proporcionāli aerācijas kompresora ražīgumam. Šī parametra stabilizējusies vērtība ir  $C=1.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  (10% samazinājums pret sākuma vērtību).



Turpretī nestacionārajā modelī skābekļa koncentrācijas stabilizācija notiek pie ievērojami zemāka līmeņa –  $C=0.42 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  (79% samazinājums pret sākuma vērtību). Var secināt, ka nestacionārais modelis uzvedas būtiski atšķirīgāk nekā modelis ar stacionāriem jutības un inerces rādītājiem, un tas daudz precīzāk apraksta aerācijas tvertnē notiekošo skābekļa pārnese procesu.

Saglabājot gan inerces, gan jutības faktoru esošās vērtības statistiskajā modelī, kā arī laikā  $t=350 \text{ min.}$  samazinot piesārņojuma līmeni par 10%, tika iegūts jauns simulācijas rezultāts (3.25.attēls).



**3.25.att. Salīdzinošā pētījuma rezultāti, piesārņojuma perturbācijas  $q$  samazinājums –10% modelēšanas 350.min.**

1 – modelis ar statistiskiem jutības un inerces rādītājiem; 2–nestacionārs modelis

Kā redzams no 3.25.attēla, statistiskajam modelim būtu ļoti stauji jāreaģē uz piesārņojuma samazinājumu, tajā pašā laikā nestacionārais modelis rāda, ka reāli aerācijas tvertnē jaunais skābekļa līmeņa pieaugums tiks sasniegts ar ievērojamu laika kavējumu.

Modelēšanas rezultāti apstiprina pieņēmumu, ka statistiskais skābekļa pārnese process būtiski atšķiras no reālajiem aerācijas tvertnē notiekošajiem dinamiskajiem procesiem, un ir nepieciešama dinamiski mainīgu jutības un inerces faktoru ieviešana vadības procesa nodrošināšanas matemātiskajā procesā, kas savukārt pieprasa arī būtiskas izmaiņas aerācijas kompresoru vadības procesā.

### 3.nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Analītiskie pētījumi apstiprina plaša faktoru spektra ietekmi uz skābekļa šķīdību ūdenī un notekūdeņos, tomēr netiek piedāvāta apvienojoša analītiska izteiksme, kas ievērtē šo faktoru iedarbi.
2. Autora izveidotā inovatīvā analītiskā izteiksme ievērtē komplekso ūdens temperatūras, izšķīdušo sāļu jonu sastāva un koncentrācijas, atmosfēras gaisa sastāva un spiediena, kā arī aerācijas tvertnes konstruktīvo parametru ietekmi uz skābekļa pārnese aerācijas tvertnē, un to var izmantot tālākai skābekļa pārnese procesa modelēšanai aerācijas tvertnē.

3. Iegūtās analītiskās izteiksmes pārbaudei izveidots virtuāls skābekļa pārnese modelis, kura pārbaude apliecina skābekļa pārnese procesa nelineāro, nestacionāro un dinamiski mainīgo dabu.
4. Modelēšanas rezultāti rāda, ka iegremdējot aerācijas difuzorus aerācijas tvertnē par vienu metru dziļāk, skābekļa šķīdība pieaug par 6.98%. Savukārt notekūdeņu temperatūrai palielinoties no  $\Theta=+10^{\circ}\text{C}$  uz  $\Theta=+15^{\circ}\text{C}$ , skābekļa šķīdība samazinās par 11.84%.
5. Atmosfēras spiedienam samazinoties par 0.5 kPa, skābekļa šķīdība samazinās par 0.58%, savukārt samazinoties skābekļa koncentrācijai gaisā par 1%, skābekļa koncentrācija ūdenī samazinās par 4.31%.
6. Izšķīdušo sāļu koncentrācijas un sastāva ietekme parādās tieši maksimuma noslodzes brīžos, kad ir maksimāls piesārņojums. Modelis parāda, ka piesārņojuma maksimuma stundās par 3.42% samazinās maksimālā iespējamā skābekļa koncentrācija notekūdeņos.
7. Pētījuma rezultāti ļauj izveidot jaunas definīcijas aerācijas tvertnes un slodzes laika konstantēm un pārvades koeficientiem, to nelineārās dabas dēļ ierosinot tos saukt par jutības un inerces rādītājiem.
8. Modelēšanas rezultāti parāda, ka starp skābekļa koncentrāciju aerācijas tvertnē  $C$ , piesārņojumu  $q$ , un gaisa padeves intensitāti uz aerācijas tvertni  $L_g$  ir nelineāras sakarības. Izmantojot Preiļu NAI datus, tika iegūti sekojoši rādītāji – pie  $q=150 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  un  $L_g=560 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  skābekļa koncentrācija  $C=8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , pie  $L_g=700 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  skābekļa koncentrācija ir  $C=10.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , bet pie  $L_g=1120 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  skābekļa koncentrācija  $C=12 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .
9. Aerācijas tvertnes jutības rādītājs  $K_a$  ir mainīgs, un tam ir nelineāra sakarība ar skābekļa koncentrāciju aerācijas tvertnē  $C$ , piesārņojumu  $q$ , un gaisa padeves intensitāti uz aerācijas tvertni  $L_g$ . Izmantojot Preiļu NAI datus, tika iegūti sekojoši rādītāji – pie  $q=100 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  un  $L_g=600 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes jutības rādītājs  $K_a=1.15 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , pie  $q=150 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  un  $L_g=600 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes jutības rādītājs  $K_a=0.93 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , bet pie  $q=200 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  un  $L_g=600 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes jutības rādītājs  $K_a=0.70 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ .
10. Aerācijas tvertnes inerces rādītājs  $T_a$  ir nelineāri atkarīgs no gaisa padeves intensitātes uz aerācijas tvertni  $L_g$ , un starp tiem ir apgriezti proporcionāla sakarība. Izmantojot Preiļu NAI datus, tika iegūti sekojoši rezultāti – pie  $L_g=500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes inerces rādītājs  $T_a=55 \text{ min}$ , pie  $L_g=900 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes inerces rādītājs  $T_a=30 \text{ min}$ , pie  $L_g=1200 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes inerces rādītājs  $T_a=23 \text{ min}$ .
11. Aerācijas tvertnes slodzes jutības rādītājs  $K_q$  ir nelineāri atkarīgs no gaisa padeves intensitāti uz aerācijas tvertni  $L_g$  un starp tiem ir apgriezti proporcionāla sakarība. Izmantojot Preiļu NAI datus, tika iegūti sekojošas skaitliskās vērtības – pie  $L_g=500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes jutības rādītājs  $K_q=0.055 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , pie  $L_g=800 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes jutības rādītājs ir  $K_q=0.035 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , bet pie  $L_g=1200 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  tvertnes jutības rādītājs ir  $K_q=0.023 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ .
12. Aerācijas tvertnes slodzes inerces rādītājs  $T_q$  ir nelineāri atkarīgs no piesārņojuma  $q$  un starp tiem ir apgriezti proporcionāla sakarība. Izmantojot Preiļu NAI datus, tika iegūti sekojoši rezultāti – pie  $q=100 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  slodzes inerces rādītājs  $T_q=73 \text{ min}$ , pie  $q=200 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  slodzes inerces rādītājs  $T_q=37 \text{ min}$ , bet pie  $q=250 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  slodzes inerces rādītājs  $T_q=27 \text{ min}$ .
13. Temperatūras dinamikas ietekmes novērtēšanai tika aprēķināts aerācijas tvertnes temperatūras inerces rādītājs. Aprēķins rāda, ka Preiļu NAI tas tuvojas 1000 min ( $T_{\Theta}=991 \text{ min}$ ). Tā kā tās ir būtiski lielāks nekā tvertnes un slodzes inerces rādītāji,

dinamiskā modeļa izveidē tos var neņemt vērā, tomēr ievērtējot temperatūras vispārējo ietekmi uz aerācijas procesu.

14. Aerācijas pievadcaurules var uzskatīt par elementu, kas rada transportkavējumu uz dinamiskiem procesiem aerācijas tvertnē. To inerces rādītājs ir 0.31 min, kas ir būtiski mazāks nekā apskatītie inerces rādītāji, tāpēc arī šī elementa ietekmi var neņemt vērā, veicot aerācijas tvertnes dinamisko modelēšanu.
15. Modelēšanas rezultāti apstiprina pieņēmumu, ka statistiskais skābekļa pārneses process būtiski atšķiras no reālajiem aerācijas tvertnē notiekošajiem dinamiskajiem nestacionārajiem procesiem, un ir nepieciešama dinamiski mainīgu jutības un inerces faktoru lietošana aerācijas modelēšanā un aerācijas vadības procesā.

## Conclusions

1. Analytical research confirmed assumptions about impact of wide range of external and internal factors on oxygen solubility in water and wastewater, but no evidence for analytical formulae made by other observations including all those factors was found.
2. Innovative analytic expression made by thesis author takes in account complex influence of water temperature, content and composition of dissolved chemicals ions, air pressure and oxygen content in it, as well as impact of aerotank construction, on oxygen transfer to wastewater. It can be used for further research and simulation of the processes in the aerotank.
3. Virtual simulation model was developed in order to observe nonlinear nonstationary dynamic properties of oxygen transfer.
4. Simulation results revealed high importance of different factors. If submerging depth of aeration diffusers increases by 1 m, oxygen solubility increases by 6.98%, if wastewater temperature increases from  $\Theta=+10^{\circ}\text{C}$  to  $\Theta=+15^{\circ}\text{C}$ , oxygen solubility decreases by 11.84%, if air pressure decreases by 0.5 kPa, oxygen solubility decreases by 0.58%, and if oxygen concentration in air decreases by 1%, oxygen solubility decreases by 4.31%.
5. Content and composition of dissolved chemicals ions influences oxygen solubility during peak loads with maximum waste concentration, Simulation shows that during peak hours oxygen solubility decreases by 3.42%.
6. Research reveals that there is a need for new definitions for aerotank and perturbation time constants and transfer coefficients. As they are not real constants, but variables which depend on different factors, much more proper is to call them aerotank and perturbation inertia and sensitivity indicators.
7. Simulation results show nonlinear interconnection between oxygen content in aerotank  $C$ , pollution  $q$ , and air supply intensity to aerotank  $L_g$ . Using Preiļi WWTS data, the following trend was revealed: if  $q=150\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  and  $L_g=560\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , oxygen content is  $C=8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , if  $L_g=700\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , oxygen content is  $C=10.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , but if  $L_g=1120\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , oxygen content is  $C=12\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .
8. Aerotank sensitivity indicator  $K_a$  is variable and depends on  $C$ ,  $L_g$  un  $q$  variations. Using Preiļi WWTS data, the following trend was revealed: if  $q=100\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  and  $L_g=600\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , sensitivity indicator  $K_a=1.15\text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , if  $q=150\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  and  $L_g=600\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , sensitivity indicator  $K_a=0.93\text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , but if  $q=200\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  and  $L_g=600\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , sensitivity indicator  $K_a=0.70\text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ .
9. Aerotank inertia indicator  $T_a$  depends on  $L_g$  changes – they are inversely proportional. Using Preiļi WWTS data, the following trend was revealed: if

$L_g=500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , inertia indicator  $T_a=55 \text{ min}$ , if  $L_g=900 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , inertia indicator  $T_a=30 \text{ min}$ , if  $L_g=1200 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , inertia indicator  $T_a=23 \text{ min}$ .

10. Perturbance sensitivity indicator  $K_q$  depends on  $L_g$  changes – they are inversely proportional. Using Preiļi WWTS data, the following trend was revealed: if  $L_g=500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , sensitivity indicator  $K_q=0.055(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , if  $L_g=800 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , sensitivity indicator  $K_q=0.035(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , but if  $L_g=1200 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , sensitivity indicator  $K_q=0.023(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ .
11. Perturbance inertia indicator  $T_q$  depends on  $q$  changes – they are inversely proportional. Using Preiļi WWTS data, the following trend was revealed: if  $q=100 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , inertia indicator  $T_q=73 \text{ min}$ , if  $q=200 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , inertia indicator  $T_q=37 \text{ min}$ , but if  $q=250 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , inertia indicator is  $T_q=27 \text{ min}$ .
12. In order to evaluate impact of temperature dynamic changes, aerotank temperature inertia indicator was calculated. Results using Preiļi WWTS data revealed very high values of temperature inertia indicator ( $T_\Theta=991 \text{ min}$ ). As this value is substantially higher than aerotank and perturbance inertia indicators, it can be skipped from further simulation, although direct impact of temperature will be taken in account.
13. Aerotank aerating tubes have to be taken in account as transport delay units, which can have impact on dynamic processes in the aerotank. Inertia indicators calculated showed 0.31 minute delay time. As this value is substantially less than aerotank and perturbance inertia indicators, it can be skipped from further simulations.
14. Simulation results testify assumption that static oxygen transfer process differs substantially from real processes in the aerotank which are dynamic and nonstationary, and it is crucially necessary to introduce dynamic inertia and sensitivity indicators in the aeration process simulation and aeration control.

## 4. NOTEKŪDEŅU APSKĀBEKĻOŠANAS EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Lai novērtētu NAI darbību ražošanas apstākļos, tika veikti eksperimentāli pētījumi. Par eksperimenta objektu izvēlētas Preiļu pilsētas NAI, kurai 2009.gadā veica plānoto rekonstrukciju, tādēļ bija iespējams salīdzināt aerācijas efektivitātes rādītājus pirms un pēc rekonstrukcijas.

### 4.1. Eksperimenta objekta raksturojums

Preiļu pilsētas notekūdeņu attīrīšanas iekārtas ir nodotas ekspluatācijā 1998. gadā un būtiskas izmaiņas to darbībā nav bijušas līdz 2009.gadam, kad tika veikta NAI tehniskā rekonstrukcija, un iegādātas jaunas aerācijas kompresoru iekārtas ar vadības ierīcēm. Notekūdeņu attīrīšanas iekārtu projektētā jauda ir 1300 m<sup>3</sup> sadzīves notekūdeņu dienā.

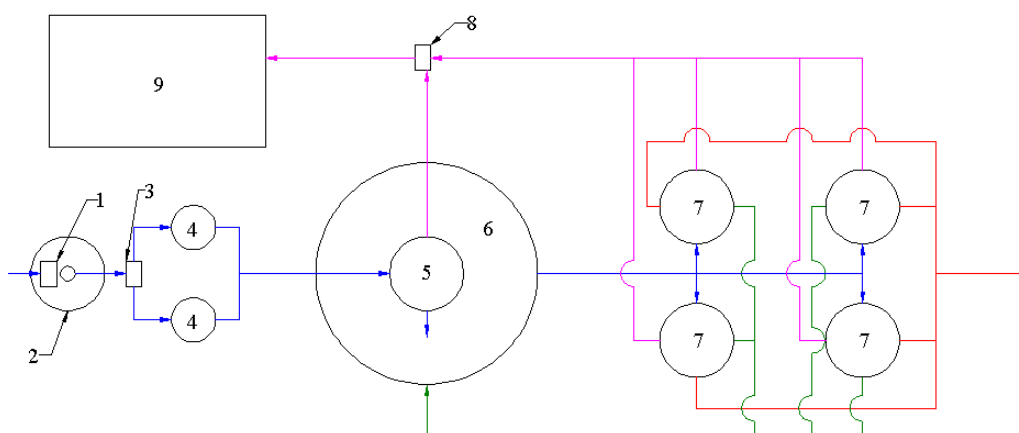
Kā redzams no 4.1.tabulas, Preiļu notekūdeņu rādītāji pilnībā atbilst sadzīves notekūdeņu raksturojumam.

4.1.tabula

#### Preiļu notekūdeņu salīdzinājums ar sadzīves notekūdeņu vidējiem rādītājiem Latvijā, 2009.gads

<i>Nosakāmais rādītājs</i>	Preiļu notekūdeņu vidējie rādītāji	Pieļaujamie sadzīves notekūdeņu rādītāji (LR MK noteikumi, 2007)
Suspendētās vielas	136 g·m <sup>-3</sup>	120 – 450 g·m <sup>-3</sup>
BSP <sub>5</sub>	185 g·m <sup>-3</sup>	150 – 350 g·m <sup>-3</sup>
ĶSP	414 g·m <sup>-3</sup>	210 – 740 g·m <sup>-3</sup>
Slāpeklis N <sub>kop.</sub>	52.4 g·m <sup>-3</sup>	20 – 80 g·m <sup>-3</sup>
Fosfors P <sub>kop.</sub>	6.99 g·m <sup>-3</sup>	6 – 23 g·m <sup>-3</sup>

Preiļu notekūdeņu attīrīšanas iekārtu vispārīgā shēma parādīta 4.1.attēlā.



**4.1. att. Preiļu notekūdeņu attīrīšanas iekārtu vispārīgā shēma**

1 – smalkās restes; 2 – kanalizācijas sūkņu stacija; 3 – notekūdeņu pieņemšanas kamera; 4 – smilšu ķērāji; 5 – primārais nostādinātājs; 6 – aerācijas tvertne ar aerobo un anaerobo zonām; 7 – sekundārie nostādinātāji; 8 – dūņu kamera; 9 – dūņu lauki.

Attīrīšanas process sākas ar kanalizācijas sūkņu stacijām ar sūkņu kaskādi un primāro attīrīšanu ar smalkajām restēm. Restēs aizturētos netīrumus presē.

Attīrīšana no sīkā neorganiskā piesārņojuma notiek sapārotos vertikālajos smilšķerājos ar riņķveida ūdens kustību. Tālāk notekūdeņi tiek padoti uz primāro nostādinātāju.

Primārais nostādinātājs ir vertikālā izpildījumā. Konstruktīvi tas ir apvienots ar aerācijas tvertni. No primārā nostādinātāja notekūdeņi nonāk aerācijas tvertnē, bet nostādinātās dūņas tiek padotas uz sūkņu staciju, no kurienes tās pārsūknē uz dūņu laukiem.

Notekūdeņu aerācijas iekārtas ārskats parādīts 4.pielikumā 1.attēlā. Aerācijas tvertne ir cilindriskā, ar apakšējo aerāciju caur aerācijas difuzoriem. Anaerobā zona ir izveidota atsevišķā aerācijas tvertnes sektorā, kur tiek pievadīti notekūdeņi no primārā nostādinātāja un sekundārā nostādinātāja.

Recirkulācija darbojas atkarībā no notekūdeņu pieplūduma sasniedzot noteiktu līmeni sekundārajos nostādinātājos. Aerācijas nodrošināšanai ir izbūvēti divi aerācijas kompresori (4.pielikuma 2.att.).

Sistēmā darbojas četri sekundārie nostādinātāji. Attīrītie notekūdeņi tiek novadīti Preiļupītē. Dūņas no sekundārajiem nostādinātājiem tiek aiztransportētas uz dūņu laukiem.

Aerācijas tvertnes aerobās daļas tilpums ir 996 m<sup>3</sup>, anaerobās daļas tilpums – 128 m<sup>3</sup>, primārā nosēdinātāja tilpums – 143 m<sup>3</sup>. Aerācijas tvertnes dziļums 4 m.

Notekūdeņu sastāva analīzes tiek veiktas saskaņā ar ministru kabineta noteikumiem laboratorijā. Notekūdeņu paraugus piegādā uzņēmums, kas apsaimnieko attīrīšanas iekārtas. Analīzes veic Latvijas Valsts Vides Laboratorijas Daugavpils nodaļa.

Notekūdeņu savākšanas un attīrīšanas sistēmā iekļūst arī lietūs ūdeņi, jo to savākšanai nav izveidots savs kanalizācijas kontūrs. Tas apgrūtina notekūdeņu attīrīšanas iekārtu darbību lietūs laikā pavasara – rudens periodā.

Pēc rekonstrukcijas 2009.gadā Preiļu NAI tika uzstādīti divi vienādi firmas Aerzen Inc. aerācijas kompresori (4.pielikums 3., 4. un 5.att.), kuru piedziņai izmanto asinhronos elektrodzinējus ar frekvenču pārveidotājiem (firmas Danfos vadības bloks ar frekvenču pārveidotāju VLT © Aqua drive, parādīts 4.pielikuma 7.att.).

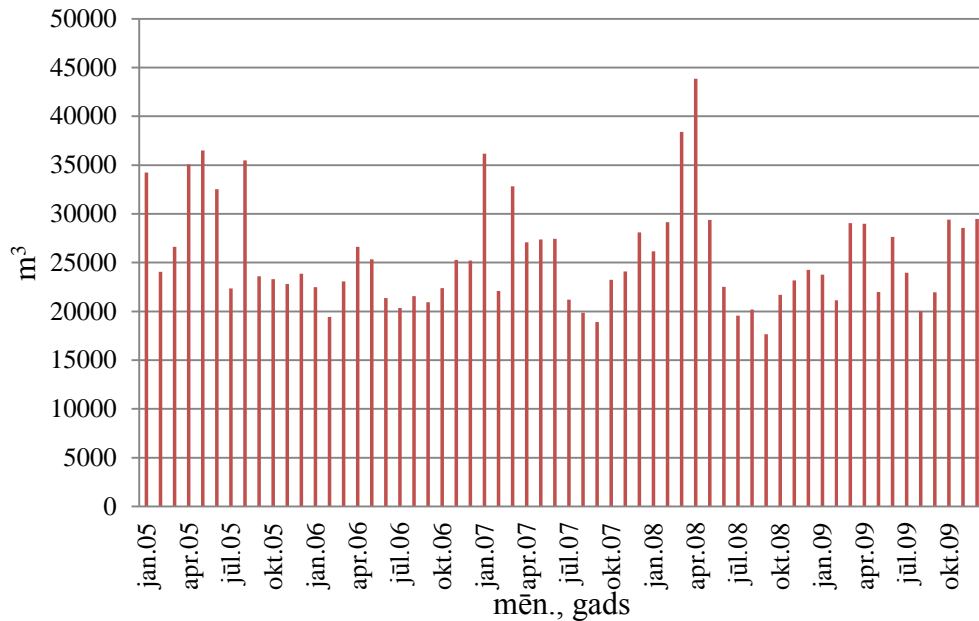
Rezervēšanas nodrošināšanai saglabāti arī iepriekš lietotie Rūtsa tipa aerācijas kompresori ar asinhrono elektrodzinēju piedziņu (4.2.tabula).

Kaut arī ir notikusi rekonstrukcija, finanšu resursu ierobežotības dēļ Preiļu NAI netika uzstādīta izšķīdušā skābekļa mērīšanas un aerācijas kompresoru vadības sistēma. Tādēļ modernās NAIS iekārtas šobrīd darbojas manuālā režīmā, un katru dienu operators manuāli pārslēdz aerācijas kompresorus.

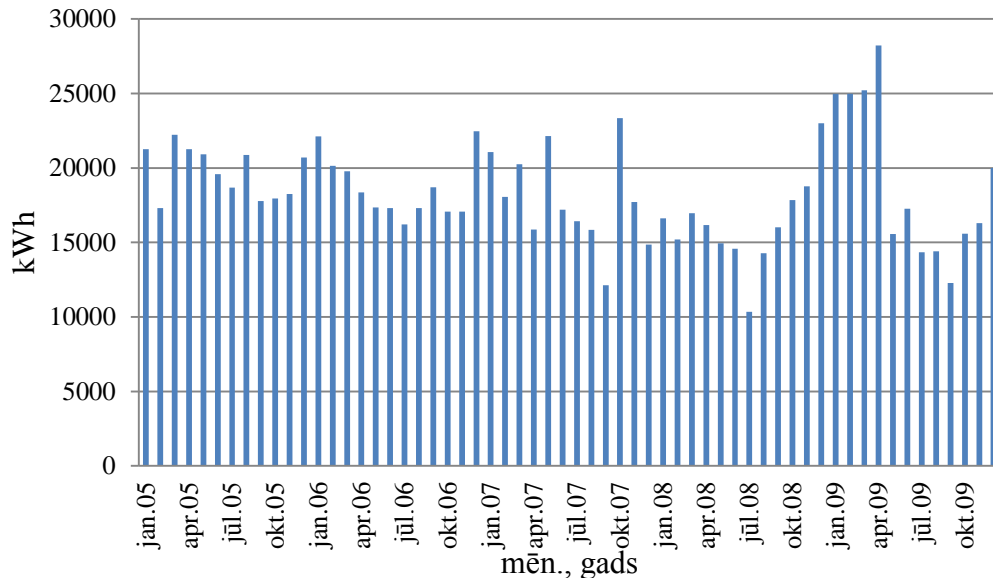
Frekvenču pārveidotāji ieregulēti darbam 30 Hz frekvencē, un tiek izmantota invertorā iebūvētā „mīkstā” palaišanas sistēma. Frekvences ieregulējums balstīs uz darbības uzsākšanas brīdī veiktajiem vienreizējiem laboratorijas mērījumiem, kuros konstatēts, ka šāda frekvence nodrošina vismaz 3 g·m<sup>-3</sup> izšķīdušā skābekļa līmeni attīrītajos notekūdeņos – atbildīgais laborants to uzskata par atbilstošu līmeni (iestatīts paaugstināts līmenis, lai nodrošinātu arī maksimuma piesārņojuma brīžiem nepieciešamo apskābekļošanu).

Tajā pašā laikā apsaimniekojošā uzņēmuma SIA „Preiļu saimnieks” vadība uzsver, ka līdz ar rekonstrukciju ir pieauguši izdevumi elektroenerģijai. Šī apgalvojuma iemesli tiks analizēti darba ekonomiskajā sadaļā.

Attīrīšanas iekārtu kopējais enerģijas patēriņš un apstrādāto notekūdeņu apjoms laika posmā no 2005.gada līdz 2009.gadam ir redzams 4.2. un 4.3.attēlā.



4.2.att. Kopējais apstrādāto notekūdeņu apjoms Preiļu NAI , 2005. – 2009.g.



4.3.att. Elektroenerģijas patēriņš Preiļu NAI , 2005. – 2009.g.

#### 4.2. Eksperimentālo pētījumu apjoms un metodika

Skābekļa koncentrācijas dinamikas noskaidrošanai tika veikts longitūdiāls pētījums Preiļu NAI. Pēc pirmās mērījumu sērijas ar laika novirzi 1 gads tika veikta atkārtota mērīšana citos erācijas kompresoru darbības apstākļos. Tā bija nepieciešama, lai novērtētu veikto mērījumu validitāti un pārlicinātos, vai ir izmainījies notekūdeņu sastāvs, kā arī, lai noskaidrotu aerācijas tvertnes dinamisko rādītāju izmaiņas un automātiskās vadības principa ietekmi uz NAIS darbu.

Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas mērījumi tika veikti Preiļu NAI aerācijas tvertnes aerobajā zonā. Lai mērījumu precizitāte būtu pietiekoša un rezultāti ticami, bija nepieciešams izmantot sertificētu aparatūru un ievērot noteikto mērīšanas metodiku.

Mērījumu veikšanai tika izmantots firmas „Lutron” digitālais skābekļa mērītājs DO-5510. Skābekļa mērītājs ir sertificēts pēc starptautiskā standarta ISO 90001:2000.

Skābekļa mērītāja sagatavošana darbam iekļauj zondes vizuālo pārbaudi, diafragmas vizuālo pārbaudi, elektrolīta esamības pārbaudi rezervuārā. Nepieciešamības gadījumā jānomaina teflona diafragma un jāuzpilda elektrolīts.

Kalibrēšanas galvenais uzdevums ir nodrošināt pareizus skābekļa mērītāja rādījumus visā diapazonā gan gaisā, gan šķidrumā. Kalibrēšana tiek veikta gaisa vidē, turklāt vēlams to veikt nenoslēgtā, labi ventilējamā telpā. Kalibrēšana iekļauj nulles iestādīšanu un nostabilizējušos gaisa skābekļa koncentrācijas rādījumu pielīdzināšanu standartizētajam skābekļa saturam gaisā (20.9%).

Precīzas mērīšanas nosacījumi galvenokārt attiecas uz šķidruma plūsmas nodrošināšanu gar zondes darbīgo daļu, respektīvi, lai zonde pareizi noteiktu skābekļa koncentrāciju, tai jāatrodas kustīgā vidē. Turklāt, mērot izšķīdušā skābekļa koncentrāciju, pirms mērīšanas uzsākšanas nepieciešams izturēt zondi mērāmajā vidē vismaz 10 min, lai zondes temperatūras sensora inerce tiktu slāpēta un uzrādāmā temperatūra būtu pareiza.

Lai noskaidrotu mērierīces dinamiskos parametrus atkarībā no galvenās perturbances – izšķīdušā skābekļa koncentrācijas notekūdeņos, tika veikti tās eksperimentālie pētījumi.

Mērījumu veikšanai tika sagatavoti divi ūdens paraugi ar būtiski atšķirīgiem izšķīdušā skābekļa līmeņiem – uzvārīts un līdz istabas temperatūrai (+20°C) atdzēsēts ūdens (pazemināts izšķīdušā skābekļa līmenis), un ūdens no ūdensvada, kurš atstāts slēgtā traukā, lai tas sasniegtu istabas temperatūru +20°C. Tika veikti kopsummā 9 mērījumi.

Mērierīces zonde tika pamīšus ievietota gan vienā, gan otrā paraugā, un tika veikti datorizēti mērījumu ieraksti, izmantojot “Lutron” programnodrošinājumu šīs ierīces reģistrēto datu uzkrāšanai datorā.

Lai varētu veikt tālāku eksperimentālo datu apstrādi, tie tika sagrupēti grupās – vienā grupā (1.grupa) tie, kas atbilst pārejai no pazemināta skābekļa daudzuma uz paaugstinātu skābekļa daudzumu, un otrā (2.grupa) tie, kas atbilst pārejai no paaugstināta skābekļa daudzuma uz pazeminātu skābekļa daudzumu.

Veikta mērījumu korelāciju analīze – gan mērījumu savstarpējā korelācija, gan korelācija ar visu trīs mērījumu vidējo rādītāju. Iegūtie rezultāti 1.grupas mērījumiem apkopoti 4.2. tabulā.

4.2.tabula

#### **Eksperimentālo datu korelāciju analīze – mērījumu R<sup>2</sup> vērtības 1.grupai**

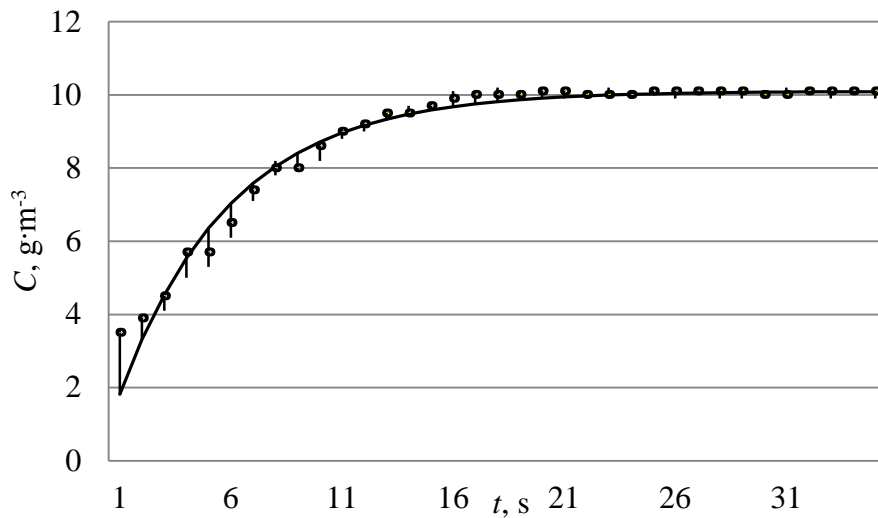
<i>Mērījuma Nr.</i>	<i>1.mērījums</i>	<i>2.mērījums</i>	<i>3.mērījums</i>
<i>2.mērījums</i>	0.954	1	
<i>3.mērījums</i>	0.957	0.956	1
<i>Vidējais rādītājs</i>	0.978	0.974	0.976

Analīze rāda, ka eksperimentālajiem datiem ir ļoti augsta gan savstarpējo mērījumu korelācija, gan arī augsta korelācija ar vidējo aritmētisko mērījumu, kas liecina par ciešu mērījumu savstarpējo atkarīgumu (visos gadījumos R<sup>2</sup>>0.95). Līdz



ar to var uzskatīt, ka katra mērījuma vidējais rādītājs ar pietiekoši augstu precizitāti apraksta doto mērījuma punktu.

Mērījumu rezultāti pēc to apstrādes un aprakstošā eksponenciālā vienādojuma atrašanas parādīti 4.4.attēlā.



#### 4.4.att. 1.grupas mērījumu vidējie rādītāji un tos aprakstošā eksponente

Grafiski parādīti gan mērījumu vidējie rādītāji, gan arī maksimālās novirzes, kā arī tendencijas līkne.

Aprakstošais vienādojums – eksponente, tika atrasta, izmantojot nelineāro noviržu mazāko kvadrātu summas metodi (Fox, 2002).

1.grupas mērījumu datus aprakstošais vienādojums ir :

$$C_0 = 10.1 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{5.035}\right) \right) \quad (4.1)$$

Determinācijas koeficients  $R^2=0.966$ .

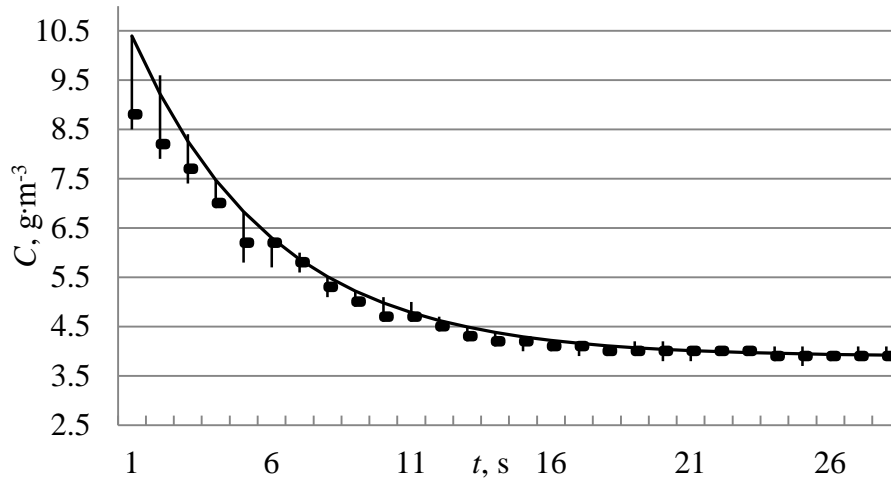
Iegūtie rezultāti 2.grupas mērījumiem apkopoti 4.3. tabulā.

4.3.tabula

#### Eksperimentālo datu korelāciju analīze – mērījumu $R^2$ vērtības 2.grupai

Mērījuma Nr.	1.mērījums	2.mērījums	3.mērījums
2.mērījums	0.975	1	
3.mērījums	0.965	0.984	1
Vidējais rādītājs	0.971	0.969	0.965

Arī šiem eksperimentālajiem datiem ir ļoti augsta gan savstarpējo mērījumu korelācija, gan arī augsta korelācija ar vidējo aritmētisko mērījumu, kas liecina par ciešu mērījumu savstarpējo atkarīgumu (visos gadījumos  $R^2>0.96$ ). Līdz ar to var uzskatīt, ka katra mērījuma vidējais rādītājs ar pietiekoši augstu precizitāti apraksta doto mērījuma punktu.



#### 4.5.att. 2.grupas mērijumu vidējie rādītāji un tos aprakstošā eksponente

2.grupas mērijumu datus aprakstošais vienādojums ir :

$$C_0 = 3.91 + 7.94 \cdot \left( \exp\left(-\frac{t}{5.035}\right) \right) \quad (4.2)$$

Determinācijas koeficients  $R^2=0.998$ .

Abos eksperimentos tika iegūts tas pats mērierīces inerci raksturojošais rādītājs – laika konstante  $T = 5.035$  s.

No pētījuma rezultātiem iegūti secinājumi, ka mērierīces inerces faktors ir vismaz par kārtu mazāks nekā jebkurš no objektu un tā perturbācijas raksturojošiem inerces faktoriem, un var neņemt vērā šīs mērierīces inerces ietekmi uz izšķīdušā skābekļa koncentrācijas mērijumiem.

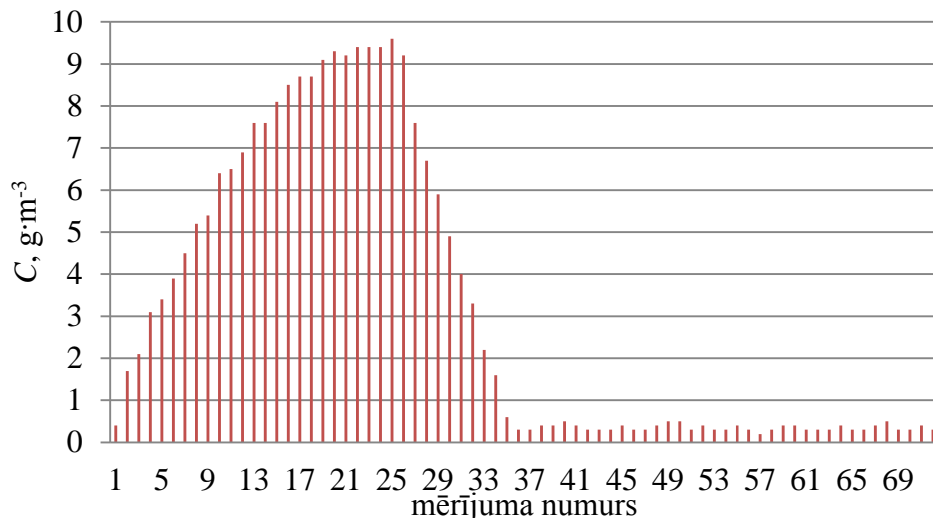
#### 4.3. Eksperimentālo pētījumu datu apstrāde un iegūto rezultātu interpretācija

Pirmais izšķīdušā skābekļa koncentrācijas mērijumu cikls tika veikts 2007.gada aprīlī. Mērijumi tika uzsākti tieši pirms aerācijas cikla sākuma. Tādējādi bija iespējams uzņemt visu izšķīdušā skābekļa koncentrācijas dinamikas līkni aerācijas tvertnē. Aerācijas kompresora ieslēgtais stāvoklis ilga 2 stundas, un pēc tā beigām aerācijas kompresors tika izslēgts uz 4 stundām. Šajā laikā darbojās tikai aerācijas tvertnē esošie mikseri. Mērijumu gaitā tika fiksēta izšķīdušā skābekļa koncentrācija un ūdens temperatūra. Mērijumi tika uzņemti ar 5 min. intervālu. Notekūdeņu temperatūra mērīšanas laikā svārstījās no 10.2°C līdz 10.4°C (aprīļa mēnesis).

Mērijumu rezultāti parādīti 4.6.attēlā.

Var ievērot skābekļa koncentrācijas pieauguma eksponenciālo raksturu ieslēgta aerācijas kompresora darbības periodā. Esošā aerācijas programma neatbilst notekūdeņu pastāvīgas un nepārtrauktas attīrīšanas prasībām, jo aktīvās aerācijas periodā skābekļa koncentrācija sasniedz vērtību 9 un vairāk  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , izsaucot pastiprinātu dūņu aktivitāti un mikroorganismu metabolismu. Turpretī periodā, kad aerācijas kompresors nedarbojas, skābekļa koncentrācija svārstās no 0.3 līdz 0.5  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tas norāda, ka aerācijas process ir nepietiekams, mikroorganismu metabolisms apstājies, dūņas pastiprināti atmirst un notekūdeņu aerobā attīrīšana ir nepietiekama, jo notekūdeņu pieplūde turpinās gan aktīvās aerācijas laikā, gan arī aerācijas kompresora darbības pārtraukumu laikā.



**4.6.att. Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas dinamika  
Preiļu NAI aerācijas tvertnē, 2007.g.**

Tika izstrādāti ieteikumi Preiļu NAI aerācijas sistēmas kompresoru darbības optimizācijai, nemainot tehnisko elementu bāzi, un nepiesaistot papildus investīcijas, bet izmainot operatora darbu, lai novērstu nepieļaujamu darbības režīmu – pārāk ilgs izslēgta stāvokļa režīms, kura laikā nenotiek attīrīšana, un intensīvi atmirst aktīvās dūņas.

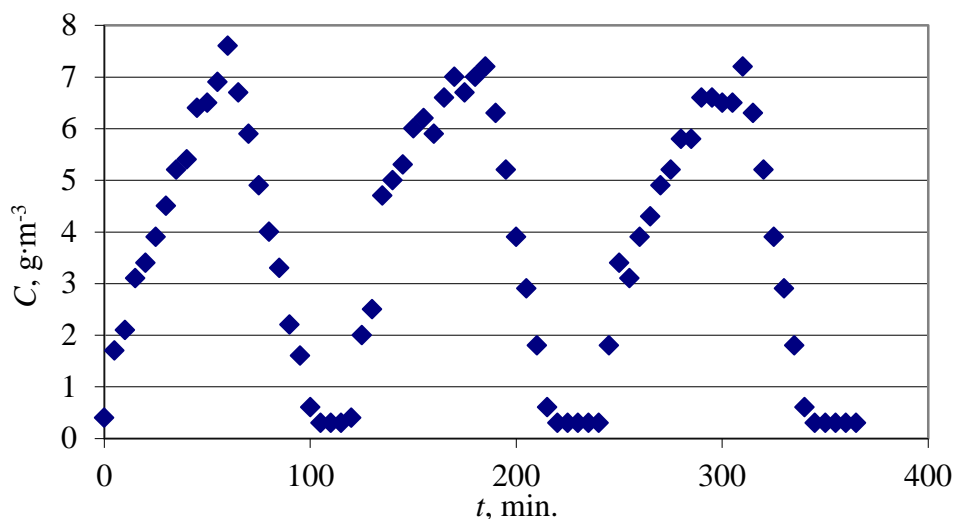
Ieteikumi iekļāva sevī ieteicamos aerācijas kompresoru darba režīmus:

- ieslēgtā un izslēgtā stāvokļa ilgumu attiecība ~1.1:1;
- izslēgtā stāvokļa ilgums – ne ilgāk kā 40 min,
- ieslēgtā stāvokļa ilgums ne mazāk kā 10 min, bet ne vairāk kā 40 min.

Tajā pašā laikā NAI vadība tika informēta arī par problēmām, kas jāņem vērā, ieviešot ieteikumus:

- pieaug operatora atbildība precīzai laika grafika ievērošanai;
- elektroenerģijas patēriņš palielināšanās aerācijas kompresoru piedziņai.

Otrais mērījumu cikls tika veikts tajā pašā NAI, bet ar 1.gada nobīdi. Mērījumu intervāls bija 5 minūtes. Mērījumu rezultāti parādīti 4.7.attēlā.



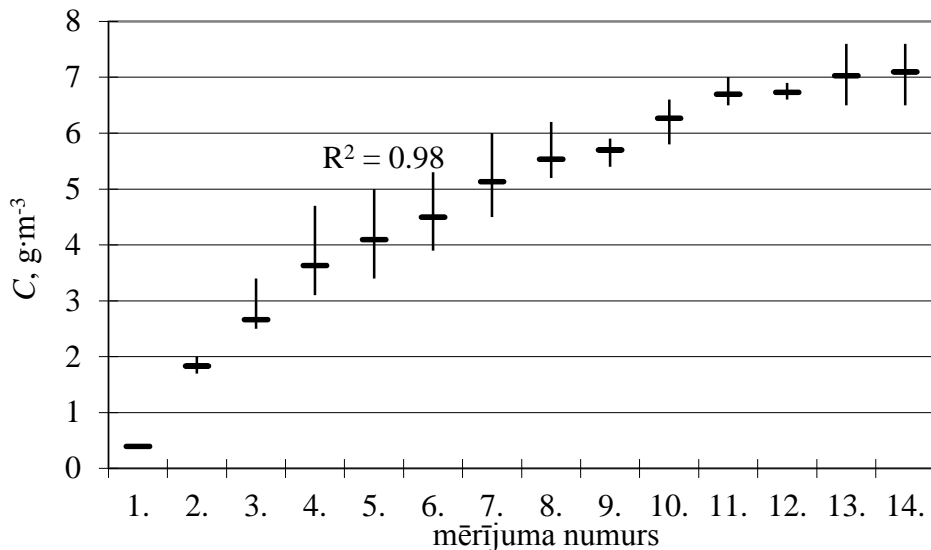
**4.7.att. Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas dinamika  
Preiļu NAI aerācijas tvertnē, 2008.g.**

Laikā posmā no iepriekšējās mērījumu sērijas NAI bija izmainīts aerācijas kompresoru darba režīms, daļēji balstoties uz autora ieteikumiem, t.i., no darba režīma

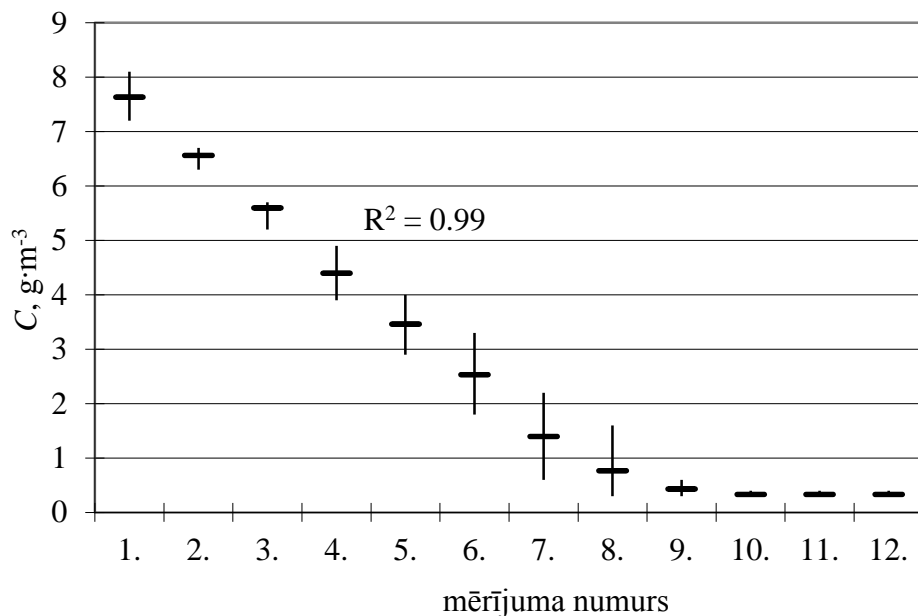
„2 stundas ieslēgts un 4 stundas izslēgts” uz darba režīmu „70 minūtes ieslēgts un 60 minūtes izslēgts”. Galvenā atšķirība – tika slēgti vienlaicīgi abi kompresori.

Lai veikt tālāku eksperimentālo datu apstrādi, tie tika sagrupēti atbilstoši aerācijas kompresoru darbības režīmam – vienā grupā tie, kuri atbilst aerācijas kompresoru ieslēgtam stāvoklim (“Ieslēgts”), un otrā tie, kuri atbilst aerācijas kompresoru izslēgtam stāvoklim (“Izslēgts”).

Veikta datu statistiskā apstrāde, izrēķinot katra mērījuma punkta vidējo aritmētisko rādītāju. Datu apstrādes rezultāti ar novirzes galējām robežām parādīti 4.8. un 4.9.att. (atbilstoši “Ieslēgts” un “Izslēgts” pozīcija).



4.8.att. Izšķīdušā skābekļa eksperimentālie dati (“Ieslēgts” režīmā)



4.9.att. Izšķīdušā skābekļa eksperimentālie dati (“Izslēgts” režīmā)

Kā redzams no 4.8. un 4.9.att., izšķīdušā skābekļa eksperimentālo datu punktiem vērojama eksponenciāla rakstura tendence.

Mērījumu datu korelāciju analīze veikta gan “Ieslēgts, gan “Izslēgts” pozīcijai – mērījumu savstarpējā korelācija un korelācija ar visu trīs mērījumu vidējo rādītāju. Iegūtie rezultāti apkopoti 4.4. un 4.5.tabulās.

**Eksperimentālo datu korelāciju analīze – mērījumu  $R^2$  vērtības “Ieslēgts” režīmam**

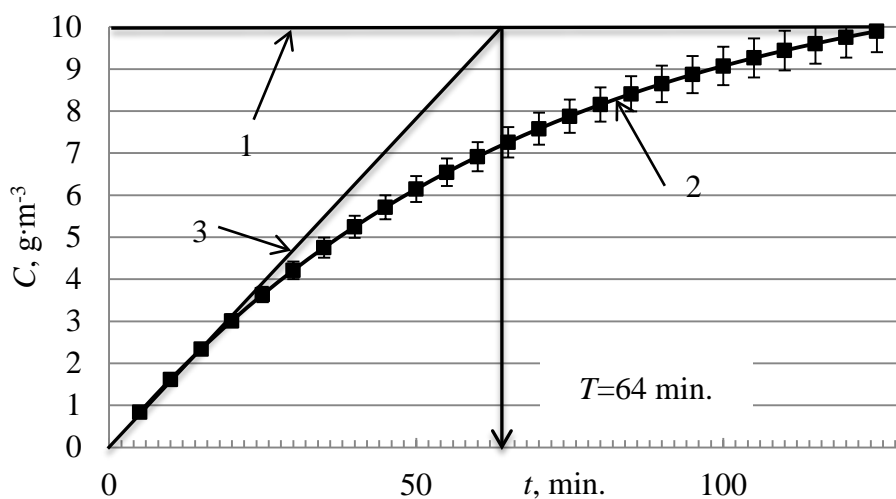
Mērījuma Nr.	1.mērījums	2.mērījums	3.mērījums
2.mērījums	0.944	1	
3.mērījums	0.968	0.955	1
Vidējais rādītājs	0.986	0.981	0.988

**Eksperimentālo datu korelāciju analīze – mērījumu  $R^2$  vērtības “Izslēgts” režīmam**

Mērījuma Nr.	1.mērījums	2.mērījums	3.mērījums
2.mērījums	0.985	1	
3.mērījums	0.975	0.996	1
Vidējais rādītājs	0.991	0.999	0.995

Eksperimentālajiem datiem ir augsta savstarpējo mērījumu korelācija, un augsta korelācija ar vidējo aritmētisko mērījumu (visos gadījumos  $R^2 > 0.98$ ). Līdz ar to var uzskatīt, ka vidējais rādītājs ar pietiekoši augstu precizitāti apraksta doto mērījuma punktu.

Anālītiski meklējot aerācijas tvertnes inerces rādītāja vērtību, tika izmantota nelineārā mazāko kvadrātu metode. Tās rezultāti 1.mērījumu cikla 1.grupas datiem parādīti 4.10.attēlā.



**4.10.att. 1.grupas mērījumu dati un tendenci aprakstošā eksponente, 2007.g. dati**

1 – piesātinājuma līnija; 2 – mērījumu rezultātus aprakstošā eksponente; 3 – pieskare eksponentei

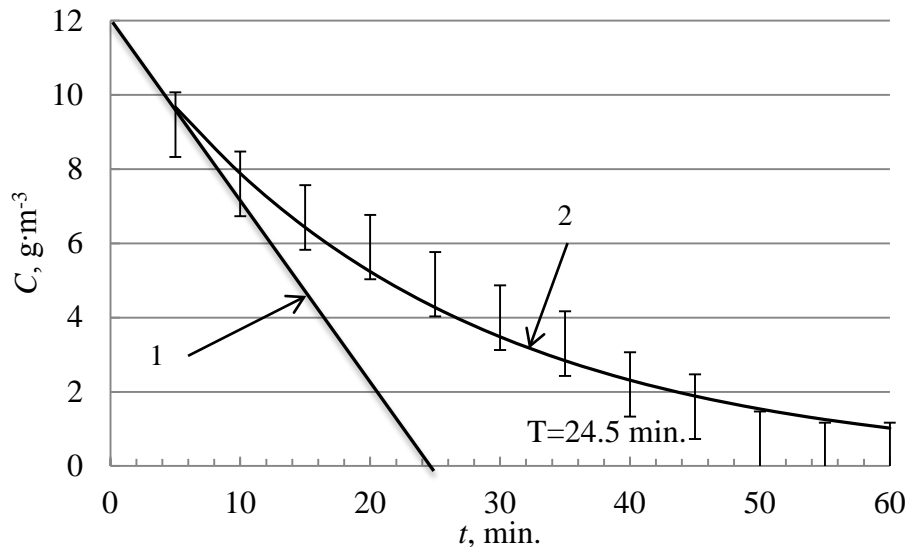
Nelineārās regresijas analīzes rezultātā tika atrasts, ka 1.mērījuma 1.grupas datus aprakstošais vienādojums ir :

$$C_0 = 11.74 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{67.5}\right) \right). \quad (4.3)$$

Determinācijas koeficients analītiskajai izteiksmei ar mērījuma rezultātiem  $R^2=0.993$  ( $p=0.05$ ).

Izmantojot grafoanalītisko metodi, 4.10.attēlā tika iezīmēta pieskare skābekļa šķīdības līnijai, un vietā, kur tā krusto maksimālās amplitūdas līniju, tika atrasta inerces rādītāja skaitliskā vērtība. Aptuvens novērtējums rāda, ka tās ir robežās no 67 līdz 69 minūtēm. Kā redzams no analītiskās izteiksmes, inerces rādītājs  $T=67.5$  min., kas labi sasaucas ar grafoanalītiski atrasto vērtību.

Rezultātu grafiskais atainojums 1.mērījumu cikla 2.grupas datiem redzams 4.11.attēlā.



**4.11.att. 2.grupas mērījumu dati un tendenci aprakstošā eksponente, 2007.g. dati**

1 – pieskare eksponentei; 2 – mērījumu rezultātus aprakstoša eksponente

Nelineārās regresijas analīzes rezultātā tika atrasts, ka 1.mērījuma 2.grupas datus aprakstošais vienādojums ir :

$$C_0 = 11.86 \cdot \exp\left(-\frac{t}{24.5}\right). \quad (4.4)$$

Determinācijas koeficients analītiskajai izteiksmei ar mērījuma rezultātiem  $R^2=0.959$  ( $p=0.05$ ).

Izmantojot grafoanalītisko metodi, 4.11.attēlā tika iezīmēta pieskare skābekļa šķīdības līnijai, un vietā, kur tā krusto nulles līniju, tika atrasta inerces rādītāja skaitliskā vērtība. Aptuvens novērtējums rāda, ka tās ir robežās no 23 līdz 25 minūtēm. Kā redzams no analītiskās izteiksmes,  $T=24.5$  min, kas labi sasaucas ar grafoanalītiski atrasto vērtību.

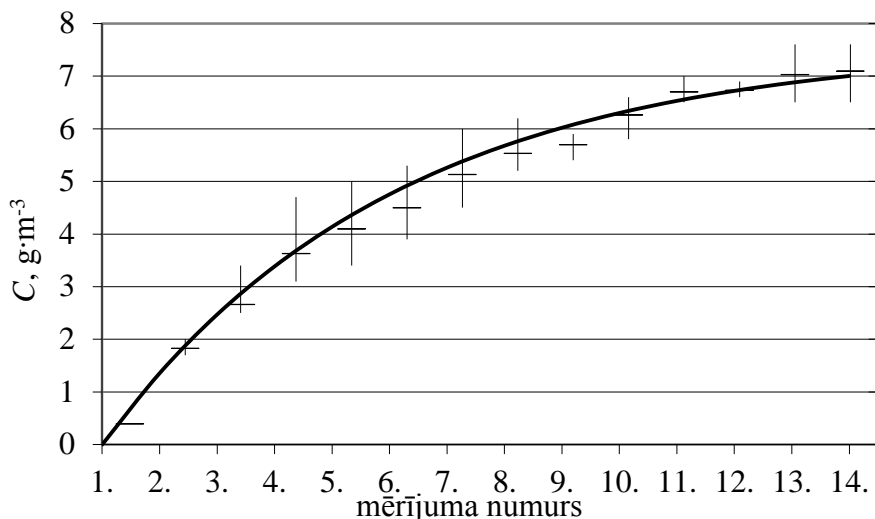
Abu iegūto aprakstošo vienādojumu analīze rāda, ka to laika konstantes būtiski atšķiras – „Ieslēgts” režīmā laika konstante ir 2.76 reizes lielāka, salīdzinot ar laika konstanti „Izslēgts” režīmā (attiecīgi  $T_1=67.5$  min, un  $T_2=24.5$  min). Tas nozīmē, ka aerācijas tvertnes inerces un jutības rādītāji nav konstanti, un apskābekļošanas procesu nevar aprakstīt ar vienkāršu eksponentvienādojumu ar nemainīgiem koeficientiem.

Nelineārās regresijas analīzes rezultātā tika atrasts, ka 2.mērījuma 1.grupas datus aprakstošais vienādojums ir :

$$C_0 = 8.66 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{39.5}\right)\right). \quad (4.5)$$

Determinācijas koeficients analītiskajai izteiksmei ar mērījuma rezultātiem  $R^2=0.996$  ( $p=0.05$ ), uzrādot augstu eksperimentālo un teorētisko modeļu korelācijas pakāpi.

Grafiskā interpretācija iegūtajiem datiem dota 4.12.attēlā. Tajā parādītas arī skaitliskās vērtības eksperimentālajiem datiem un teorētiski atrastajām sakarībām.



**4.12.att. Preiļu NAI eksperimenta dati un regresijas likne (2008.g.dati)**

Nelineārās regresijas analīzes rezultātā tika atrasts, ka 2.mērījuma 2.grupas datus aprakstošais vienādojums ir :

$$C_0 = 10.66 \cdot \left( \exp\left(-\frac{t}{19.64}\right) \right), \quad (4.6)$$

Determinācijas koeficients analītiskajai izteiksmei ar mērījuma rezultātiem  $R^2=0.976$  ( $p=0.05$ ).

Aprakstošo vienādojumu analīze parāda, ka laika konstantes būtiski atšķiras – „Ieslēgts” režīmā laika konstante ir 2.01 reizes lielāka nekā laika konstante „Izslēgts” režīmā (attiecīgi  $T_1=39.47$  min,  $T_2=19.64$  min). Tas apstiprina iepriekš novēroto, ka aerācijas tvertnes inerces un jutības rādītāji nav konstanti.

#### 4.4. Nestacionārā modeļa un eksperimentālo pētījumu datu atbilstības pētījums

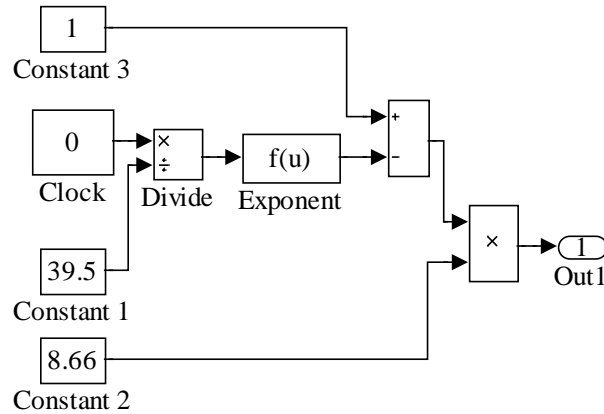
Izmantojot eksperimentālā pētījuma datus, radās iespēja pārbaudīt dinamiskā matemātiskā modeļa validitāti. Lai to veiktu, tika izveidots eksperimentālo datu līkni aprakstošs subbloks (4.13.attēls), ar kura palīdzību eksperimentos iegūtie dati tika ievadīti modelī.

Lai analītiski novērtētu atšķirību starp abiem datu masīviem, tika izmantota vidējās kvadrātiskās vērtības un vidējās kvadrātiskās kļūdas metodes.

Vidējās kvadrātiskās vērtības izteiksme nepārtrauktam procesam ir sekojoša (Горяинов, 2001):

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [f(t)]^2 dt}, \quad (4.7)$$

kur  $f(t)$  – funkcija, kurai tiek noteikta vidējā kvadrātiskā vērtība;  
 $f_{rms}$  – funkcijas vidējā kvadrātiskā vērtība;  
 $t_1$  – vidējās kvadrātiskās vērtības noteikšanas perioda sākuma laiks;  
 $t_2$  – vidējās kvadrātiskās vērtības noteikšanas perioda beigu laiks.



**4.13.att. Subbloks eksperimentālo datu izmantošanai modelī**

Vidējās kvadrātiskās kļūdas aprēķināšanai nepieciešams noteikt abu datu masīvu vidējās kvadrātiskās vērtības, un tās atņemt vienu no otras.

Autora izveidotā pielāgotā izteiksme, kas dod iespēju salīdzināt eksperimentālo datu masīvu ar matemātiskā modeļa ģenerēto datu masīvu, ir sekojoša:

$$\Delta C_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [C_{eksperiments}]^2 dt} - \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [C_{simulācija}]^2 dt}, \quad (4.8)$$

kur  $\Delta C_{rms}$  – skābekļa koncentrācijas eksperimentālo datu un simulācijas rezultātu sakritības vidējā kvadrātiskā kļūda;

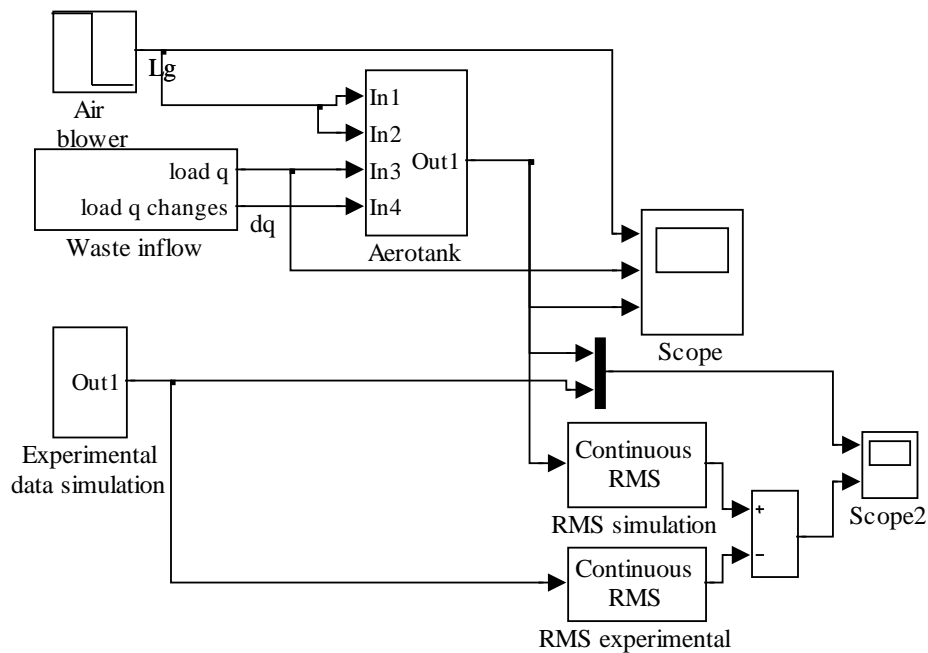
$C_{eksperiments}$  – skābekļa koncentrācijas eksperimentālo datu izmaiņas laikā;

$C_{simulācija}$  – skābekļa koncentrācijas simulācijas datu izmaiņas laikā;

$t_1$  – vidējās kvadrātiskās vērtības noteikšanas perioda sākuma laiks,  $t_1=0$ ;

$t_2$  – vidējās kvadrātiskās vērtības noteikšanas perioda beigu laiks.

Modelēšanas bloks hēma dota 4.14.attēlā.



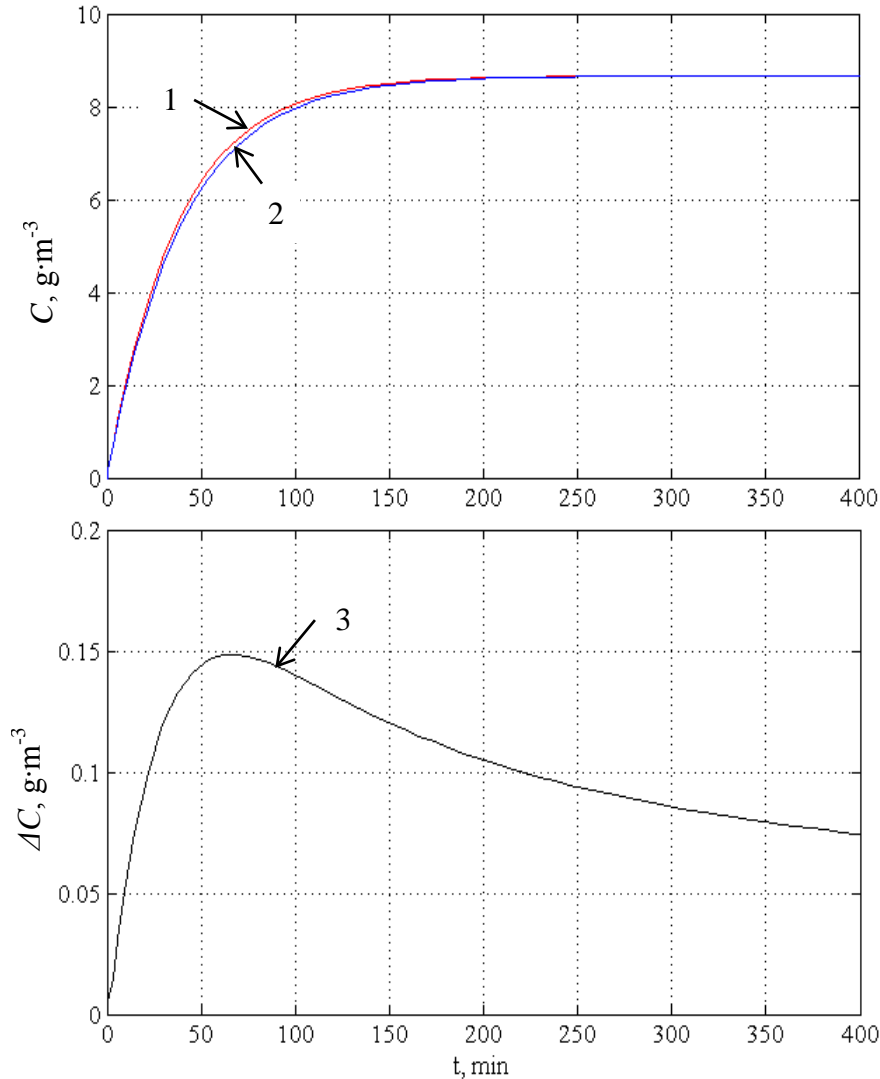
**4.14.att. Simulācijas modeļa un eksperimentālo datu salīdzināšanas bloks hēma**



Tika veikta modelēšana, un aprēķināta dinamiskā matemātiskā modeļa un eksperimentālo datu līknes sakritība, izmantojot vidējās kvadrātiskās kļūdas metodi. Modelēšanas laikā tika atrasts tāds notekūdeņu piesārņojuma līmenis, pie kura sakrīt dinamiskā matemātiskā modeļa un eksperimentālo datu līknes piesātinājuma līmenis –  $8.66 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Modelēšanai tika izmantoti reāli Preiļu NAI dati – gan aerācijas kompresoru ražīgums  $L_g=1120 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  (strādāja abi kompresori), gan aerācijas tvertnes konstruktīvie un tehnoloģiskie parametri ( $\lambda=1\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $\sigma=0.063$ ,  $h=4 \text{ m}$ ), gan ārējās vides apstākļi, kas bija raksturīgi eksperimenta dienai ( $\Theta=+10^\circ\text{C}$ ,  $p_g=101.325 \text{ kPa}$ ,  $r_{o_2}=0.2097$ ).

Modelēšanas rezultāti parādīti 4.15.attēlā.



**4.15.att. Nestacionārā modeļa un eksperimentālo datu validitātes modelēšanas rezultāti**

1 – matemātiskā modeļa ģenerētā līkne; 2 – līkne no eksperimentālajiem datiem; 3 – vidējās kvadrātiskās kļūdas līkne  $\Delta C_{rms}=f(t)$

Piesārņojuma līmenis, pie kura sakrīt abu modeļu piesātinājuma līmeņi, bija  $q=189.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , kas atbilst Preiļu NAI BSP un ŪSP līmenim. Modelēšanas beigās stabilizētās jutības un inerces rādītāju vērtības ir sekojošas: aerācijas tvertnes jutības rādītājs  $K_a=0.4645 \text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , inerces rādītājs  $T_a=37.33 \text{ min}$ , slodzes jutības rādītājs  $K_q=0.0375 \text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , slodzes inerces rādītājs  $T_q=31.83 \text{ min}$ .

Kā redzams no grafika, starp matemātiskā modeļa ģenerēto piesātinājuma līkni 1 un eksperimentā iegūtajiem datiem (līkne 2) ir ļoti neliela atšķirība – tās gandrīz sakrīt.

Vidējā kvadrātiskā kļūda, kas tika iegūta, simulācijas laikā nepārtraukti aprēķinot abu datu masīvu vidējo kvadrātisko vērtību (to ievadot Simulink Continuous RMS (Root-mean-square) blokos) un aprēķinot to momentāno vērtību starpību, nepārsniedz  $\Delta C_{rms}=0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  (2,1% no laikā  $t=60$  min. momentānās amplitūdas  $C=7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), kas liecina par ciešu sakarību starp abiem datu masīviem.

Tādējādi apstiprinās izveidotā nestacionārā matemātiskā modeļa atbilstība aerācijas tvertnē notiekošiem skābekļa pārnesei procesiem.

#### 4.nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas mērīšanas ierīču inerces rādītājs ( $T\sim 5\text{s}$ ) ir būtiski zemāks nekā aerācijas procesā iesaistīto ierīču un perturbāciju inerces rādītāji, tādēļ pieļaujama to izmantošana, lai iegūtu informāciju par skābekļa koncentrāciju aerācijas tvertnē.
2. Preiļi NAI eksperimentālie pētījumi apstiprina iepriekš izvirzīto hipotēzi, ka aerācijas tvertne ir dinamisks nelineārs nestacionārs objekts ar mainīgiem jutības un inerces faktoriem. Aerācijas kompresoru „Izslēgts” režīmā aprēķinātais inerces rādītājs ir vairāk kā divas reizes lielāks nekā šis pats rādītājs „Izslēgts” režīmā ( $T_1=39.47$  min,  $T_2=19.64$  min). Tas rāda, ka apskābekļošanas procesu nevar aprakstīt ar vienkāršu pirmās kārtas eksponentvienādojumu ar nemainīgiem koeficientiem
3. Eksperimentāli pierādīta skābekļa šķīdības eksponenciālā daba. Par to liecina pētījuma eksperimentālos datus aprakstošās analītiskās izteiksmes(4.5 un 4.6. izteiksmes), kurām ir augsta korelācija ( $R^2>0.97$ ) ar mērījumu datiem.
4. Aerācijas kvalitātes mērīšanai izmantotā vidējās kvadrātiskās vērtības un vidējās kvadrātiskās kļūdas metode ļauj noteikt novirzi no iestatītās skābekļa koncentrācijas vērtības nepārtraukti visā simulācijas procesā. Šo metodi var izmantot arī citu dinamiski mainīgu procesu nepārtrauktai salīdzināšanai un kvalitatīvai novērtēšanai.
5. Eksperimentālo pētījumu datu un dinamiskā modeļa datu salīdzinošais pētījums apliecina izveidotā dinamiskā modeļa augstu atbilstības pakāpi reāla objekta parametriem. Vidējā kvadrātiskā kļūda Preiļu NAI eksperimentāli uzmērītajai un ar analītiskajām izteiksmēm modelētajai skābekļa koncentrācijai nepārsniedz  $\Delta C_{rms}=0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , kas liecina par ciešu sakarību starp abiem datu masīviem. Tātad izveidotais dinamiskais modelis ar paplašināto skābekļa šķīdības matemātisko modeli ir pielietojams aerācijas tvertnes modelēšanā un automātiskās vadības sistēmas darbības algoritma izveidē.

#### Conclusions

1. Modern dissolved oxygen measuring devices have substantially smaller inertia indicators ( $T\sim 5$  sec) than inertia indicators of aerotank and perturbances, and their use as information suppliers about oxygen concentration in wastewater is appropriate for aeration process control.
2. Experimental research in Preiļi WWTS prove the hypothesis about aerotank as dynamic nonstationary nonlinear object with variable inertia and sensitivity indicators. Calculated inertia indicator at the time period, when air blower is

switched on, is more than twice as big as the same indicator, when air blower is switched off ( $T_1=39.47$  min, and  $T_2=19.64$  min accordingly). This proves the statement, that wastewater oxygenation process cannot be described using simple first order exponential equation with static coefficients

3. Experiments prove exponential characteristics of oxygen solubility process. Analytic expressions describing experimental data (equations (4.5) and (4.6)) confirm exponential nature of oxygen solubility (correlation  $R^2>0.97$ ).
4. Root mean square and root mean square error methods were used to evaluate aeration quality and to measure difference between simulated and experimentally gathered data during whole simulation process instantly. These methods can be used also for any dynamic simulated process quality evaluation and comparison.
5. Experimental data and dynamic model simulation data comparison investigation confirmed high quality of developed dynamic model and conformity with real object parameters. Root mean square error for Preiți WWTS experimental data and data simulated by analytical expressions developed by author is less than  $\Delta C_{rms}=0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , showing very strong conformity between the two data arrays. This also confirms that analytically developed aerotank model with extended oxygen solubility model can be used for oxygen transfer simulation in aerotank, and for automatic control development.

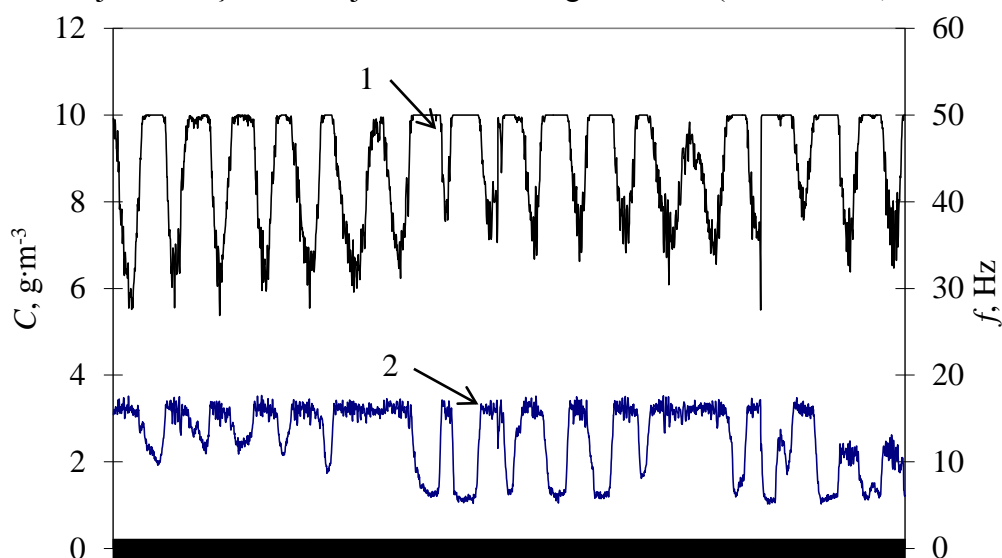
## 5. AERĀCIJAS KOMPRESORA ELEKTROPIEDZIŅAS VADĪBAS PROCESA OPTIMIZĀCIJA

### 5.1. Vadības algoritma pamatnostādnes un parametri optimiālai darbībai

NAIS ir nestacionāra dinamiska sistēma, kuru ietekmē daudzi mainīgi ārējās vides un iekšējie faktori. Tādēļ var izvirzīt hipotēzi, ka optimālais NAIS vadības princips kvalitatīvas un energoefektīvas aerācijas nodrošināšanai ir aerācijas kompresoru vadība, izmantojot asinhrono elektrodzinēju piedziņu ar vadāmiem frekvenču pārveidotājiem, kura vadību nodrošina mikrokontrolers, kas kā atgriezeniskās saites signālu par aerācijas tvertnē notiekošajiem procesiem lieto izšķīdušā skābekļa koncentrāciju un tās izmaiņas dinamiku. Šīs hipotēzes pārbaudei tika veikta aerācijas tvertnes kompresora elektropiedziņas vadības procesa modelēšana ar mērķi atrast optimālu tehnisku un ekonomisku vadības principu.

Optimālu NAIS darbību nosaka minimizētas izmaksas, lai nodrošinātu nepieciešamo iestatīto izšķīdušā skābekļa līmeni attīrītajos notekūdeņos, un minimāls noviržu līmenis no iestatītās skābekļa koncentrācijas aerācijas tvertnē pie dinamiski mainīgām slodzes perturbācijām.

Optimāla vadības principa izvēles būtiskumu apliecina autora veikts pētījums par aerācijas kompresora darbību Jelgavas NAI un ar to saistītās skābekļa koncentrācijas izmaiņām aerācijas tvertnē 2009.gada martā (skat. 5.1.att.).



**5.1.att. Aerācijas kompresora darba grafiks Jelgavas NAI un izšķīdušā skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē, 2009.gada martā**

1 – aeratora elektrodzinēja barošanas sprieguma frekvence,  $f$ , Hz; 2 – skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē,  $C$ ,  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

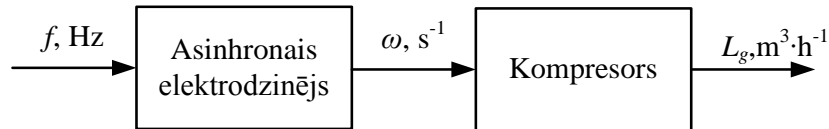
Datu vizuālā analīze rāda, ka vadības ierīces darbības kvalitāte ir nepietiekama, jo tai neizdodas nostabilizēt aerācijas kompresora darbību kvazistacionārā režīmā atbilstoši ietilpstošo notekūdeņu BSP un ŪSP līmenim. Aerācijas kompresors darbojas drīzāk diskrētā režīmā, kaut arī uzstādīta frekvences vadības elektropiedziņa.

Veicot korelāciju analīzi, tika konstatēta vidēji cieša negatīva korelācija starp aerācijas kompresora rotācijas frekvenci un skābekļa koncentrāciju aerācijas tvertnē frekvences pieaugums ir tad, kad skābekļa koncentrācija ir zema, bet frekvence samazinās, kad skābekļa koncentrācija ir augsta. Funkcionāli aerācijas kompresora

darbība ir pareiza, bet par zemu regulēšanas kvalitāti liecina tas, ka determinācijas koeficients ir tikai  $R^2 = -0.316$  ( $p < 0.01$ ). Tātad regulēšanas neprecizitāte ir ievērojama.

Lai nodrošinātu aerācijas iekārtas stabilu darbību, nepieciešams izstrādāt tādu automātiskās vadības sistēmu (AVS), kas spēj nodrošināt kvalitatīvu aerāciju, kompensējot perturbāciju (notekūdeņu sastāva, temperatūras, pieplūdes intensitātes, gaisa spiediena un sastāva) ietekmi uz regulējamā parametra (attīrītajos notekūdeņos izšķīdušā skābekļa koncentrācija) stabilitāti.

Gaisa padevi uz aerācijas tvertni nodrošina aerācijas kompresors. Tā izejas parametru – gaisa padevi uz aerācijas tvertni, regulē, mainot piedziņas elektrodzinēja rotācijas frekvenci (5.2.att.).



### 5.2.att. Aerācijas kompresora iekārtas blokskhēma

Aerācijas kompresora iekārtas vienādojums:

$$T_{ak} L_g(s) \cdot s + L_g(s) = k_{ak} f(s). \quad (5.1)$$

Aerācijas kompresora iekārtas pārvades funkcija ir:

$$W_{ak}(s) = \frac{L_g(s)}{f(s)} = \frac{k_{ak}}{T_{ak}s + 1}, \quad (5.2)$$

kur  $\frac{L_g(s)}{f(s)}$  – aerācijas kompresora dinamiskais pārvades koeficients.

Preiļu NAI izmantotās aerācijas kompresora iekārtas pārvades koeficients:

$$k_{ak} = \frac{L_g}{f} = \frac{1120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{50 \text{ Hz}} = 22.4 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{\text{Hz}}. \quad (5.3)$$

Aerācijas kompresora iekārtas laika konstante:

$$T_{ak} = 5..10 \text{ s.}$$

Ņemot vērā to, ka aerācijas kompresora laika konstante ir vairāk kā par kārtu mazāka nekā aerācijas tvertnes un tās slodzes inerces rādītāji, to tālākā modelēšanā neņem vērā.

Rūtsa tipa kompresoriem sakarībai starp gaisa padevi (spiedienu un plūsmu) un elektrodzinēja rotācijas frekvenci elektrodzinēja regulēšanas diapazonā (barošanas sprieguma frekvence  $f_n$  mainās robežās no  $0.4 \cdot f_n$  līdz  $1 \cdot f_n$ ), pastāv gandrīz lineāra sakarība. Tieši šāda sakarība tiks izmantota tālākajā modelēšanas procesā.

Tajā pašā laikā izveidotajā modelī iespējams izmantot arī jebkura cita tipa kompresorus (centrbēdzes, turbokompresorus, u.c.), šim nolūkam modelēšanas blokā ievietojot sakarību, kas apraksta no kompresora izplūstošā gaisa parametru atkarību no elektrodzinēja rotācijas frekvences.

Starp aerācijas kompresora ierīci un aerācijas tvertni atrodas aerācijas cauruļvadu sistēma, kas ir jāapskata kā objekts, kas rada transporta kavējumu.

Aerācijas cauruļvadu transporta kavējuma laika  $\tau_c$  aprēķinam izmantojama sekojoša izteiksme:

$$\tau_c = \frac{l \cdot S}{L_g} = \frac{l \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot L_g}, \quad (5.4)$$

kur  $l$  – aerācijas cauruļvadu garums, m;  
 $L_g$  – aerācijas ietaisais ražīgums,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $S$  – aerācijas cauruļvada šķērsgriezuma laukums,  $\text{m}^2$ ;  
 $d$  – aerācijas cauruļvadu diametrs, m.

Preiļu NAI kopējais cauruļvadu garums ir  $l=60$  m, un to diametrs  $d=350$  mm = 0.35 m. Tad aerācijas cauruļvadu transporta kavējums pie maksimālās ražības  $L_g=2 \cdot 560=1120$   $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  ir:

$$\tau_c = \frac{60 \cdot \pi \cdot 0.35^2}{4 \cdot 1120} = 0.00515(h) = 18.54(s).$$

Modelējot ir jāņem vērā, ka cauruļvadu laika kavējums ir atkarīgs no ražīguma  $L_g$  – jo mazāks ražīgums, jo lielāks transporta kavējums. Pieņemot, ka aerācijas kompresoru ražīgums var tikt samazināts līdz 50% no nominālās (zemāku ražīgumu ierobežo standarta frekvenču pārveidotāju zemākā frekvence 25 Hz), laika kavējums šādā režīmā var divkārtoties, sasniedzot  $\sim 37$  s (0.0103 h).

Aerācijas cauruļvadu transporta kavējuma pārvades funkcija:

$$W_c(s) = \frac{L_{giz}(s)}{L_{gie}(s)} = e^{-s\tau}, \quad (5.5)$$

kur  $L_{giz}$  – aerācijas ietaisais ražīgums aerācijas cauruļvadu izejā,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $L_{gie}$  – aerācijas ietaisais ražīgums aerācijas cauruļvadu ieejā,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $\tau$  – aerācijas cauruļvadu transporta kavējuma laiks.

Tā kā aerācijas cauruļvadu laika konstante ir par kārtu mazāka nekā aerācijas tvertnes un tās slodzes inerces rādītāji, to tālākā modelēšanā neņem vērā.

Regulējamais objekts NAI ir aerācijas tvertne. Tā izejas parametru – attīrītajos notekūdeņos izšķīdušā skābekļa koncentrāciju, regulē, mainot gaisa padevi aerācijas tvertnē (aerācijas tvertnes funkcionālā shēma ar perturbācijām parādīta 3.15. attēlā).

Izmantojot Ciglera–Nikolsa metodi (Smith, et al., 1997), aprēķināti aerācijas kompresoru automātiskās vadības ierīču statistiskie koeficienti. Aprēķinu rezultāti doti 5.1. tabulā.

5.1.tabula

#### Automātiskās vadības ierīču koeficienti pēc Ciglera–Nikolsa metodes

Vadības tips	Koeficienti		
	Kp	Ki	Kd
P	7.5		
PI	6.75	1.665	
PID	9	1	0.25

#### 5.2. Notekūdeņu aerācijas kompresora elektropiedziņas vadības algoritmu salīdzinājums

Aerācijas tvertnes matemātiskais modelis ar mainīgiem pārvades koeficientiem un mainīgiem inerciālajiem rādītājiem, kuri tiek pārrēķināti atbilstoši slodzes un gaisa padeves izmaiņām, tika izmantots dažādu aerācijas kompresoru vadības principu salīdzināšanai un vadības kvalitātes novērtēšanai.

Similācijas režīmā mainīgais lielums ir piesārņojuma līmenis ieplūstošajos notekūdeņos  $q$ . Sākuma piesārņojums tika pieņemts  $q=305$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , un modelēšanas laikā  $t=1440$  min tika modelētas piesārņojuma svārstības – gan 6 stundu izmaiņas

(piesārņojuma svārstības dienas režīma dēļ – piesārņojuma pieaugums laikā no 6:00 līdz 9:00, laikā no 12:00 līdz 14:00 un laikā no 18:00 līdz 20:00 ar piesārņojuma samazinājumu starplaikos), gan 24 stundu piesārņojuma atkārtšanās (darba dienas režīms), gan arī kvazinejaušas piesārņojuma svārstības dienas gaitā (atkārtšanās frekvence 30 min) (pēc Волков, Зуев, Цветкова, 2000; Горяинова, et al., 2001). Svārstību (izmaiņu) amplitūda visiem svārstību režīmiem ir 10% no sākuma piesārņojuma.

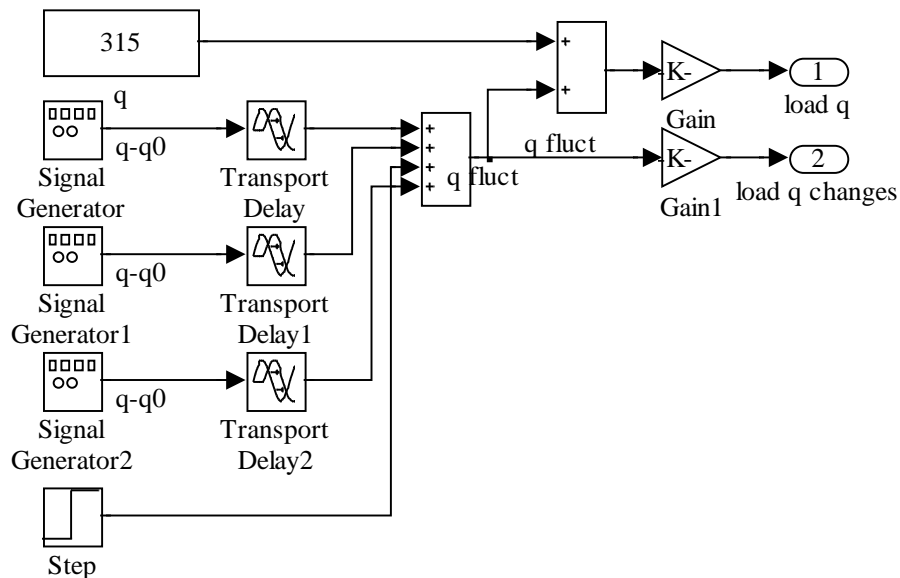
Iestatītais izšķīdušā skābekļa līmenis  $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  – tas ir pieļaujama skābekļa līmenis, kas ļauj minimizēt energopatēriņu, un nodrošina visus attīrīšanas procesus ar skābekli.

Aerācijas kompresoru vadībai tiek izmantots frekvenču pārveidotājs. Aerācijai tiek izmantoti divi aerācijas kompresori ar frekvenču vadību.

Viens aerācijas kompresors strādā vismaz ar minimālo frekvenci (20 Hz) pat minimālā piesārņojuma gadījumā, nodrošinot ne tika aerāciju, bet arī notekūdeņu maisīšanu. Otrs aerācijas kompresors ieslēdzas un darbojas ar minimālo frekvenci 20 Hz tad, kad pirmais kompresors ir sasniedzis 40 Hz frekvenci. Šajā brīdī pirmais aerācijas kompresors samazina savu darbības frekvenci uz 20 Hz, un notiek vienlaicīga abu kompresoru paralēla darbība līdz nominālajam darba režīmam 50 Hz.

Šāds darba algoritms nodrošina plašu aerācijas kompresora ražības izmaiņas diapazonu – no 40% no viena aerācijas kompresora ražības līdz abu kompresoru nominālo ražību summai (vienādu aerācijas kompresoru gadījumā tā sasniedz 200% no viena kompresora ražības). Tas nepieciešams, lai nodrošinātu stabilu apgādi ar skābekli gan minimālā piesārņojuma periodos (parasti nakts laikā), gan maksimālā piesārņojuma periodos (dienas vidus, u.c.).

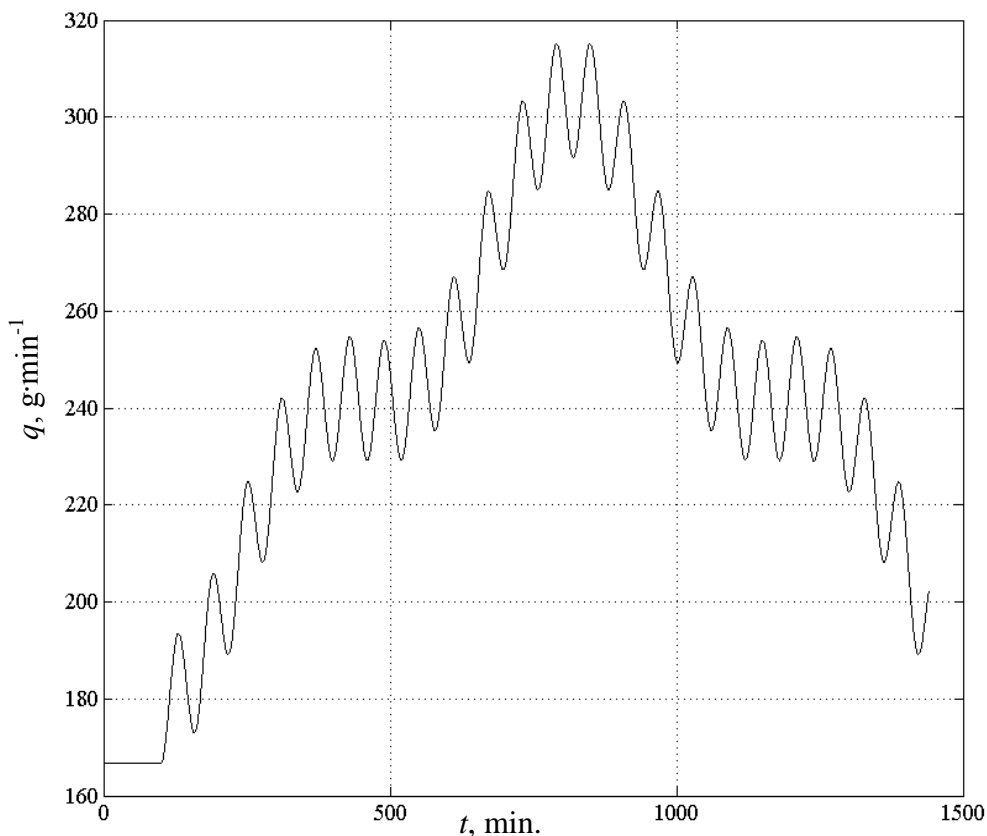
Piesārņojuma izmaiņu modelēšanas nodrošināšanai diennakts garumā izveidots piesārņojuma subbloks (5.3.attēls).



**5.3.att. Piesārņojuma diennakts svārstību modelēšanas subbloks**

Katrs no signālu ģeneratoriem „Signal Generator” formē atsevišķu svārstību signālu atbilstoši piesārņojuma izmaiņām, un laika kavējuma bloki „Time Delay” dod iespēju ieslēgt attiecīgo signālu nepieciešamajā laikā. Reizinātāji „Gain” nodrošina signāla pārrēķinu no  $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$  uz  $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Modelēšanas sākumā piesārņojums  $q=10000 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1} = 166,67 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  – minimāls piesārņojums. Pēc aerācijas kompresora nostabilizēšanās un iestatītā izšķīdušā skābekļa līmeņa sasniegšanas ( $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), kas notiek jau pēc 50 minūtēm, 100.minūtē tika ieslēgts notekūdeņu piesārņojuma svārstību modulis (5.4.att.). Tajā ieprogrammēti sekojoši piesārņojuma izmaiņu likumi – signāls ar amplitūdu  $2000 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$  (20% no sākuma iestatījuma) un svārstībām ar 8 stundu periodu summējas ar signālu ar amplitūdu  $5500 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$  (55% no sākuma iestatījuma) un svārstībām ar 24 stundu periodu, un ar signālu ar amplitūdu  $1500 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$  (15% no sākuma iestatījuma) un svārstībām ar 1 stundas periodu. Šādu piesārņojuma svārstību modeli var uzskatīt par kvazinejaušu Piesārņojuma summārais izmaiņas grafiks redzams 5.4.attēlā.

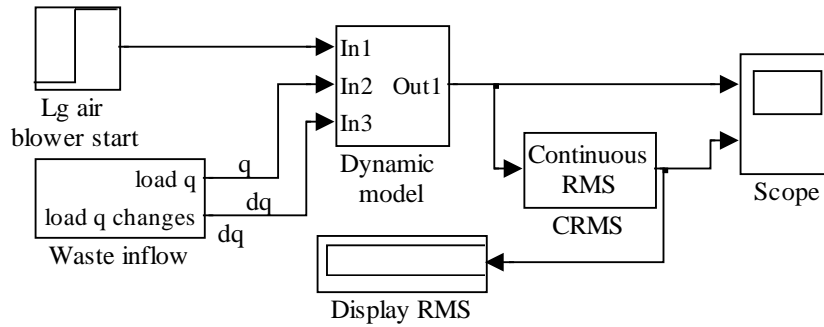


**5.4.att. Piesārņojuma  $q$  izmaiņu grafiks aerācijas tvertnes simulācijas modelim (modelēšanas laiks  $t=1440 \text{ min}$ )**

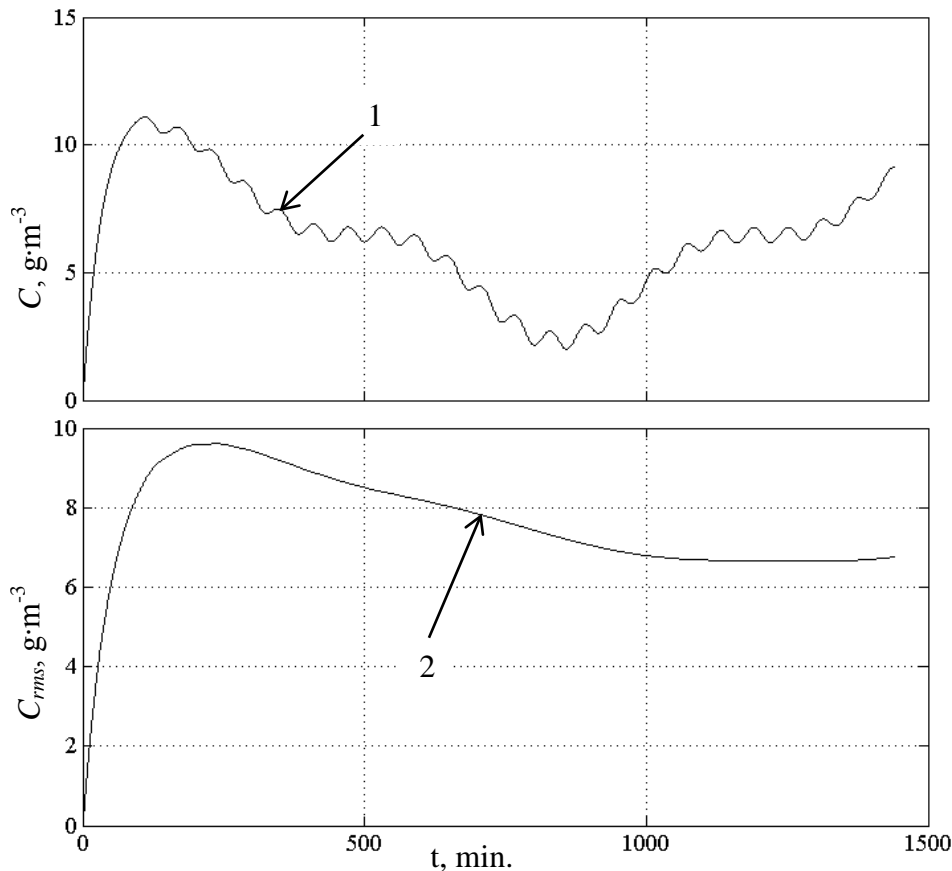
Maksimālā novirze no sākuma iestatījuma sasniedz 90%. Tiek iegūts gandrīz divkārtšs piesārņojuma pieaugums, kas pietiekoši precīzi atbilst municipālo notekūdeņu piesārņojuma svārstību diapazonam, t.i., maksimālais piesārņojums ir dienas vidū – no plkst. 11:00 līdz plkst.14:00, pārsniedzot minimālo piesārņojumu (nakts stundās no 01:00 līdz 05:00) par 90..100%.

Kā pirmais tika pārbaudīts aerācijas princips, kurā aerācijas kompresors darbojas nepārtrauktā režīmā, nodrošinot minimāli noteikto skābekļa koncentrāciju  $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  tieši piesārņojuma maksimuma stundās (modelī no 650. līdz 950.minūtei), bet pārējā laikā nodrošina gan notekūdeņu maisīšanu, gan arī aerāciju. Aerācijas tvertnes simulācijas blokshēma parādīta 5.5.attēlā, bet simulācijas rezultāts – 5.6.attēlā.





**5.5.att. Nepārtrauktas aerācijas kompresora darbības režīma simulācijas blokhēma**



**5.6.att. Nepārtrauktas aerācijas kompresora darbības režīma simulācijas rezultāti**

1 – skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē; 2 – vidējās kvadrātiskās vērtības līkne  $C_{rms}=f(t)$

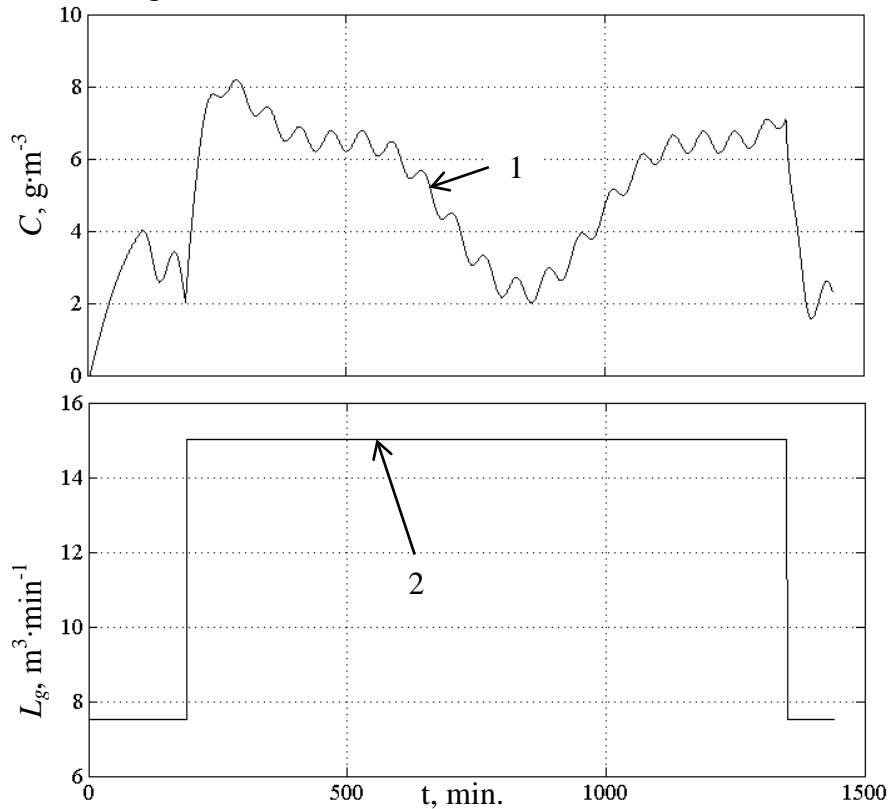
Simulācijas laikā tika atrasta aerācijas kompresoru ražīgums  $L_g=0.805 \cdot L_{gmax}$ , kas nodrošina skābekļa koncentrāciju maksimālās slodzes periodā  $C=2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Vizuālais skābekļa koncentrācijas grafika novērtējums rāda būtisku novirzi no iestatītās vērtības laika posmos, kad piesārņojums ir mazāks nekā maksimālais.

Neapšaubāmi var teikt, ka izmantojot šādu aerācijas kompresora darba režīmu, attīrīšana būs pilnīga, bet tajā pašā laikā būs augsts enerģijas patēriņš, un līdz ar to zema energoefektivitāte. Vidējā kvadrātiskā vērtība skābekļa koncentrācijai sasniedza  $C_{rms}=6.76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , bet maksimālā skābekļa koncentrācijas amplitūda sasniedza  $C=11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  – daudz augstāk nekā iestatītā  $C=2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Kā nākošais tika simulēts aerācijas process, kurā viens aerācijas kompresors strādā nepārtraukti, bet otrs tiek pieslēgts paaugstinātu piesārņojuma slodzi gadījumā. Lai būtu nodrošināma savstarpējā savietojamība, abi kompresori tika izvēlēti ar vienādu

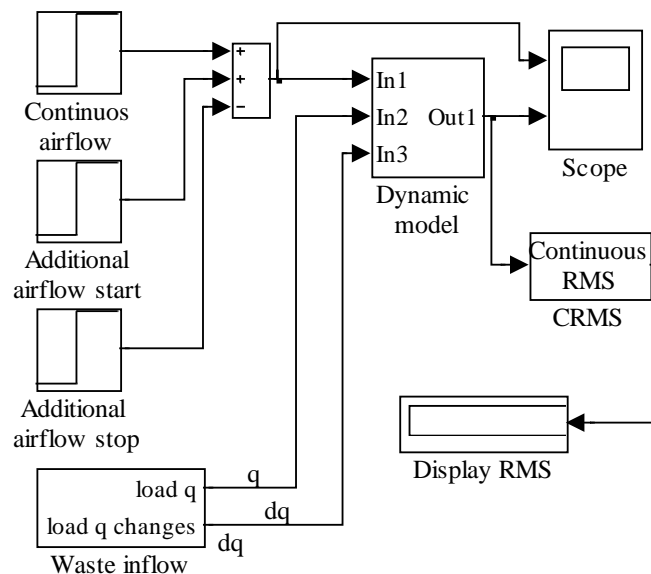
ražīgumu. Aerācijas tvertnes simulācijas rezultāts šim modelim parādīta 5.7.attēlā, bet simulācijas blokhēma – 5.8.attēlā.

Arī šīs simulācijas novērtējums rāda ļoti būtisku novirzi no iestatītās vērtības laika posmos, kad notekūdeņu piesārņojums ir mazāks nekā maksimālais (maksimālā amplitūda ir virs  $8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).



**5.7.att. Simulācijas rezultāti divu aerācijas kompresora sistēmai**

1 – skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē; 2 – gaisa padeves ražīguma grafiks  $L_g=f(t)$



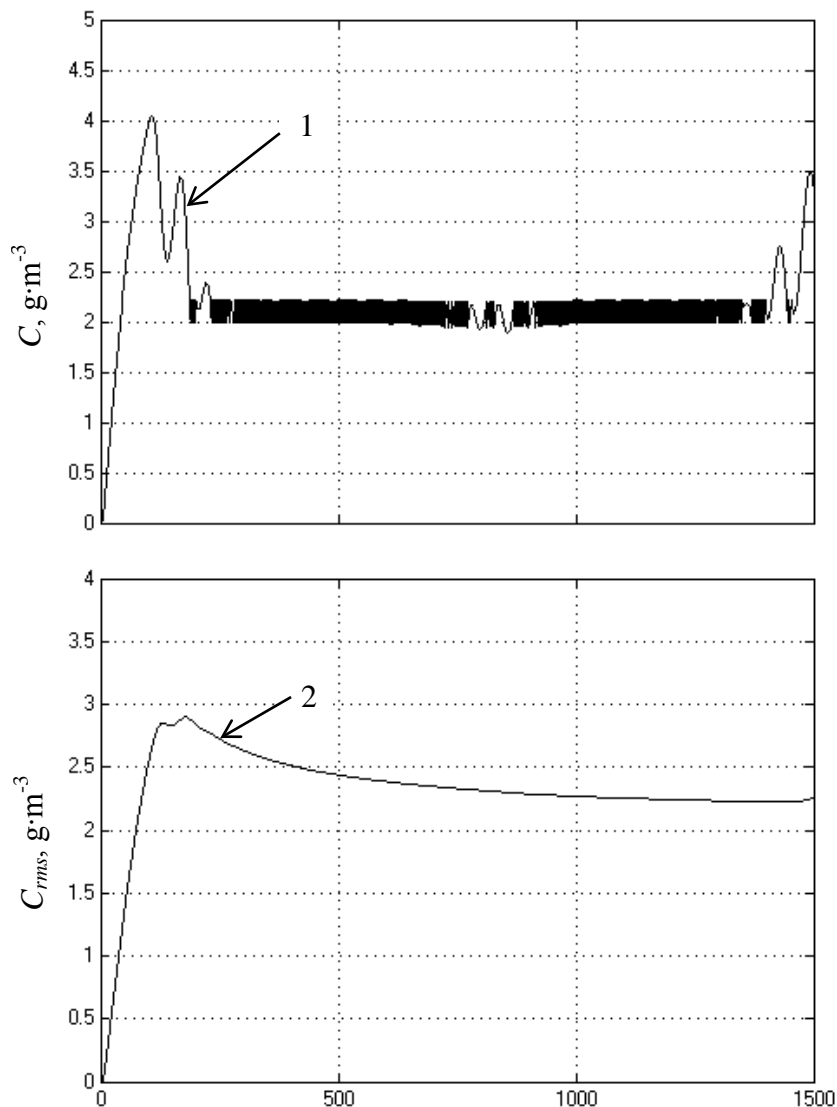
**5.8.att. Simulācijas blokhēma divu aerācijas kompresoru sistēmai**

Ja NAI tiks izmantots šādi ieregulēta NAIS, neapšaubāmi var teikt, ka attīrīšana būs pilnīga, bet tajā pašā laikā enerģijas patēriņš būs būtiski paaugstināts

periodos ar nelielu piesārņojumu, un tādēļ zema NAI darbības energoefektivitāte. Vidējā kvadrātiskā vērtība skābekļa koncentrācijai sasniedza  $C_{rms}=5.34 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , t.i., joprojām daudz augstāk nekā iestatītā nepieciešamā vērtība  $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

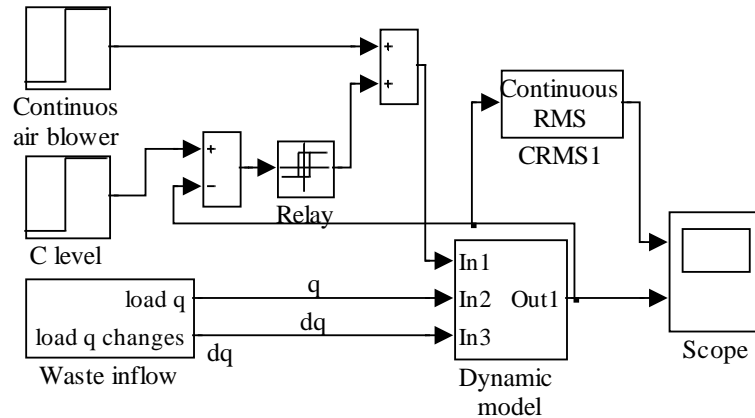
Abas augstākminētās modelēšanas, izmantojot atvērtās vadības sistēmas bez atgriezeniskās saites, parādīja augstu enerģijas patēriņu un paaugstinātu skābekļa koncentrāciju aerācijas tvertnē, kas vidēji 2.5–3 reizes pārsniedza iestatīto nepieciešamo.

Vienkāršākā aerācijas sistēma, kura izmanto informāciju no aerācijas tvertnes, ir aerācijas kompresora divpozīciju vadības sistēma, kas izmanto informāciju no skābekļa sensora, un pazeminātas skābekļa koncentrācijas gadījumos paralēli jau darbošamies kompresoram pieslēdz vēl vienu aerācijas kompresoru. Kad skābekļa koncentrācija paaugstinās virs noteikta iestatītā līmeņa, papildus kompresors tiek atslēgts, un aerāciju un jaukšanu nodrošina tikai viens aerācijas kompresors. Aerācijas tvertnes simulācijas rezultāts parādīts 5.9.attēlā, bet simulācijas blokskāma šim modelim – 5.10.attēlā.



**5.9.att. Simulācijas rezultāti divu aerācijas kompresora sistēmai**

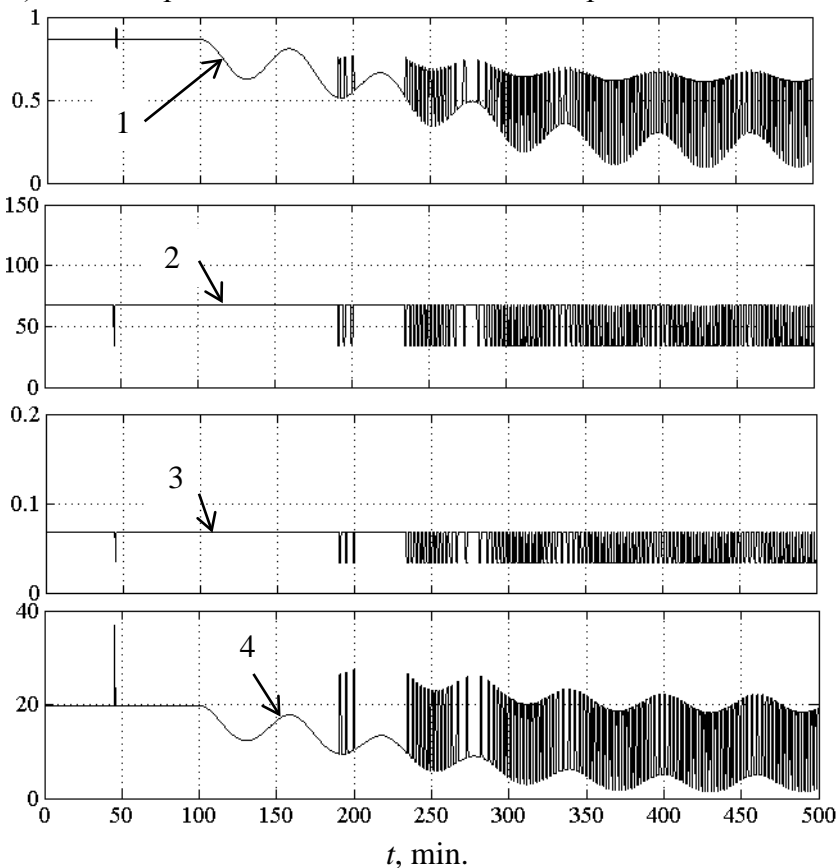
1 – skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē; 2 – vidējās kvadrātiskās vērtība  $C_{rms}$



### 5.10.att. NAI aerācijas kompresoru divpozīciju vadības modelis

Vizuālais skābekļa koncentrācijas grafika novērtējums rāda ievērojamu novirzi no iestatītās vērtības galvenokārt stabilizācijas posmā darbības sākumā. Modelētā skābekļa koncentrācijas vidējā kvadrātiskā vērtība  $C_{rms}=2.32 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  tuvojas nepieciešamajam līmenim, tomēr vēl joprojām vairāk kā par 15% augstāk nekā iestatītā  $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tika novērtētas arī inerces un jutības rādītāju izmaiņas simulācijas laikā (5.11.att.). Grafiski parādīts īsāks modelēšanas laika posms – līdz 500.minūtei.



### 5.11.att. Inerces un jutības rādītāju izmaiņas divpozīciju vadības sistēmai

1 –  $K_a$ ,  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ ; 2 –  $T_a$ , min., 3 –  $K_q$ ,  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})$ , 4 –  $T_q$ , min.

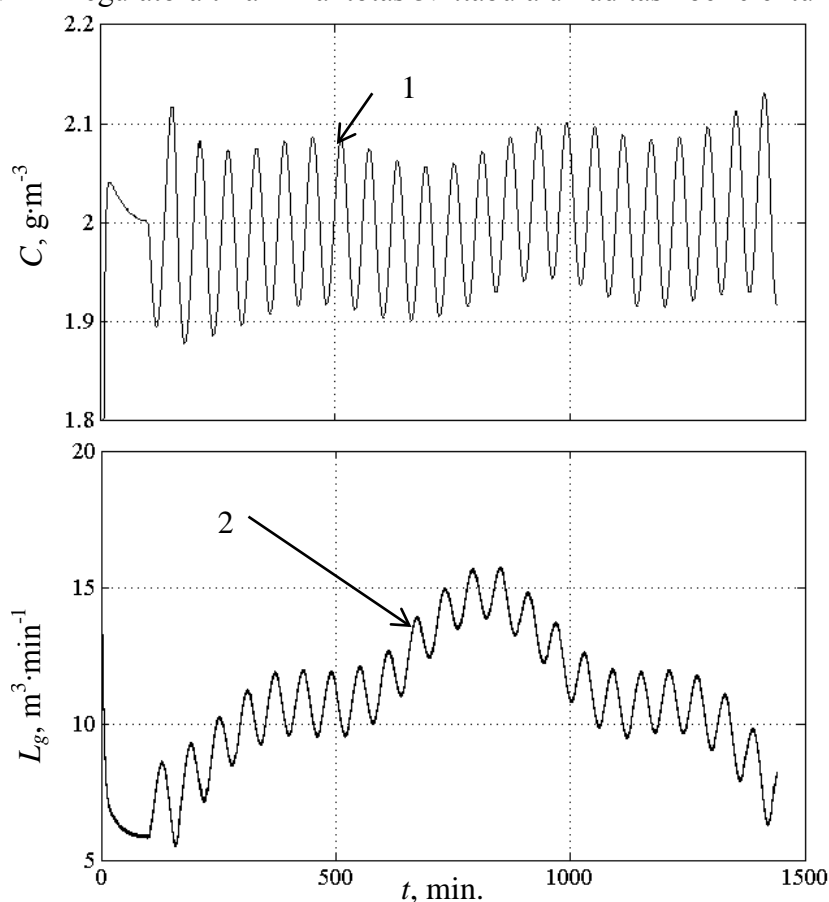
Var ievērot arī, ka aerācijas kompresors tiek ieslēgts un izslēgts ar diezgan augstu frekvenci – intervāls 1..3 minūtes. Šādā darba režīmā var strādāt tikai īpaši elektrodzinēji, un triecienslodzes uz aerācijas kompresoru un pārvalu starp

elektrozinēju un kompresoru būs ievērojamas, samazinot iekārtas ilgmūžību. Tāpēc šāds darba režīms nav vēlams, kaut arī to izmanto NAIS vadībā.

Simulācija apliecina, ka, mainoties slodzei  $q$  un aerācijas kompresoru darbībai, izmainās jutības un inerces rādītāji. Izveidotais simulācijas modelis veic nepārtauktu šo rādītāju pārrēķinu, nodrošinot iespējami precīzu izveidotā modeļa atbilstību aerācijas tvertnē notiekošiem procesiem.

Tvertnes jutības rādītāja  $K_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.1 līdz  $0.85 \text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot\text{(m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ , tvertnes inerces rādītāja  $T_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 30 līdz 65 min, slodzes jutības rādītāja  $K_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.03 līdz  $0.07 \text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot\text{(m}^3\cdot\text{h}^{-1})$ , un slodzes inerces rādītāja  $T_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 3 līdz 30 min.

Simulācija, izmantojot PID kontrolleri apvienojumā ar frekvenču pārveidotāju, uzrādīja daudz labākus rezultātus (simulācijas rezultāti 5.12.att., simulācijas blokshēma 5.13.att.). PID regulatorā tika izmantotas 5.1.tabulā uzrādītās koeficientu vērtības.

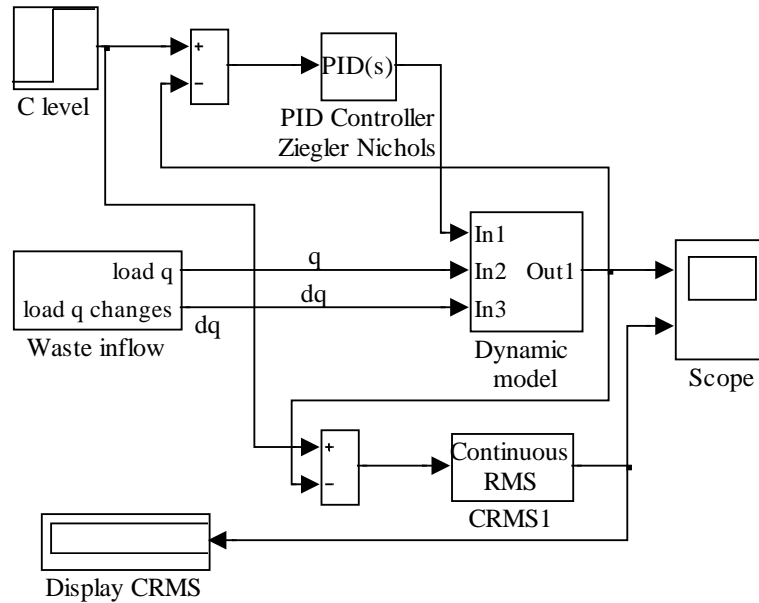


**5.12.att. Simulācijas rezultāti, lietojot PID vadību**

1 – skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē  $C$ ; 2 – gaisa padeves ražīgums  $L_g$

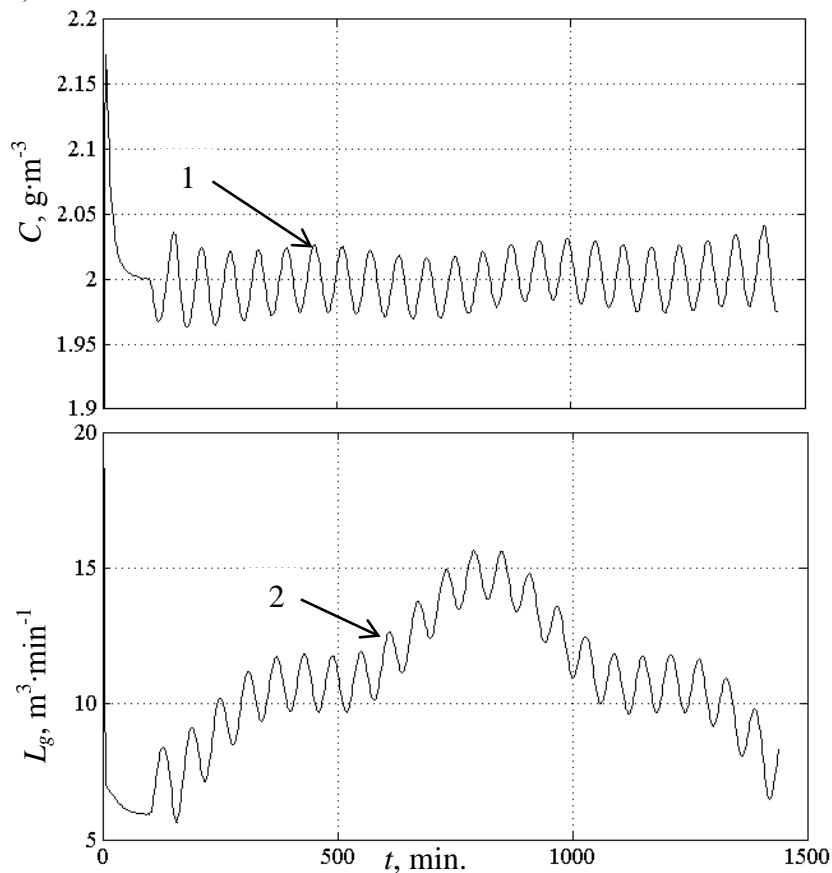
Tā kā pirmā simulācija parādīja, ka skābekļa koncentrācijas vidējā kvadrātiskā vērtība ir tuvu  $2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , tika nolemts izmainīt kvalitātes vērtēšanas principu, ieviešot vidējās kvadrātiskās kļūdas vērtējumu – vidējo kvadrātisko vērtību novirzēm no iestatītās vērtības.

PID automātiskās vadības princips uzrādīja daudz augstāku vadības kvalitāti. Tika sasniegta viszemākā skābekļa koncentrācijas noviržu vidējā kvadrātiskā vērtība  $\Delta C_{rms}=0.101 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .



**5.13.att. NAI aerācijas kompresoru vadības modelis, lietojot PID vadību**

Ņemot vērā to, ka Čīglera–Nikolsa paņēmieni neievērtē aerācijas tvertnes nestacionāro dinamisko dabu, tika nolemts veikt simulāciju, lai atrastu tādas PID kontrollera parametrus, kas nodrošina augstāku regulēšanas kvalitāti (zemāku  $\Delta C_{rms}$ ) (5.14.attēls).



**5.14.att. NAI aerācijas kompresoru vadības modelis, lietojot PID vadību ar izmainītiem koeficientiem**

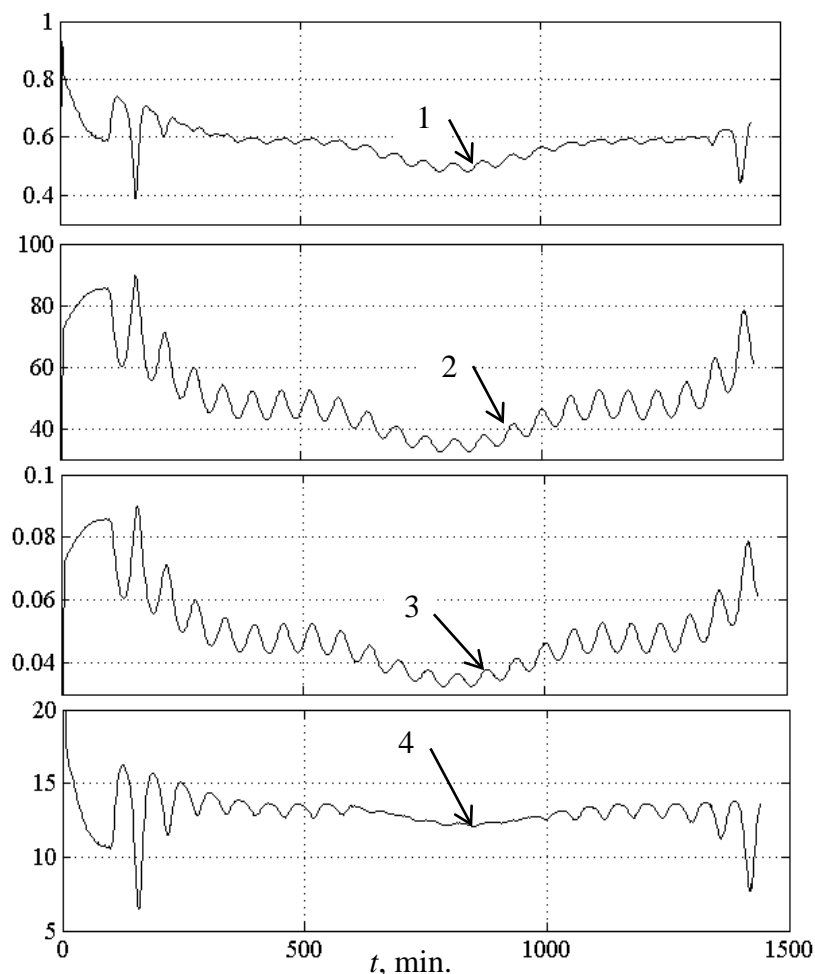
1 – skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē  $C$ ; 2 – gaisa padeves ražīgums  $L_g$

Tika konstatēts, ka automātiskā vadība, izmantojot jaunatrstos koeficientus, ir ievērojami kvalitatīvāka (izmantojot  $K_p=30$ ,  $T_i=3$  un  $T_d=0.05$ ), jo skābekļa koncentrācijas noviržu vidējā kvadrātiskā vērtība ir vairs tikai  $\Delta C_{rms}=0.071 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tomēr jāņem vērā tas, ka pārregulējums sākumposmā bija ievērojami augstāks, sasniedzot  $C=2.175 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$

Simulācijas laikā, mainoties gan slodzei  $q$ , gan aerācijas kompresoru darbībai, izmainījās gan jutības, gan inerces rādītāji, sekojot līdz aerācijas tvertnē notiekošiem procesiem (5.15.att.).

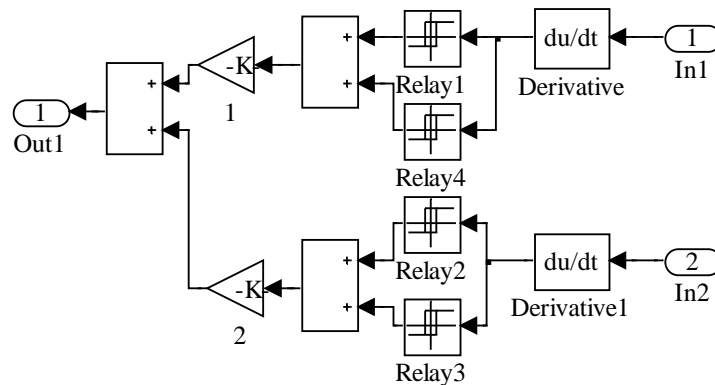
Tvertnes jutības rādītāja  $K_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.4 līdz 0.95  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , tvertnes inerces rādītāja  $T_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 37 līdz 90 min, slodzes jutības rādītāja  $K_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.035 līdz 0.09  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , un slodzes inerces rādītāja  $T_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 6 līdz 20 min.



**5.15.att. Inerces un jutības rādītāju izmaiņas, lietojot PID vadības sistēmu**

1 –  $K_a$ ,  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ ; 2 –  $T_a$ , min.; 3 –  $K_q$ ,  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ ; 4 –  $T_q$ , min.

Lai pārbaudītu kombinētās PID/kvaziinvariantās vadības darbības kvalitāti, tika izveidots kvaziinvariantes vadības simulācijas bloks (5.16.attēls), kura ieejā tiek izmantots gan skābekļa koncentrācijas signāls, gan notekūdeņu pieplūdes signāls (simulācijā ņemts no piesārņojuma izmaiņas bloka).



### 5.16.att. Kvaziinvariances vadības signālu formējošā moduļa blokshēma

Kvaziinvariances blokā notiek notekūdeņu pieplūdes intensitātes signāla un skābekļa koncentrācijas signāla diferenciacija, ļaujot konstatēt šo signālu izmaiņas ātrumu. „Relay” bloki ļauj iestatīt nostrādes līmeni, pie kura izmainās izejas signāls, kurš tiek padots uz summatoru, kā arī šī izejas signāla līmeni.

Iestatot nostrādes un izejas signālu līmeņus, tika ņemts vērā eksperimentos un iepriekšējās simulācijās iegūtā informācija par aerācijas tvertnes dinamiku. To apliecina inerces rādītāji skābekļa koncentrācijas līknes kāpjošajā daļā, kuri ir apmēram 2 reizes lielāki nekā tās krītošajā daļā (4.12. un 4.13.att.).

Nostrādes līmeņu, izejas līmeņu un reizinātāju vērtības simulācijai dotas 5.2.tabulā.

5.2.tabula

#### Kvaziinvariances vadības bloku koeficienti

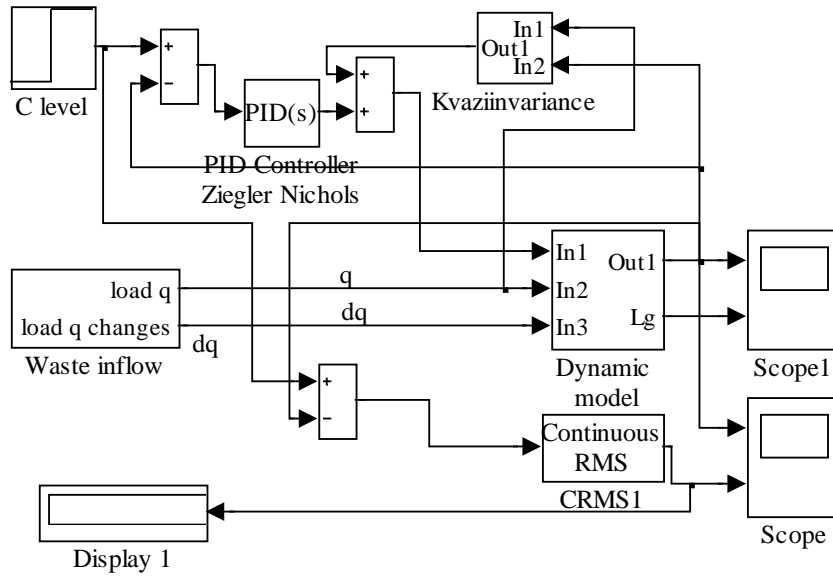
Bloka Nr.	Ieslēgšanās līmenis	Izslēgšanās līmenis	Izejas līmenis, kad ieslēgts	Izejas līmenis, kad izslēgts	Reizinātājs
Relay1	1	0	10	-5	0.08
Relay2	0.01	0	-10	0	0.05
Relay3	0	-0.01	0	5	0.05
Relay4	0.5	-1	8	-4	0.08

Simulācijas blokshēma ar kvaziinvariances bloku parādīta 5.17.attēlā, un simulācijas rezultāti – 5.18.attēlā, inerces un jutības rādītāju izmaiņas – 5.19.attēlā.

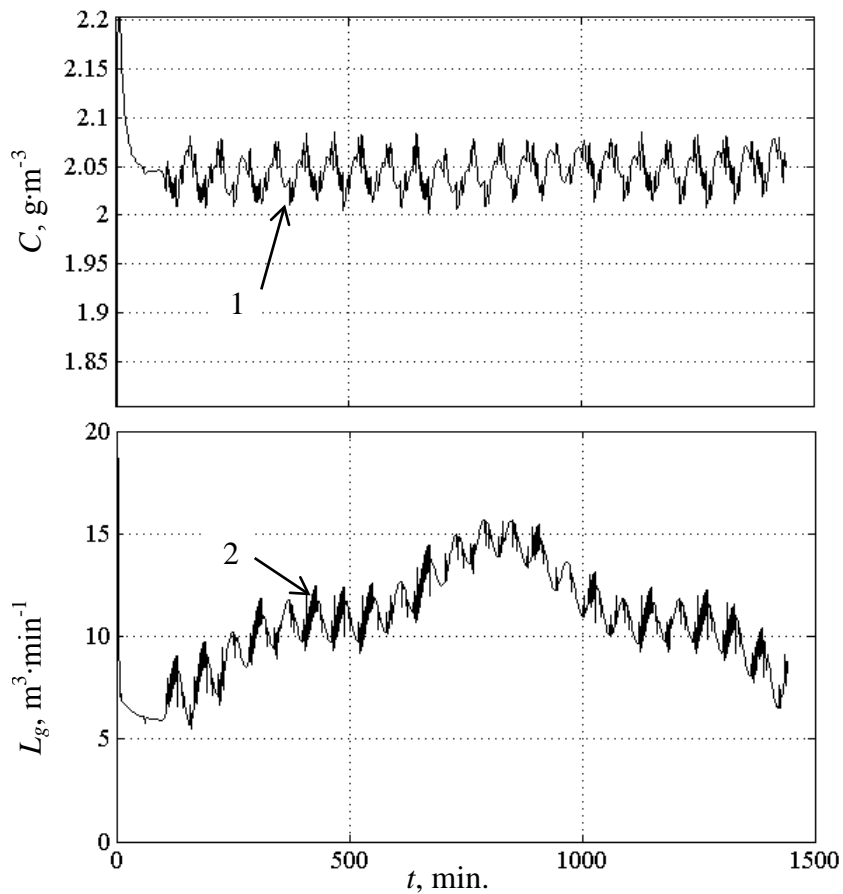
Tvertnes jutības rādītāja  $K_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.3 līdz 0.95 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) $\cdot$ ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ), tvertnes inerces rādītāja  $T_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 35 līdz 95 min, slodzes jutības rādītāja  $K_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.035 līdz 0.095 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) $\cdot$ ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ), un slodzes inerces rādītāja  $T_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 5 līdz 9 min.

Vizuālais skābekļa koncentrācijas grafika novērtējums rāda būtisku noviržu samazinājumu no iestatītās vērtības. Noviržu vidējā kvadrātiskā vērtība skābekļa koncentrācijai  $\Delta C_{rms}=0.067\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  – ievērojami zemāka nekā visiem citiem pielietotajiem automātiskās vadības principiem.



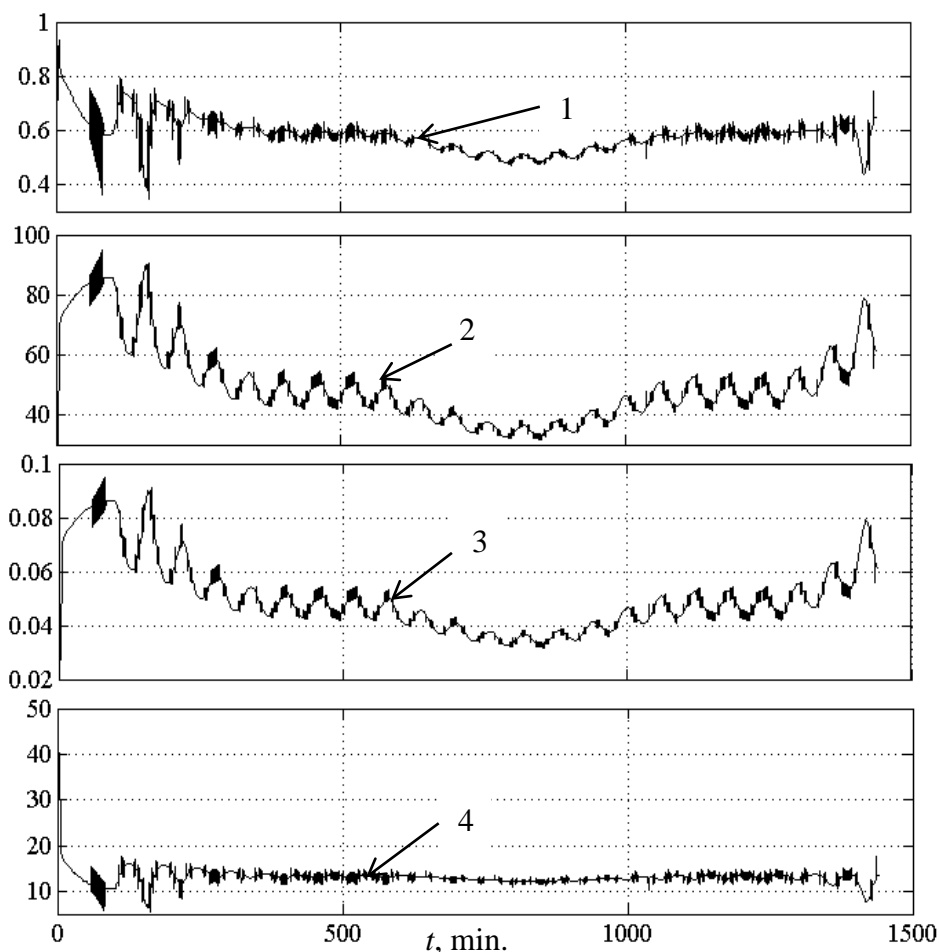


5.17.att. NAI aerācijas kompresoru vadības modelis, lietojot kombinēto PID/kvaziinvariances vadību



5.18.att. Simulācijas rezultāti, lietojot PID/kvaziinvariances vadību

1 – skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē  $C$ ; 2 – gaisa padeves ražīgums  $L_g$ .



**5.19.att. Inerces un jutības rādītāju izmaiņas, lietojot PID/kvaziinvariances vadību**

1 –  $K_w$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) $\cdot$ ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ) $^{-1}$ ; 2 –  $T_w$  min.; 3 –  $K_q$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) $\cdot$ ( $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ ) $^{-1}$ ; 4 –  $T_q$  min.

Simulācijas laikā, mainoties slodzei  $q$ , mainās aerācijas kompresoru darbība, un vienlaicīgi izmainās aerācijas tvertnes jutības un inerces rādītāji. Var ievērot, ka pārrēķina biežums ir ievērojami lielāks nekā vienkāršai PID vadībai, bet tomēr mazāks nekā divpozīciju vadības sistēmai. Tā kā tiek izmantota elektrodzinēju frekvenču vadība, šāds darba režīms nav bīstams ne elektrodzinējiem, ne aerācijas kompresoriem.

Veikto simulāciju analīze liecina par to, ka PID/kvaziinvariantās vadības princips vislabāk spēj vadīt aerācijas kompresora darbu dinamiski mainīgā nestacionārā vidē ar mainīgiem jutības un inerces rādītājiem, nodrošinot augstu regulēšanas kvalitāti un mazu novirzi no iestatītās nepieciešamās skābekļa koncentrācijas aerācijas tvertnē.

### 5.3. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas energoefektivitātes ekonomiskā analīze

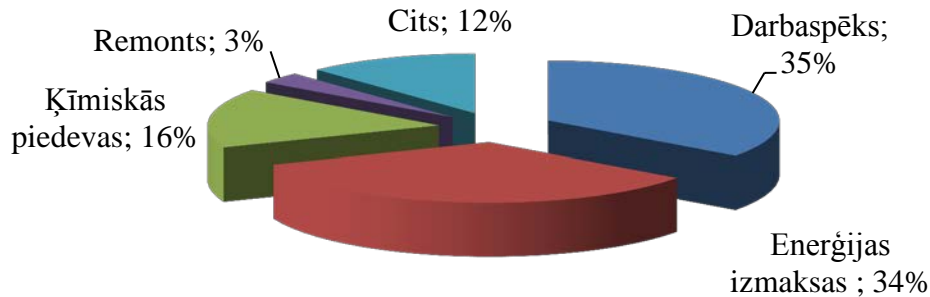
Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas un tās vadības algoritma izvēle nav tikai enerģētiska vai tehnoloģiska problēma. Lielā mērā lēmumu pieņemšanu ietekmē sociāli ekonomiskie faktori – gan finanšu resursu pieejamība un cena, gan sabiedrībā noteiktas prasības NAI darbībai, gan darbaspēka pieejamība un izmaksas, gan arī ilgtspējīgas attīstības prasības, kas ietver sevī racionālu dabas resursu, cilvēkresursu un ekonomisko resursu izmantošanu (Sniders, Straume, 2005; Šnīders, Leščevics, 2007).

Lai izvērtētu ekonomisko aspektu ietekmi, tika veikta gan NAI izdevumu struktūras analīze, gan arī aerācijas tvertnes dažādu vadības algoritmu ietekmes ekonomisko rādītāju modelēšana, izvirzot arī NAI darbības optimizācijas kritērijus.

### 5.3.1. Notekūdeņu aerācijas izdevumu struktūra

NAI aerācijas inženiersistēmu enerģijas patēriņš ir atšķirīgs dažādās municipālajās NAI. Tas ir atkarīgs no NAI izmēra un veida, piesārņojuma intensitātes un notekūdeņu ieplūdes svārstību diapazona, kā arī no NAI izmantotajām tehniskajām ierīcēm (Stone Inc., 2005; Tchobanoglous, Franklin, and Stensel, 2003).

Tipiskā izdevumu struktūras bilance ASV NAI parādīta 5.20.attēlā.



5.20.att. NAI izdevumu struktūras bilance ASV, 2003.g. (Carns, 2003)

No attēla redzams, ka lielāko proporciju ASV NAI izdevumu struktūrā sastāda darbaspēka izmaksas (35%), tad seko enerģijas izmaksas (34%). Šādu sadalījumu var izskaidrot ar augstām darbaspēka izmaksām un salīdzinoši zemām enerģijas cenām (Bluejay, s.a.; Engle, 1977).

Tika veikta ASV NAI izdevumu struktūras pielīdzināšana Latvijas situācijai 2009.gadā, ņemot vērā to, ka Latvijā būtiski mazāk tiek lietotas ķīmiskās piedevas.

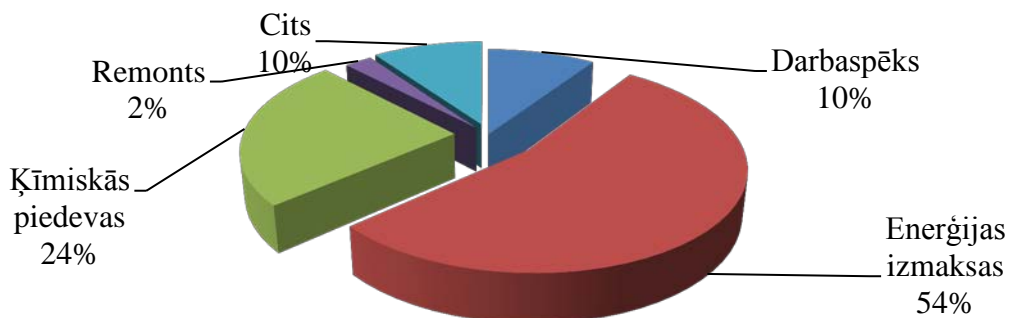
Šim nolūkam tika izmantoti sekojoši izejas dati:

- vidējā alga ASV 2009.gadā bija USD 70354.00 p.a. (USDHF, 2010) jeb 2867 LVL (USD/LVL kurss 0.489 USD/LVL, (Latvijas Banka, 2010));
- Latvijā vidējā alga 2009.gadā bija 461 LVL (LR CSP, 2010). Atšķirība algu līmenī ir 6.22 reizes;
- elektroenerģijas cena (Latvenergo, 2010) industriālajiem lietotājiem Latvijā bija 0.06694 LVL·kWh<sup>-1</sup>;
- ASV elektroenerģijas cena par vienu kWh 2009.gadā bija robežās no 7¢ Ziemeļdakotas štatā līdz 26¢ Havajā, vidējā cena 9.35¢ (5,0677 LV santīmi) (USEIA, 2010). Atšķirība elektroenerģijas cenā 1.236 reizes.

Pieņēmumi ekstrapolācijai:

- nodarbinātības struktūra ASV un Latvijas NAI neatšķirās;
- remontam pamatā ir 50% algas un 50% materiālu izmaksu;
- materiāli un ķīmiskās vielas tiek iepirkts par pasaules cenām;
- sadaļā „Citi izdevumi” 50% ir algas un 50% materiāli.

NAI izmaksu bilances ekstrapolācijas rezultāts atbilstoši Latvijas apstākļiem 2010.gadā parādīts 5.21.attēlā.



5.21.att. NAI izmaksu bilances ekstrapolācija Latvijas apstākļiem, 2009.gads

Ekstrapolācijas rezultāti apstiprina Latvijas NAI raksturojošo paaugstināto elektroenerģijas izmaksu proporciju (Preiļu NAI dažādos gados konstatētā 40..70% un ekstrapolācijā iegūtie 54% no kopējām izmaksām).

### 5.3.2. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas optimizācijas kritēriji

Pēdējās dekādēs ir notikusi ļoti strauja notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģiju, tehnoloģisko iekārtu un zināšanu par notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs notiekošajiem procesiem attīstība. Tādēļ NAI konfigurācijas optimāla izvēle ir komplicēts multifaktoru uzdevums. Šī pētījuma ietvaros optimizācijas uzdevums ir reducēts uz atsevišķas NAI daļas – NAIS vadības algoritma optimālu izvēli, nosakot sekojošus kritērijus:

- aerācijas inženiersistēmai jāspēj nodrošināt skābekļa koncentrāciju notekūdeņos  $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  pie piesārņojuma izmaiņām gan minimālās slodzes periodā ( $q_{min}\approx 200 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ), gan arī ekstrēmos slodzes periodos ( $q_{max}\approx 380\text{--}400 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ );
- regulēšanas kļūdai jātiecas uz 0 (prasība pēc minimuma);
- operatīvajām izmaksām aerācijas nodrošināšanai jātiecas uz minimumu.

Balstoties uz šādiem optimizācijas kritērijiem, tika pārbaudīti visi iepriekš pētītie NAIS vadības principi.

### 5.3.3. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas tehniski ekonomiskais modelis

Aerācijas kompresoru vadības principu salīdzināšanai pēc viena no optimizācijas kritērijiem – izmaksām, tika izveidota inovatīva operatīvo elektroenerģijas izmaksu aprēķina izteiksme nepārtrauktam procesam:

$$A = I_A \cdot a_A + B + \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot b(t) dt, \quad (5.6)$$

kur  $A$  – kopējās elektroenerģijas izmaksas laika periodā  $t_2-t_1$ , LVL;

$I_A$  – aerācijas kompresoru aizsardzības ievadaizsardzības aparatūras nominālā strāva, A;

$a_A$  – maksa par ievadaizsardzības aparāta strāvas lielumu, LVL/A/gadā;

$B$  – maksa par pieslēgumu, LVL/gadā;

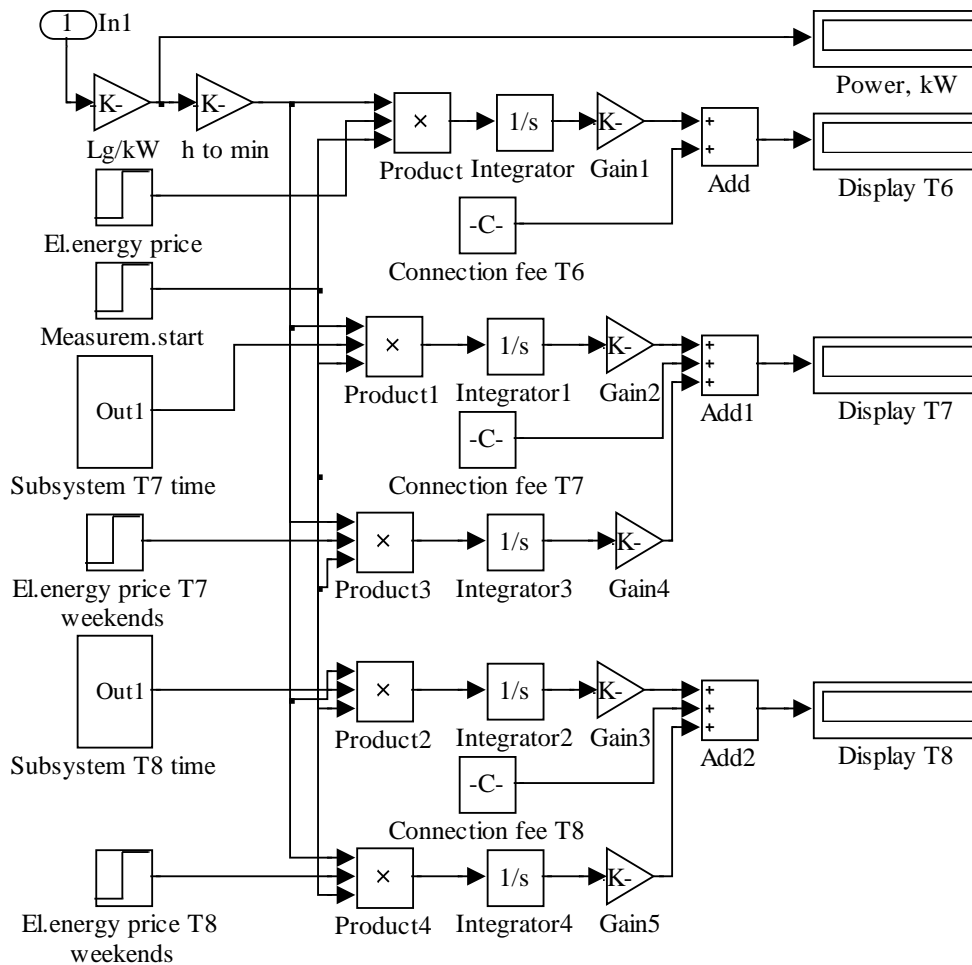
$P(t)$  – aerācijas kompresoru momentānā jauda, kW;

$b(t)$  – samaksa par patērēto elektroenerģiju konkrētā laikā, LVL·kW<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>.

Izteiksme ievērtē gan enerģijas piegādātāja noteiktos maksājumus (tarifu plānus T6, T& un T8 (Latvenergo, 2011)) par pieslēguma izveidošanu un aizsardzību, kas parasti ir vienreizējas izmaksas, gan arī tiešās operatīvās izmaksas, aerācijas kompresoru elektrodzinējiem strādājot mainīgas slodzes apstākļos.

Kontrolējot elektrodzinēju momentāno elektrisko jaudu, un zinot konkrētām diennakts un nedēļas laika periodam noteiktos elektroenerģijas tarifus, iespējams noteikt kopējās izmaksas konkrētām laika periodam.

Izteiksmes izmantošanai simulācijas procesā tika izveidots ekonomiskās efektivitātes aprēķinu simulācijas bloks, kas ietver sevī dažādu tarifu (T6 – nemainīgs tarifs visu laiku, T7 – tarifs, kas ievērtē dienas, nakts un brīvdienų noslodzi, un T8 – tarifs, kas ievērtē dienas, nakts, brīvdienų un maksimuma slodzes) ar atšķirīgu pielietojumu izvērtējumu industriālajiem patērētājiem (5.22.att.).



**5.22.att. Aerācijas kompresoru ekonomiskās efektivitātes aprēķinu simulācijas bloks, lietojot trīs dažādus elektroenerģijas tarifus**

Apvienojošie dati par tehniski ekonomiskās modelēšanas rezultātiem apkopoti 5.4.tabulā.

5.4.tabula

**Tehniski ekonomiskās modelēšanas rezultāti**

Vadības princips	Izšķīdušā skābekļa iestatījums, lai nodrošinātu $C_{MIN}=2$ $g \cdot m^{-3}$ , $g \cdot m^{-3}$	Gada enerģijas izmaksas, LVL, lietojot:			Regulēšanas kvalitāte, $*C_{rms}$ , $**\Delta C_{rms}$ , $g \cdot m^{-3}$
		tarifu T6	tarifu T7	tarifu T8	
Nepārtraukti ieslēgts aerācijas kompresors	NA	16018	16452	15976	*6.76
Divu kompresoru secīga darbība	NA	15014	15497	15060	*5.384
Divpozīciju programvadība	2.25	12611	13038	12644	*3.055
PID regulators – standartkoeficienti	2.12	11917	12332	11963	**0.101
PID regulators – piemeklēti koeficienti	2.05	11857	12269	11903	**0.071
PID/kvaziinvariantā vadība	2.045	11755	12207	11851	**0.069

Ņemot vērā izvirzītos optimizācijas kritērijus, un simulācijas rezultātā iegūtos ekonomiskos datus (5.4.tabula), var konstatēt, ka vismazāko iestatījuma kļūdu un mazākās izmaksas piedāvā PID/kvaziinvariantās vadības sistēma, izmantojot T6 tarifu plānu. Šo vadības modeli var uzskatīt par optimālu konkrētajai NAIS.

Vadības principu analīze izskaidro arī to, ko intervijā apgalvoja Preiļu NAI vadība – izmainot aerācijas kompresoru darbības režīmu no „2 stundas ieslēgts/4 stundas izslēgts” uz „70 min ieslēgts/60 min izslēgts” neatkarīgi no piesārņojuma intensitātes, ir pieaudzis elektroenerģijas patēriņš – izmaksas pieaugušas no aptuveni ~7040 LVL uz ~12000 LVL.

Analītiskā izteiksme, kas nosaka elektroenerģijas patēriņa pieaugumu, ir darba un paužu laika sprīžu attiecība. Izmantojot Preiļu NAI datus, aprēķinātais pieaugums ir sekojošs:

$$\left(\frac{70}{60+70}\right) \cdot \left(\frac{2}{4+2}\right)^{-1} - 1 = 0.615$$

Tātad var secināt, ka enerģijas patēriņa pieaugums, pārejot uz jauno darbības režīmu, ir 61.5% (11,400 LVL), pie tam nav zināms, kāda ir regulēšanas kvalitāte.

Simulācijas rezultāti rāda arī to, ka ieviešot programvadības sistēmu, elektroenerģijas patēriņš vēl pieaugs (5.4.tabula). Tajā pašā laikā apskābekļošanas kvalitāte būtiski uzlabosies (no  $C_{rms}=3.055 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  uz  $C_{rms}=2.045\pm 0.069 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Izvērtējot simulācijas rezultātus un pielietojot dažādus „Latvenergo” piedāvātos tarifu plānus industriāliem patērētājiem Preiļu NAI aerācijas kompresoru vadības sistēmai, var secināt, ka T7 tarifu plāns nav izdevīgs nevienā no modeļiem, jo izmaksas visos modeļos ir augstākas nekā citos tarifu plānos.

Tarifu plānu T8 var izmantot NAIS, ja tiek izmantots visvienkāršākais un nekvalitatīvākais režīms, t.i., aerācijas kompresora nepārtrauktas darbības režīms.

Tajā pašā laikā, ieviešot automātisko programvadību ar PID/kvaziinvarianto vadību, elektroenerģijas izmaksas kļūst līdzvērtīgas esošajām izmaksām, toties aerācijas kvalitāte būtiski uzlabojas, tāpēc NAIS automātiskās vadības princips kopā ar standarta tarifu plānu T6, (skat 5.pielikumu), ir optimāls piedāvājums Preiļu NAI kvalitatīvai un ekonomiskai vadībai.

## 5.nodaļas kopsavilkums un secinājumi

1. Optimāla aerācijas kompresora vadības algoritma izvēle ir būtiska, lai nodrošinātu gan atbilstošu notekūdeņu attīrīšanas kvalitāti, gan minimizētu izmaksas, kas saistītas ar enerģijas patēriņu.
2. Tā kā aerācijas kompresoru vadībai Latvijā izmanto atšķirīgas vadības sistēmas, to ietekmes uz aerācijas procesu aerācijas tvertnē modelēšanai izveidots virtuāls NAIS modelis, kurš ievērtē sezonālās ietekmi uz notekūdeņu piesārņojuma intensitāti.
3. Simulācijas procesā vērtējot regulēšanas kvalitāti ar vidējās kvadrātiskās vērtības un vidējās kvadrātiskās kļūdas metodēm, tika konstatēts, ka visaugstāko kvalitāti nodrošina PID/kvaziinvariantās vadības sistēma ( $\Delta C_{rms}=0.069 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).
4. Simulācijā tika konstatēts, ka aerācijas tvertne reaģē uz piesārņojuma un tam atbilstošās aerācijas kompresora ražīguma izmaiņām kā dinamisks nestacionārs nelineārs objekts. Tvertnes jutības rādītāja  $K_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.1 līdz 0.95 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) $\cdot$ ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ), tvertnes inerces rādītāja  $T_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 30 līdz 95 min, slodzes jutības rādītāja  $K_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.03 līdz 0.095 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) $\cdot$ ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ), un slodzes inerces rādītāja  $T_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 3 līdz 30 min, turklāt izmaiņu diapazoni dažādiem

vadības principiem atšķirās. Vadības principi ar augstāku vadības kvalitāti uzrādīja šaurākus jutības un inerces rādītāju izmaiņas diapazonus.

5. NAI operatīvo izmaksu bilances analīze un ekstrapolācija Latvijas apstākļiem uzrāda paaugstinātu enerģijas izmaksu daļu ekonomiski enerģētiskajā bilancē – enerģijas izmaksas sasniedz 54%, kas atbilst elektroenerģijas izmaksu proporcijai Preiļu NAI energobilancē (dažādos gados 50..70% no kopējām izmaksām).
6. Izmaksu struktūras analīze apstiprina atziņu, ka uzdevums veikt NAI aerācijas inženiersistēmu optimizāciju ir gan tehniski, gan ekonomiski pamatots, jo aerācijai tiek tērēti līdz pat 80% no kopējā elektroenerģijas patēriņa.
7. Automātiskās vadības modelēšanas sistēmai pievienojot ekonomiskās efektivitātes bloku, radās iespēja novērtēt dažādu automātiskās vadības principu pielietošanas izmaksas, piemērojot dažādus elektroenerģijas tarifus (T6, T7 un T8). Labākos rezultātus (zemākās izmaksas un augstāko aerācijas kvalitāti) uzrādīja PID/kvaziinvariantās vadības princips ar T6 tarifu (11755 LVL gadā), kas uzskatāms par optimālu risinājumu modelī izmantotajai notekūdeņu aerācijas inženiersistēmai.
8. PID/kvaziinvariantās vadības principa ieviešana un atbilstoša tarifa izmantošana Preiļu notekūdeņu attīrīšanas ietaišu aerācijas kompresoru vadībā dos 4221 LVL ekonomiju gadā, un būtiski uzlabotu attīrīšanas kvalitāti – tiks sasniegta nepieciešamā skābekļa koncentrācija ar minimālu novirzi  $C=2\pm 0.069 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $\pm 3.45\%$ ).

## Conclusions

1. Optimal choice of air blower control principle is essential in order to establish optimal balance between wastewater treatment quality and energy expenses.
2. Air blower control systems used in Latvia WWTS differ substantially – open (no feedback) and closed (with feedback from aerotank). Virtual wastewater aeration system model, which takes in account daily seasonal fluctuations of wastewater pollution intensity, was developed, and the most commonly used air blower control systems were tested on it.
3. Control quality was measured using root mean square and root mean square error methods. Simulation results revealed that the highest control quality was achieved by using PID/quasiinvariant control system ( $\Delta C_{rms}=0.069 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Only PID control system with specially adjusted parameters was able to get close to the best result ( $\Delta C_{rms}=0.071 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).
4. Simulation revealed also that aerotank response to pollution and air blower operation fluctuations was nonlinear, unsteady and dynamic. Aerotank sensitivity indicator  $K_a$  variation range was between 0.1 and 0.95  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , aerotank inertia indicator  $T_a$  variation range was between 30 and 95 min, perturbation sensitivity indicator  $K_q$  variation range was between 0.03 and 0.095  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , and perturbation inertia indicator  $T_q$  variation range was between 3 and 30 min, with different variation ranges for different types of air blower control. Control systems with higher control quality had narrower sensitivity and inertia indicators variation ranges.
5. Analysis and extrapolation of WWTS operational expenses in Latvia reveal substantially increased proportion of costs for electricity – they reach 54% of total annual operational expenses. These data fit into the data array of Preiļi WWTS annual expenses (energy costs variation is between 50 and 70% – small differences for different years).

6. Analysis of WWTS cost structure confirms the statement, that optimization of wastewater aeration system is technically and economically important task, because up to 80% of all electricity consumption is being used for aeration.
7. Special economic efficiency subblock taking in account different tariffs for electricity in Latvia (T6, T7 and T8 in particular) and allowing to calculate annual expenses during control system simulation process was added to aerotank control simulation model. Simulation revealed that under pollution seasonality which is common in municipalities, best economical results (as well as the highest control quality) were presented by PID/quasiinvariant control system using tariff T6 (total annual energy costs 11755 LVL) – the optimal solution for particular (Preiļi municipality) WWTS.
8. Installation of PID/quasiinvariant control system in Preiļi municipality WWTS together with tariff T6 use will decrease annual electricity expenses by 4221 LVL, and substantially increase wastewater treatment quality – dissolved oxygen concentration in aeration tank is kept at necessary level  $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  with small fluctuations ( $\text{SD}=\pm 0.069 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) which accounts to only  $\pm 3.45\%$ .



## SECINĀJUMI

1. Latvijas notekūdeņu attīrīšanas ietaišu operatīvo datu analīzes rezultātā konstatēta būtiska tehnoloģisko procesu modernizācijas ietekme uz notekūdeņu attīrīšanas ietaišu energoefektivitāti – modernizētām notekūdeņu attīrīšanas ietaišēm īpatnējais enerģijas patēriņš ir par 38.9% zemāks ( $M=0.50 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $SD=0.075 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ).
2. Analītiskie pētījumi pierāda, ka notekūdeņu pieplūdei un enerģijas patēriņam to apstrādei Latvijas notekūdeņu attīrīšanas ietaišēs ir izteikts sezonāls raksturs, ko ietekmē gan vides temperatūra, gan nokrišņu daudzums, gan arī cilvēku aktivitātes cikliskums (diennaktī (6..8 stundas), nedēļā (darbadienu/brīvdien cikls), gadā (4, 6, 12 mēneši)).
3. Autora izveidotā inoatīvā analītiskā izteiksme un datorsimulācijas modelis skābekļa šķīdībai ūdenī atšķirībā no iepriekš zināmajām ietver sevī ne tikai ūdens temperatūras un aerācijas tvertnes konstruktīvo parametru ietekmi, bet arī atmosfēras gaisa spiediena un skābekļa koncentrācijas ietekmi, kā arī notekūdeņu sāļainības ietekmi. Simulācijas rezultātu salīdzinājums ar eksperimentālo pētījumu datiem apstiprina iegūtās analītiskās sakarības atbilstību kompleksajiem skābekļa šķīdības procesiem aerācijas tvertnē.
4. Analītiskie pētījumi apstiprina hipotēzi par notekūdeņu aerācijas tvertnes funkcionālo atbilstību nestacionāram objektam ar mainīgiem inerces un jutības rādītājiem. Nestacionaritāti nosaka kompleksais skābekļa šķīšanas process kopā ar mainīgiem aerācijas tvertnes un piesārņojuma inerces un jutības rādītājiem. Notekūdeņu piesārņojuma  $q$  izmaiņas ietekmē aerācijas tvertnes jutības rādītāju  $K_a$  un slodzes inerces rādītāju  $T_q$ . Aerācijas kompresoru ražīguma  $L_g$  izmaiņas ietekmē tvertnes inerces rādītāju  $T_a$  un slodzes jutības rādītāju  $K_q$ .
5. Promocijas darbā izstrādātais inoatīvais aerācijas tvertnes datorsimulācijas modelis ļauj risināt tiešā veidā analītiski neatrisināmu pārvades funkcijas vienādojumu sistēmu, kas apraksta aerācijas tvertnes un slodzes inerces un jutības rādītāju izmaiņas un mijiedarbību, tādējādi radot iespēju modelēt aerācijas tvertnē notiekošos procesus, un pārbaudīt dažādu vadības principu darbību. Regulējošās iedarbes un slodzes jutības un inerces rādītāji šajā modelī tiek nepārtraukti pārreķināti un ievadīti pārvades diferenciālvienādojumu sistēmā.
6. Simulācijā konstatēts, ka aerācijas tvertne reaģē uz piesārņojuma un tam atbilstošā aerācijas kopresora ražīguma izmaiņām kā nestacionārs nelineārs objekts. Preiļu notekūdeņu aerācijas tvertnes simulācijā pie mainīga mazpilsētai raksturīga diennakts piesārņojuma tvertnes jutības rādītāja  $K_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.1 līdz 0.95  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , tvertnes inerces rādītāja  $T_a$  izmaiņas diapazons bija robežās no 30 līdz 95 min, slodzes jutības rādītāja  $K_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 0.03 līdz 0.095  $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$ , un slodzes inerces rādītāja  $T_q$  izmaiņas diapazons bija robežās no 3 līdz 30 min, pie tam izmaiņu diapazoni dažādiem vadības principiem atšķirās. Vadības principi ar augstāku vadības kvalitāti uzrādīja šaurākus jutības un inerces rādītāju izmaiņas diapazonus.
7. Eksperimentālie pētījumi parāda būtisku atšķirību starp aerācijas tvertnes inerces rādītāju skaitliskām vērtībām pie dažādām slodzēm un notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas darba režīmiem (aerācijas tvertnes laika konstantes vērtība pie ieslēgta aerācijas kompresora ir 2.01 – 2.76 reizes lielāka nekā pie izslēgta aerācijas kompresora). Šādas atšķirības raksturīgas nestacionāriem nelineāriem objektiem.

8. Aerācijas tvertnes datorsimulācijas modeļa un eksperimentālo datu salīdzinošie pētījumi uzrāda ciešu sakarību ( $R^2 > 0.997$ ), un apstiprina tā atbilstību aerācijas tvertnē notiekošiem procesiem. Tādējādi apstiprinās hipotēze par notekūdeņu aerācijas tvertnes funkcionālo atbilstību nestacionāram objektam.
9. Analītiski pierādīts, ka aerācijas kvalitāti un energoefektivitāti būtiski ietekmē aerācijas tvertnes konstruktīvie parametri – tvertnes dziļums, aerācijas difuzoru skaits un tips, kā arī gaisa plūsmas intensitāte caur tiem. Aerācijas difuzoru iegremdēšanas dziļuma palielināšana no 4 m līdz 6 m dod kopējā elektroenerģijas patēriņa samazinājumu par 3.2 % gadā. Optimāla aerācijas difuzoru izvēle un to skaita palielinājums rada līdz pat 4%, bet gaisa plūsmas intensitātes samazinājums caur difuzoriem rada līdz pat 3% elektroenerģijas patēriņa samazinājumu.
10. Iegūtās likumsakarības un analītiskās izteiksmes, kā arī simulācijas modeļi ļauj pamatot enerģiju taupošas notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas konstruktīvos risinājumus, izstrādāt katrai šādai sistēmai pielāgotu adaptīvas automātiskās vadības principu, pamatot tai atbilstošu elektroenerģijas izmantošanas tarifu plānu, kas nodrošinās energoefektīvu, ekonomiski un tehniski optimālu darbības režīmu notekūdeņu attīrīšanas sistēmās Latvijas mazpilsētās, tādējādi nodrošinot NAI darbības optimizāciju.
11. Apstiprinās hipotēze par to, ka notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas kā nestacionāra tehnoloģiska objekta vadībai un optimālai darbībai nepieciešama kvalitatīvi iestatīta adaptīva automātiskā programvadība. Promocijas darba izpildes laikā izveidotais notekūdeņu aerācijas sistēmas kombinētās PID/kvaziinvariantās vadības princips paaugstina aerācijas kvalitāti mainīgos vides apstākļos, dodot iespēju paaugstināt sistēmas energoefektivitātes rādītājus. Tā ieviešana un atbilstoša tarifa izmantošana Preiļu notekūdeņu attīrīšanas ietaišu aerācijas kompresoru vadībā dos 4221 LVL ekonomiju gadā, un būtiski uzlabotu regulēšanas kvalitāti – tiks sasniegta nepieciešamā skābekļa koncentrācija ar minimālu novirzi  $C=2\pm 0.069 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $\pm 3.45\%$ ).

## INFORMĀCIJAS AVOTI

1. AAS (Aqua Aerobic Systems, Inc.) Aeration and Mixing. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) <http://www.aqua-aerobic.com/aquaJet.asp>
2. Acme (Acme Air Equipment Company PVT). Twin Lobe Roots Blower & Exhauster, (tiešsaiste) (skatīts 25.07.2010) Pieejams: [http://www.acmeairequipments.com/twin\\_lobe\\_roots\\_blower\\_exhauster.html](http://www.acmeairequipments.com/twin_lobe_roots_blower_exhauster.html)
3. Ahmad A.H. Water Quality Cycle – Reflection of Activities of Nature and Man (tiešsaiste) (skatīts 26.05.2010) <https://info.ngwa.org/GWOL/pdf/740600482.PDF>
4. Andreadakis, A., Mamais, D., Gavalaki E., Panagiotopoulou V. (2003) Evaluation Of Treatment Schemes Appropriate For Wastewater Reuse In Greece. *Global Nest: the International Journal*. Vol 5, No 1, pp 1–8.
5. Asano, T. and Levine, A.D. (1998) Wastewater reclamation, recycling, and reuse: an introduction. **In:** Asano, T. (ed.) *Water Quality Management Library 10, Wastewater Reclamation and Reuse*. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania, 1998, pp. 1–56.
6. Balmér, P., Book, K., Hultman, B., Jönsson, H., Kärrman, E., Levlin, E., Palm, O., Schönning, C., Seger, A., Stark, K., Söderberg, H., Tideström, H. and Åberg, H. (2002) System för återanvändning av fosfor ur avlopp. *Naturvårdsverket Rapport 5221*. (tiešsaiste) (skatīts 21.03.2008) Pieejams: [www2.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/JPS10s19.pdf](http://www2.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/JPS10s19.pdf)
7. Beckermills Inc. *Product list 2007* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://beckermills.com/bk/fountains.asp?jl=1>
8. BIO2 International inc. USA. *Are Oxygen Levels Changing?* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: [http://www.o2zone4life.com/earth\\_article.html](http://www.o2zone4life.com/earth_article.html)
9. Bluejay, M. *How much electricity costs, and how they charge you* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://michaelbluejay.com/electricity/cost.html>
10. Bolles S.A. (2011) *Modeling wastewater aeration systems to discover energy savings*. Process Energy Services, LLC. (tiešsaiste) (skatīts 26.01.2011) Pieejams: <http://www.processenergy.com/Aeration%20Paper.pdf>
11. Borchardt, D. and Statzner, B. (1990) Ecological impact of urban stormwater runoff studied in experimental flumes: population loss by drift and availability of refugial space. *Aquatic Sciences* 52: 299–314
12. Borglund A.M. *Bio-P-processen: Frågor och svar*. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.kappala.se/admin/varor/docs/Bio-P-processen.pdf>
13. Boyd, C. E. (1995) Deep water installation of a diffused-air aeration system in a shallow pond. *Journal of Applied Aquaculture*. Vol. 5. No. 1.
14. Boyd, C. E. and Ahmad, T. (1987) Evaluation of aerators for channel catfish farming. *Bulletin 584, 1987. Alabama Agricultural Experiment Station*. Auburn University (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.fish.wa.gov.au/docs/aq/aq020/index.php?0404>
15. Boyles, W. (1997) *The Science of Chemical Oxygen Demand Bluebook*. Hach Company. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.belajar.usd.ac.id/createpdf.php?id=55>
16. Broecker W.S., Peng T.H. (1982) Tracers in the sea. Eldigio Press, Lamont-Doherty Geological. Observatory, Palisades, New York, 690 p.
17. California Energy Commission (CEC). *California's Water-Energy Relationship. November 2005*. (tiešsaiste) (skatīts 24.04.2010) Pieejams:

- <http://www.energy.ca.gov/2005publications/CEC-700-2005-011/CEC-700-005-011-SF.PDF>
18. Carns, K. (2005). Bringing Energy Efficiency to the Water & Wastewater Industry: How Do We Get There? **In:** *WEFTEC 2005 Proceedings* (tiešsaiste) (skatīts 22.08.2008) Pieejams: <http://www.aceee.org/industry/carns.pdf>
  19. CEE (Consortium for Energy Efficiency) *Municipal Water/Wastewater, presentation made by T.Jones.* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.cee1.org/cee/mtg/01-07ppt/tjones-2.pdf>
  20. Chambers, P.A., M. Allard, S.L. Walker, J. Marsalek, J. Lawrence, M. Servos, J. Busnarda, K.S. Munger, K. Adare, C. Jefferson, R.A. Kent, and M.P. Wong. (1997). Impacts of municipal wastewater effluents on Canadian waters: a review. *Water Quality Research Journal of Canada* 32(4): 1997., pp. 659–713.
  21. Chen, J., Yu, T., Ongley, E. (2006) Influence of high levels of total suspended solids on measurement of COD and BOD in the Yellow River, China. *Environmental monitoring and assessment.* 2006, vol. 116, no1–3, pp. 321–334. (tiešsaiste) (skatīts 22.08.2008) Pieejams: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=17997987>
  22. Chon, C. H., Shek-Kui, C. and Hojae, S. (2007) Effect of Chlorine on Biological Nutrient Removal from Wastewater. *Journal of applied Sciences in Sanitation, Volume 2, Number 3:* 85–92, September–December, 2007, (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.trisanita.org/asespaper/ases13v2n3y2007.pdf>
  23. CIESE(Stevens Institute of Technology, Center for Innovation in Engineering and Science Education) (2008) *Biological Oxygen Demand.* (tiešsaiste) (skatīts 20.01.2008) Pieejams: <http://www.ciese.org/curriculum/dipproj2/en/fieldbook/bod.shtml>
  24. Ciner, F., Sarioglu, M. (2006) Determination Of Inert Chemical Oxygen Demand (Cod) Fractions Of Cumhuriyet University Wastewater. *Global NEST Journal, Vol 8, No 1,* pp 31–36, 2006, (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: [www.gnest.org/Journal/Vol8\\_No1.asp](http://www.gnest.org/Journal/Vol8_No1.asp)
  25. Colby. *Solubility of Oxygen in Water.* (tiešsaiste) (skatīts 20.01.2006) Pieejams: <http://www.colby.edu/chemistry/CH331/O2%20Solubility.html>
  26. Colt, J. (1984). Computation of dissolved gas concentrations in water as functions of temperature, salinity, and pressure. *American Fisheries Society, Special Publication.* No. 14. 154 pp.
  27. Croft, A., Davison, R., Hargraves, M. (2001) *Engineering Mathematics. A Foundation for Electronics, Electrical, Communications and Systems Engineers, 3rd ed.* Marlow: Plarson Education Ltd. 969 p.
  28. Derenzo, S. (2003) *Practical Interfacing in the Laboratory Using a PC for Instrumentation, Data Analysis, and Control.* (tiešsaiste) (skatīts 20.01.2009) Pieejams: <http://www.pinoycode.com/PdfAndChmBooks.aspx>
  29. Dignac, M.F., Ginestet, P., Rybacki, D., Bruchet, A., Urbain, V., Scribe, P. (2000), Fate of wastewater organic pollution during activated sludge treatment: nature of residual organic matter, *Water Research, Volume 34, Issue 17,* December 2000, p. 4185–4194
  30. Dohse, R., Heywood, A. *The activated sludge process.* (tiešsaiste) (skatīts 06.02.2006) Pieejams: <http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/gwprimer/group12/index.htm>
  31. Droste, R.L. (1997) Theory and practice of water and wastewater treatment. John Wiley and Sons. New York. 800 pp.

32. Dzelzītis E. (2005) *Siltuma, gāzes un ūdens inženiersistēmu automatizācijas pamati*. Rīga: Gandrs. 325 lpp.
33. EC (European Council) Directive: Energy end–use efficiency and energy services Directive and repealing Council Directive 93/76/EEC 2006/32/EC, *Official Journal of the European Communities*, L 114/64, 27.04.2006.
34. EC (European Council) Directive: Urban Waste Water Treatment Directive 91/271/EEC, *Official Journal of the European Communities*, L135/40–52, 30 May 1991. (tiešsaiste) (skatīts 24.02.2008) Pieejams: (<http://europa.eu.int/comm/environment/water/water-urbanwaste/directiv.html>)
35. EC (European Council) Directive: Urban Waste Water Treatment Directive 98/15/EEC amending directive 91/271/EEC, *Official Journal of the European Communities*, L 67/30, 07 March 1998.
36. ECB (European Chemical Bureau) *Testing Methods: C.6. Degradation – chemical oxygen demand* (tiešsaiste) (skatīts 24.02.2008) Pieejams: <http://ecb.jrc.cec.eu.int/documents/Testing-Methods/ANNEXV/C06web1992.pdf>
37. Eckenfelder, W.W. and Grau, P. (1998) *The Activated Sludge Process Design and Control: Theory and Practice* (2nd edition). **In:** *Water Quality Management Library – Volume 1*, edited by W. W. Eckenfelder and P. Grau. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA, USA.
38. EEA (European Environment Agency) (2001) *Water. Indicators: Biological oxygen demand in rivers*. (tiešsaiste) (skatīts 24.02.2008) Pieejams: [http://themes.eea.europa.eu/Specific\\_media/water/indicators/bod](http://themes.eea.europa.eu/Specific_media/water/indicators/bod)
39. EK (Eiropas Komisijas) Direktīva 92/69/EEK, *EK Oficiālais Vēstnesis* L 383 , 29.12.1992. 0113 – 0115 lpp.
40. Ekama, G. A., Marais, G.v.R., and Siebritz, I. P. (1984). Biological excess phosphorus removal. pp. 7–1 .. 7–32. **In:** *Theory, Design, and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Processes*. Water Research Commission, Pretoria, South Africa.
41. Engle, C.R. (1977) *Economics of aeration*. Issued in furtherance of Extension work, Act of September 29, 1977, in cooperation with the U.S. Department of Agriculture. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.uaex.edu/aquaculture2/FSA/FSA9065.htm>
42. Environment Canada (2000) *Canadian Environmental Protection Act Priority Substances List assessment report: ammonia in the aquatic environment*. Environment Canada and Health Canada. 2000. 100 pp.
43. Environmental Dynamics. *Converting Coarse Bubble to Fine Bubble, Technical Bulletin* 105, (tiešsaiste) (skatīts 24.02.2008) <http://www.wastewater.com/pdf/105.pdf>
44. Environmet Canada (1996) *The state of municipal wastewater effluents in Canada (State of the environment report), Indicators and Assessment*. Office Environmental Conservation Service, Environment Canada. (tiešsaiste) (skatīts 04.02.2008) Pieejams: <http://www.ec.gc.ca/publications/ED03E31E-8A4E-4934-96B1-0A3697410588/StateOfMunicipalWastewaterEffluentsInCanada.pdf>
45. Environmet Canada (2002) *Municipal wastewater sources and characteristics, 2002* (tiešsaiste) (skatīts 06.04.2008) Pieejams: <http://www.atl.ec.gc.ca/epb/issues/wstewtr.html>
46. FAO (Food and Agriculture organiation of United Nations). *Site selection for aquaculture: chemical properties of water*. (tiešsaiste) (skatīts 06.04.2006) Pieejams: <http://www.fao.org/docrep/field/003/AC183E/AC183E04.htm>

47. Fattal, F., Lampert, Y. and Shuval, H. (2004) A Fresh Look at Microbial Guidelines for Wastewater Irrigation in Agriculture: A Risk–assessment and Cost–effectiveness Approach. **In: *Wastewater Use In Irrigated Agriculture – Confronting the Livelihood and Environmental Realities* Edited by C. Scott, N. I. Faruqui, and L. Raschid** (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.idrc.ca/openbooks/112-4/>
48. Ferrer, J. (1998) Energy saving in the aeration process by fuzzy logic control, *Water Science Technologies*, Vol.38, No. 3, 1998, pp. 209 – 217.
49. Flygt AB (2010) *Diffused Aeratio Design Guide* (tiešsaiste) (skatīts 01.02.2010) Pieejams: [www.flygt.ru/1260868.pdf](http://www.flygt.ru/1260868.pdf)
50. Foster, S. (2000) *Efficient Wastewater Treatment – The field for analytical and monitoring equipment* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://eco-web.com/editorial/01759.html>
51. Garcia, H.E., Gordon, L.I. (1992) *Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations. Limnology and Oceanography*, 37(6), 1992, pp1307–1312. (tiešsaiste) (skatīts 29.07.2006) Pieejams: [http://www.aslo.org/lo/toc/vol\\_37/issue\\_6/1307.pdf](http://www.aslo.org/lo/toc/vol_37/issue_6/1307.pdf)
52. *Green Facts Glossary* (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.greenfacts.org/glossary/abc/activated-sludge.htm>
53. Guender, B. (2000) *The Membrane Coupled Activated Sludge Process in Municipal Wastewater Treatment*. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 47/11, pp. 1627–1633.
54. Gut, L., Plaza, E. and Hultman, B. (2005) Integration and optimisation of urban sanitation systems. **In: *Proceedings of Polish–Swedish seminars, Cracow March 17–18, 2005***. (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/>
55. Haimi, H. et al. *Advanced operation and control methods of municipal wastewater treatment processes in Finland*. Helsinki University of Technology Water and Wastewater Engineering department. (tiešsaiste) (skatīts 25.04.2010) Pieejams: [http://civil.tkk.fi/fi/julkaisut/haimi\\_ica.pdf](http://civil.tkk.fi/fi/julkaisut/haimi_ica.pdf)
56. Han, K.G. (2002) *Fundamentals of aquaous metallurgy*. p76. (tiešsaiste) (skatīts 25.04.2009) Pieejams: [http://books.google.lv/books?id=jv1W8Q5i\\_MEC&pg=PA76&dq=Han+solubility&cd=3](http://books.google.lv/books?id=jv1W8Q5i_MEC&pg=PA76&dq=Han+solubility&cd=3)
57. Harremoes, P. (1988) Stochastic models for estimation of extreme pollution from urban runoff. *Water Research* 22, 1988.: pp.1017–1026
58. Haugen, F. (1997) *Modeling and Control of Dynamic Systems*. Skien, Norway: Control Consult, 1997, 242 p.
59. Horner, R.R., Skupien, J.J., Livingston, E.H., and Shaver, H.E. (1994) *Fundamentals of urban runoff management: technical and institutional issues*. Terrene Institute, Washington, D.C.
60. Howard I., Espigares E., Lardelli P., Martín J. L. and Espigares M. (2004) Evaluation of microbiological and physicochemical indicators for wastewater treatment. *Environmental Toxicology* 19 (3) 241–249
61. Hubbard, G. (2010) *Considerations when specifying and purchasing a screw compressor*. (tiešsaiste) (skatīts 29.09.2010) Pieejams: <http://info.aerzenusa.com/Blog/bid/21856/Right-sizing-Aeration-Blowers-in-Waste-Water-Treatment-Plants>
62. Hultman, B. and Löwén, M. (1997) *Advanced Wastewater Treatment*. Report No.2 **In: *Proceedings of a Polish–Swedish seminar, KTH, Stockholm, May 30,***

1997. (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/>
63. Hultman, B., Levlin, E., Plaza, E. and Stark, K. (2003) Phosphorus recovery from sludge in Sweden – possibilities to meet proposed goals in an efficient, sustainable and economical way, Report No. 10 **In:** *Proceedings of a Polish–Swedish seminar, Gdansk, 23–25, March 2003.* (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/>
  64. Hvitved–Jacobsen, T. (1982). The impact of combined sewer overflows on the dissolved oxygen concentration of a river. *Water Research* 16:1099–1105
  65. Hvitved–Jacobsen, T. (1986). Conventional pollutant impacts on receiving waters. **In:** H.C. Torno, J. Marsalek, and M. Desbordes (eds.), *Urban runoff pollution. Series G: Ecological Sciences*, Vol. 10. Springer–Verlag, Berlin. pp. 345–378
  66. Ingildsen, P., Jeppsson, U., Olsson, G. (2002) Dissolved oxygen controller based on on–line measurements of ammonium combining feed–forward and feedback. *Water Science Technologies*, 2002; 45(4–5):pp.453–460.
  67. Ingildsen, P., Olsson, G., Yuan, Z. (2001) A Hedging Point Strategy – Balancing Effluent Quality, Economy and Robustness in the Control of Wastewater Plants **In:** *Proceedings ICA 2001* Vol. 2 , Malmo, Sweden, pp. 449–456, June 3–7, 2001.
  68. IPCC (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, USA, 2001. 398 pp. (tiešsaiste) (skatīts 24.02.2008) Pieejams: ([http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/vol4/english](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/english)).
  69. Jensen, G.L., Bankston, J.D. and Jensen, J.W. (1989). Pond aeration: types and uses of aeration equipment. *Southern Regional Aquaculture Center Publication No. 371.* 4p.
  70. Jorgensen, S. E.(1994) *Fundamentals of Ecological Modeling, 2nd ed.* Amsterdam: Elsevier Science B.V.,1994, 663 p.
  71. Juhna, T. *Inženiersistēmu mikrobioloģija* (tiešsaiste) (skatīts 23.08.2008) <http://www.bf.rtu.lv/documents/edu/im4.pdf?bf=aeadece13f8954b09613e8b2cb711e2>
  72. Kayes, T. *Pond Aeration.* (tiešsaiste) (skatīts 24.02.2008) Pieejams: <http://aquanic.org/publicat/state/il–in/ces/kayes.pdf>
  73. Keeling, R., McEvoy, E., Manning, A. *Atmospheric oxygen concentrations at Alert Station in relation to the global carbon cycle. Canadian Baseline Program: Summary of Progress to 1998.* (tiešsaiste) (skatīts 22.02.2010) Pieejams: [https://bluemoon.ucsd.edu/publications/ralph/26\\_Alert.pdf](https://bluemoon.ucsd.edu/publications/ralph/26_Alert.pdf)
  74. Kiely, G. (1997) *Environmental engineering technologies.*, McGraw–Hill, 979 p
  75. Laizāns, A., Osadčuks, V., Šnīders, A. (2008) System analysis of oxygen transfer in wastewater aeration tank. **In:** *Proceedings of INMATEH 2008 – II "Engineering And Management Of Sustainable Development In Agriculture, Transport And Food Industry "*, International scientific conference, July 18–19, 2008, Bucharest, Romania, pp. 132–137
  76. Laizāns, A., Šnīders, A. (2008) Simulation of cost–efficient wastewater aeration control using invariant control principle. **In:** *INMATEH 2008 – I "Agriculture and Engineering – complying with the European requirements"*, International scientific conference proceedings, January 28–29, 2008, Bucharest, Romania, pp. 183–188.

77. Laizāns, A., Šnīders, A., Greivulis, J. (2009) *Notekūdeņu aerācijas kvaziinvarintās vadības sistēma*. Latvijas Republikas patents Nr.13998 (patenta publikācijas datums 20.11.2009)
78. Latvenergo (2011) (tiešsaiste) (skatīts 07.01.2011), [http://www.latvenergo.lv/portal/page?\\_pageid=73,57222&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.latvenergo.lv/portal/page?_pageid=73,57222&_dad=portal&_schema=PORTAL)
79. Latvenergo (2011). (tiešsaiste) (skatīts 03.02.2011) pieejams:[http://www.latvenergo.lv/pls/portal/docs/PAGE/LATVIAN/FILES/Elektroenerģijas\\_tarifu\\_uzbuve\\_apreķinasanas\\_principi.pdf](http://www.latvenergo.lv/pls/portal/docs/PAGE/LATVIAN/FILES/Elektroenerģijas_tarifu_uzbuve_apreķinasanas_principi.pdf)
80. Latvijas Banka, Valūtu kurss, 2003.gada 31.decembris, (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.bank.lv/lat/main/all/finfo/notvalkur/?vdate=20031226>
81. Latvijas Banka, Valūtu kurss, 2007.gada 31.decembris, (tiešsaiste) (skatīts 25.04.2010) Pieejams: <http://www.bank.lv/lat/main/all/finfo/notvalkur/?vdate=20071231>
82. Lekov, A. et al. (2009) *Opportunities for Energy Efficiency and Open Automated Demand Response in Wastewater Treatment Facilities in California – Phase I Report*. April 2009 (tiešsaiste) (skatīts 24.02.2010) Pieejams: [www.osti.gov/bridge/servlets/purl/973570-a8NTFc/](http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/973570-a8NTFc/)
83. Lenntech (Lenntech Water treatment & air purification Holding B.V.) *Phosphorous removal from wastewater* (tiešsaiste) (skatīts 24.02.2008) Pieejams: <http://www.lenntech.com/phosphorous-removal.htm>
84. LETA *Laikraksts: elektroenerģijas cenas Lietuvā pēc Ignalinas ASE slēgšanas varētu celties par 40%*. 01.02.2008, (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.delfi.lv/archive/indeh.php?id=20153089>
85. Lijklema, L., Tyson, J.M. and Lesouf, A. (1993). Interactions between sewers, treatment plants and receiving waters in urban areas: a summary of the INTERURBA '92 workshop conclusions. *Water Science and Technology* 27:1–29
86. Low, E.W., Chase, H.A. (1999) The effect of maintenance energy requirements on biomass production during wastewater treatment. *Water Research*, Volume 33, Issue 3, February 1999, Pages 847–853.
87. Low, E.W., Chase, H.A., Milner, M.G. and Curtis, T.P. (2000) Uncoupling of metabolism to reduce biomass production in the activated sludge process. *Water Research*, Volume 34, Issue 12, 15 August 2000, Pages 3204–3212
88. LR Centrālā Statistikas pārvalde (CSP), datu bāze. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) pieejams: <http://data.csb.gov.lv>
89. LR Ekonomikas ministrija, (tiešsaiste) (skatīts 16.09.2007) [http://www.em.gov.lv/em/images/modules/items/item\\_file\\_12911\\_emzino\\_241104\\_sez.doc](http://www.em.gov.lv/em/images/modules/items/item_file_12911_emzino_241104_sez.doc)
90. LR MK (2004) (Ministru kabinets) *Rīcības programma komunālo notekūdeņu un bīstamo vielu radītā virszemes ūdeņu piesārņojuma samazināšanai (apstiprināta ar MK 2004.gada 31.marta rīkojumu Nr.181)* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2007) pieejams: [www.vidm.gov.lv/lat/likumdosana/normativie\\_akti/files/text/Likumd/udens//r181\\_2004.doc](http://www.vidm.gov.lv/lat/likumdosana/normativie_akti/files/text/Likumd/udens//r181_2004.doc)
91. LR MK (2007) (Ministru kabinets) *Noteikumi Nr.59, Grozījumi Ministru kabineta 2002.gada 22.janvāra noteikumos Nr.34 "Noteikumi par piesārņojošo vielu emisiju ūdenī"* Rīga, 16.01.2007. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.likumi.lv/doc.php?mode=DOC&id=151642>



92. LR Vides ministrija. *Nacionālā programma Eiropas Reģionālās Attīstības fonda apguvei „Ūdenssaimniecības infrastruktūras attīstība apdzīvotās vietās ar iedzīvotāju skaitu līdz 2000”*, (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) pieejams: [http://www.vidm.gov.lv/lat/finansu\\_instrumenti/kohez/files/text/finansu\\_instrumenti/koh\\_f/nac\\_prog\\_2007\\_2013//NP\\_Mudeni.pdf](http://www.vidm.gov.lv/lat/finansu_instrumenti/kohez/files/text/finansu_instrumenti/koh_f/nac_prog_2007_2013//NP_Mudeni.pdf)
93. LRNAP (Latvijas Republikas Nacionālās attīstības plāns) *Ietekmes uz vidi stratēģiskā novērtējuma VIDES PĀRSKATS Nacionālajam attīstības plānam 2007. – 2013. gadam.* (tiešsaiste) (skatīts 16.04.2008) Pieejams [www.nap.lv/in\\_site/tools/download.php?file=files/text/NAP\\_SIVN\\_II-Final.pdf](http://www.nap.lv/in_site/tools/download.php?file=files/text/NAP_SIVN_II-Final.pdf)
94. LVĢMA (2004) (Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūra), *Komunālo notekūdeņu novadīšana un notekūdeņu dūņu izvietošana Latvijā, 2004.* (tiešsaiste) (skatīts 16.09.2007) Pieejams: [http://www.meteo.lv/upload\\_file/Profesionala\\_informacija/UWWTD\\_article16\\_zinojums2006.pdf](http://www.meteo.lv/upload_file/Profesionala_informacija/UWWTD_article16_zinojums2006.pdf)
95. LVĢMA (2006)a (Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūra), Valsts statistiskā pārskata Nr.2–ūdens veidlapas aizpildīšanas norādījumos lietotie termini, 2006. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: [http://www.meteo.lv/upload\\_file/veidlapas/Definicijas\\_termini\\_2Udens\\_2006.pdf](http://www.meteo.lv/upload_file/veidlapas/Definicijas_termini_2Udens_2006.pdf)
96. LVĢMA (2006)b (Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūra), *Ilgspējīgas attīstības indikatoru pārskats 2006.* (tiešsaiste) (skatīts 16.09.2007) Pieejams: <http://www.meteo.lv/public/28671.html>
97. LVĢMA (Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas aģentūra) *Laika apstākļi gada laikā.* (tiešsaiste) (skatīts 21.04.2010) Pieejams: <http://www.meteo.lv/public/30111.html>
98. Mack, P. *Dissolved Oxygen and the three S* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://illinois.sierraclub.org/RPG/reports/do1.pdf>
99. Malmqvist, P.A. and Palmquist, H. (2005) Decision support tools for urban water and wastewater systems – Focusing on hazardous flows assessment. *Water Science & Technology*, 51(8): 2005. pp.41–50.
100. Martijn, E.J. and Huibers, F.P. (2001) Use of Treated Wastewater in Irrigated Agriculture. *Coretech Working Document WP4-1*. Irrigation and Water Engineering Group, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2001, 34 pp.
101. Meck Norm. (1996) *Dissolved Oxygen* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2007) Pieejams: [http://www.vcnet.com/koi\\_net/do.html](http://www.vcnet.com/koi_net/do.html)
102. Metcalf and Eddy Inc. (ed.) (1995) *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. McGraw–Hill, New York, 1819 pp
103. Methanol Institute. *Wastewater Treatment With Methanol Denitrification* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.methanol.org/pdf/wastewater.pdf>
104. Mijangos, J. *Sewerage System Breakdown–3rd Main Pipe Wastewater Control Plan*. United Nations Environment Programme Workshop On Sustainable Wastewater And Stormwater Management. (tiešsaiste) (skatīts 21.11.2007) Pieejams: [http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/DPGC/File/tercer\\_claoca\\_maxima.pdf](http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/DPGC/File/tercer_claoca_maxima.pdf)
105. Ministry of Environment and Energy (MOEE). (1998) *Water management policies guidelines: provincial water quality objectives of the Ministry of Environment and Energy. Revised October 1998.* (tiešsaiste) (skatīts 24.03.2008) Pieejams: [www.ene.gov.on.ca/envision/gp/3303e.pdf](http://www.ene.gov.on.ca/envision/gp/3303e.pdf)

106. Mitchell, C. (2007) *Get over „Poo Taboo” – ekspert warns* (tiešsaiste) (skatīts 11.03.2008) Pieejams: <http://www.newsroom.uts.edu.au/news/detail.cfm?ItemId=8158>
107. Moiseeva, N.I. (1995) Decreased oxygen content in the atmosphere—an ecological disaster imperceptibly sneaking up? *Aviakosmicheskaia I Ekologicheskaia Meditsina = Aerospace And Environmental Medicine*, Vol. 29 (3), pp. 52-5.
108. Mueller, J.A., Boyle, W.C., Pöpel, H.J. (2002). *Aeration: principles and practice*. (Water Quality Management Library). CRC press. Boca Raton, USA. 353 pp.
109. Mulder, J.W., Rensink, J.H. (1987). Introduction of biological phosphorus removal to an activated sludge plant with practical limitations, *Biological Phosphate Removal from Wastewaters*. In: *Advances in Water Pollution Control* R.Ramadori (ed.) Pergamon, England, 213–223.
110. National Oceanic and Atmosphere administration (NOAA). *US Department of Commerce* (tiešsaiste) (skatīts 12.03.2010) Pieejams: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/programs/coop/scripps/o2/o2.html>
111. Naturgerechte Technologien, Bau- und Wirtschaftsberatung TBW GmbH, Frankfurt, Germany. (2001) *Anaerobic methods of municipal wastewater treatment, technical information*. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.gtz.de/gate/gateid.afp>
112. Olsson, G., Nielsen, M., Zuan, Y. Lunggard – Jensen A. (2005) *Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems*. London: IWA Publishing, 2005, 264 p.
113. Olsson. G., Newell. B. (1999) *Wastewater Treatment Systems – Modelling, Diagnosis and Control*. IWA Ppublishing, 1999, 750 p.
114. OPTEK (2008) *Wastewater BOD Reduction*. (tiešsaiste) (skatīts 24.03.2008) Pieejams: [http://www.optek.com/Application\\_Note/General/English/2/Wastewater\\_BOD\\_Reduction.asp](http://www.optek.com/Application_Note/General/English/2/Wastewater_BOD_Reduction.asp)
115. Park, J.K., Whang, L.M., Novotny, G. (2001) Biological phosphorus removal potential test. *Water Environment Resources*, May-Jun, 2001;73(3): 374-382.
116. PG&E (2003) (Pacific Gas and Electric Co.) *Municipal wastewater treatment plant energy baseline study, PG&E new construction energy management program*. June 2003. 43 p. (tiešsaiste) (skatīts 24.03.2008) Pieejams: <http://www.cee1.org/ind/mot-sys/ww/pgel.pdf>
117. Pollard, P.C., Greenfield, P.F. (1997) Measuring in situ bacterial specific growth rates and population dynamics in wastewater. *Water Research*, 1997, vol. 31, No.5, pp. 1074–1082, (tiešsaiste) (skatīts 24.03.2008) Pieejams: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2657726>
118. Pons, M.N., Spanjers, H., Baetens, D., Nowak, O., Gillot, S., Nouwen, J., Schuttinga, N. (2004), *Wastewater Characteristics in Europe – A Survey*. *European Water Management Online Official Publication of the European Water Association (EWA)*, 2004, (tiešsaiste) (skatīts 24.03.2008) Pieejams: [http://www.ewaonline.de/journal/2004\\_04.pdf](http://www.ewaonline.de/journal/2004_04.pdf)
119. Princetown University studies. *The distribution of O2 in air*. (tiešsaiste) (skatīts 15.02.2010) Pieejams: [http://geoweb.princeton.edu/people/bender/lab/research\\_o2n2.html](http://geoweb.princeton.edu/people/bender/lab/research_o2n2.html)
120. Randall, C.W., Barnard, J.L., and Stensel, H.D. (1992) *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal*. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA

121. Reardon, D.J. (1995). Turning down the power. *Civil Engineering—ASCE*, Vol. 65, No. 8, August 1995, pp.54–56.
122. Rosen, C., Larsson, M., Jeppsson, U., Yuan, Z. (2002) A framework for extreme-event control in wastewater treatment. *Water Science & Technology*, Vol. 45, No. 4–5, 2002, pp. 299–308.
123. Rosen, C., Olsson, G. (1998) Disturbance detection in wastewater treatment plants”, *Water Science & Technology*, Vol. 32, No. 2, 1998, pp. 197–205.
124. Rybicki, S. (1997) Phosphorus removal from wastewater, A Literature Review. *Advanced Wastewater Treatment, Report No. 1*, Joint Polish – Swedish Reports, 1997. (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/>
125. Sawyer, C.N. and McCarty, P.L. (1978). *Chemistry for Environmental Engineering, 3rd Edition*. McGraw–Hill Book Company, NY. 532 pp.
126. Schramm, A., Santegoeds, C.M., Nielsen, H.K., Ploug, H., Wagner, M., Pribyl, M., Wanner, J., Amann, R., and De Beer, D. (1999) On the Occurrence of Anoxic Microniches, Denitrification, and Sulfate Reduction in Aerated Activated Sludge. *Applied and Environmental Microbiology*, September 1999, p. 4189–4196, Vol. 65, No. 9, (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://aem.asm.org/cgi/content/full/65/9/4189>
127. Schueler, T.R. (1987). Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs. Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, Washington, D.C. 364 pp.
128. Scott, C., Faruqui, N.I., Rashid, L. (2004) *Wastewater Use In Irrigated Agriculture – Confronting the Livelihood and Environmental Realities*. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.idrc.ca/openbooks/112-4/>
129. Sedlak, R., ed. (1991). *Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater. 2nd ed.* Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA. 256 pp.
130. Siemens AG. *Providing answers to wastewater aeration market* (tiešsaiste) (skatīts 15.04.2010) Pieejams: [http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/compression/special-applications/aeration/E50001-G420-A116-X-4A00%20Applicationbroschure\\_LR.pdf](http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/compression/special-applications/aeration/E50001-G420-A116-X-4A00%20Applicationbroschure_LR.pdf)
131. Sincero, A.P, Sincero, G.A. (2002) *Physical–chemical treatment of water and wastewater*. IWA Publishing. 784 p.
132. Smith R. *Total energy consumption for municipal wastewater treatment*. NASA STI. (tiešsaiste) (skatīts 26.06.2008) Pieejams: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1978STIN...7915439S>
133. Smith, C.A., Corripio, A.B. (1997) *Principles and Practice of Automatic Process Control, 2nd ed.* New York: John Willey & Sons, 1997. 768 p.
134. Sniders, A. (2004) Feedback & Feedforward control of wastewater aeration. **In:** Proceedings of the International Conference “Advanced technologies for energy producing and effective utilization”, Jelgava, pp. 124–129, June 2004.
135. Sniders, A. (1997) Static indices of wastewater pneumatic aeration. **In:** Proceedings of the Latvia Univ. of Agric. Jelgava, vol. (8), 1997, pp. 43–47.
136. Šnīders, A. (2003) Notekūdeņu aerācijas iekārtas pārejas procesa modelēšana. **No:** 4. Starptautiskās konferences “Vide. Tehnoloģija. Resursi” materiāli. – Rēzekne, Rēzeknes Augstskola, 26.–28.06.2003. 268.–274.lpp.
137. Šnīders, A., Laizāns, A. (2006) Invariant Control of Wastewater aeration. **In:** *Proceedings of 1st International Internet Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering CISSE – 05 (Computer, Information and*

- System Sciences and Education*) „Advances in systems, computing sciences and software engineering”, University of Bridgeport Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Springer Publ. 2005–2006, pp.99–103.
138. Šnīders, A., Laizāns, A. (2006) Main conditions of wastewater aeration unit design parameters. **In:** *Engineering for rural development: Proceedings of the 5th International scientific conference*. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava 2006.
  139. Šnīders, A., Laizāns, A. (2007) Computer aided modelling of wastewater aeration systems. **In:** *Proceedings of the 3rd International Conference “Rural development”*, Book 2, Kaunas, November 8–10, 2007, pp. 227–231.
  140. Šnīders, A., Laizāns, A. (2007) Oxygen transfer process simulation in wastewater aeration tank. **In:** *Engineering for rural development: Proceedings of the 6th International scientific conference*. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava, 2007.
  141. Šnīders, A., Leščevics, P. (2004) Enerģijas ietaupījuma aspekti tehnoloģiskajās iekārtās ar regulējamu elektrisko piedziņu. **No:** *Starptautiskās zinātniskās konferences “Modernas tehnoloģijas enerģijas ieguvei un efektīvai izmantošanai” Rakstu krājums.*– Jelgava: LLU, 2004, 118.–123.lpp.
  142. Sniders, A., Skrastins, U. (1995) Identification of the aeration tank as the object of oxygen transfer under static regime. **In:** *Proceedings of the Latvia University of Agriculture*. Jelgava, Vol. 2 (279), 1995, pp. 79–85.
  143. Sniders, A., Straume, I. (2005) Energy Saving Possibilities in Wastewater Treatment. **In:** *Proceedings of The International Scientific Conference “Agricultural Engineering Problems”*. Jelgava: LUA, June 2 –3, 2005, pp. 113 – 117.
  144. Sniders, A. (1997) The Expenditure of Electrical Energy for Communal sewage purification. **In:** *Baltic Electrical Engineering review*, Vilnius, No.2 (6), 1997. pp. 29–32.
  145. Sotirakou, E., Kladitis, G., Diamantis, N., Grigoropoulou, H.(1999) Ammonia And Phosphorus Removal. *Global Nest: The International Journal*, Vol. 1, No. 1, pp.47–53, 1999. (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: [http://www.gnest.org/Journal/Vol1\\_No1/Sotirakou.pdf](http://www.gnest.org/Journal/Vol1_No1/Sotirakou.pdf)
  146. Spellman, F. (2009) *Handbook of water and wastewater treatment plant operations*. CRC Press/Taylor & Francis, 2009. 826 p.
  147. SPRK (2003) (Sabiedrisko Pakalpojumu Regulēšanas komisija) (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) pieejams: <http://www.sprk.gov.lv/index.php?id=3175&sadala=285>
  148. SSI (2005) (Stamford Scientific International) *Diffused Aeration Oxygen Transfer Tests, Barcelona, 2005*. (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: [http://www.stamfordscientific.com/images/SSIREPORT2005\\_2.pdf](http://www.stamfordscientific.com/images/SSIREPORT2005_2.pdf)
  149. Stark, K. (2004) Phosphorus recovery from sewage sludge – Experiences from European countries, Report no. 12 **In:** *Proceedings of Polish–Swedish seminars, Stockholm June 6–8, 2004* (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/>
  150. Stark, K. (2005). Sustainability in solid waste and sludge handling – Source separation or end-of pipe solutions. **In:** *Proceedings of Polish–Swedish seminar, Krakow, 17–18 March 2005. Integration and Optimisation of Urban Sanitation Systems. Final Report No 12*, (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/>

151. Stone Inc. (2005) *Decentralized Wastewater System Reliability Analysis Handbook, June 2005* (tiešsaiste) (skatīts 25.04.2010) Pieejams: <http://www.ndwrcdp.org/userfiles/WUHT0357.pdf>
152. SuperchargerOnline. (2002) *Roots Type Superchargers Explained, 2002.* (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.superchargersonline.com/content.asp?id=22>
153. Szatkowska, B., Trela, J., and Plaza, E. (2005) Partial nitritation/anammox and CANON – Nitrogen removal systems followed by conductivity measurements Report no. 13 **In: Proceedings of Polish–Swedish seminars, Cracow March 17–18, 2005.** (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/>
154. Tchobanoglous, G., Franklin, L.B., Stensel, D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.* 4th edition. McGraw–Hill Professional, pp. 1578
155. ThermExcel (2003) *Physical properties of water* (tiešsaiste) (skatīts 25.04.2010) Pieejams: [http://www.thermexcel.com/english/tables/eau\\_atm.htm](http://www.thermexcel.com/english/tables/eau_atm.htm)
156. Thompson, L., Song, K., Lekov, A. *Automated Demand Response Opportunities in Wastewater Treatment Facilities.* (tiešsaiste) (skatīts 25.04.2010) Pieejams: [www.drrc.lbl.gov/pubs/lbnl-1244e.pdf](http://www.drrc.lbl.gov/pubs/lbnl-1244e.pdf)
157. Tilgalis, Ē. (2004) *Notekūdeņu savākšana un attīrīšana.* Jelgava, 2004, 240 lpp.
158. Tromans, D. (2000) Modeling Oxygen Solubility in Water and Electrolyte Solutions. *Industrial and Engineering Chemistry Research.* 2000, 39 (3), pp 805–812.
159. Truesdale, G.A., Downing, A.L. (1954) Solubility of Oxygen in Water. *Nature* 173, pp.1236 (26 June 1954).
160. UNDP (2010) (United Nations Development Programme). *Global Human Development Report 2010.* (tiešsaiste) (skatīts 25.02.2011) Pieejams: [http://hdr.undp.org/en/media/HDR\\_2010\\_EN\\_Complete\\_reprint.pdf](http://hdr.undp.org/en/media/HDR_2010_EN_Complete_reprint.pdf)
161. UNESCO (UNESCO/WMO) *International Glossary Of Hydrology* (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/aglo.htm>
162. *US Department of Health and Family services (USDHF)* (tiešsaiste) (skatīts 25.04.2010) Pieejams: [www.acf.hhs.gov/programs/ocs/liheap/guidance/SMI75FY09.pdf](http://www.acf.hhs.gov/programs/ocs/liheap/guidance/SMI75FY09.pdf)
163. *US Energy Information Agency report (USEIA).* (2010). tiešsaiste) (skatīts 25.04.2010) Pieejams: [http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epm/table5\\_6\\_a.html](http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epm/table5_6_a.html)
164. USEPA/USAID (1992) (United States Environmental Protection Agency/United States Agency for International Development). *Guidelines for Water Reuse United States Environmental Protection Agency* (Technical Report no. 81), Washington, DC., 252 pp.
165. USEPA/USAID (2002) (United States Environmental Protection Agency/United States Agency for International Development). *Wastewater Technology Fact Sheet: Fine bubble aeration* (tiešsaiste) (skatīts 15.02.2008) Pieejams: [http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002\\_06\\_28\\_mtb\\_fine.pdf](http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_fine.pdf)
166. USGS (United States Geological Survey). *Eutropication* (tiešsaiste) (skatīts 29.04.2008) Pieejams: <http://toxics.usgs.gov/definitions/eutrophication.html>
167. Van der Hoek, W. (2004) A Framework for a Global Assessment of the Extent of Wastewater Irrigation: The Need for a Common Wastewater Typology. **In: C.Scott, N.I.Faruqui, L.Raschid (eds.) Wastewater Use in Irrigated Agriculture: Confronting the Livelihood and Environmental Realities, IWMI-IDRC-CABI, Wallingford, p. 11-24**
168. Vesilind, A.P. (2003) *Wastewater treatment plant design.* IWA Publishing, 2003 – 512 p.

169. Wang, L.K. , Yung–Tse, H., and Shammas, N.K. (2007) Fine Pore Aeration of Water and Wastewater. *Advanced Physicochemical Treatment Technologies*, Volume 5, Humana Press 2007, p 391–448
170. Water Planet. *Nitrogen Removal from Wastewater: Nitrogen Chemistry*. (tiešsaiste) (skatīts 29.03.2008) Pieejams: <http://www.thewaterplanetcompany.com/docs/10pdf/Nitrogen%20Chemistry.pdf>
171. Weiss, R.F. (1970) The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* Volume 17, Issue 4, August 1970, Pages 721–735
172. Welch, E.B. (1992) *Ecological effects of wastewater: Applied limnology and pollutant effects*. 2nd edition. Chapman and Hall, New York, N.Y. 1992. 425 pp
173. Wenzel, M.C., Ekama, G.A. (1997) Principles in the design of single sludge activated sludge systems for biological removal of carbon, nitrogen and phosphorus. **In:** *La dephosphatation des eaux usees*, Ed. CEBEDOC, Belgium, 1997, p 13–26
174. Wenzel, M.C., Ekama, G.A., Loewenthal R.E. (2003) Fundamentals of biological behaviour and wastewater strength tests. **In:** *The handbook of Water and Wastewater Microbiology*. Academic Press, London, 2003. p 145–173
175. Westcot, D. W. (1997) Quality control of wastewater for irrigated crop production. *Water Report* , No. 10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 86 pp, 1997.
176. WETTA (Water Energy Technology Team). *Promoting Energy Efficiency in Water and Wastewater Treatment* (tiešsaiste) (skatīts 22.08.2008) Pieejams: <http://water-energy.lbl.gov/node/23>
177. WHO (1989) (World Health Organization). Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. *Report of a World Health Organization Scientific Group, WHO Technical Report Series 778*. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 74 pp.
178. WHO (2000) (World Health Organization) and UNICEF (United Nations International Children’s Education Fund). *Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report* (tiešsaiste) (skatīts 26.08.2007) Pieejams: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/jmp2000.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp2000.pdf)
179. Wos, M.L.(2005) Methods For Understanding Bacterial Metabolic Activity **In:** *Activated Sludge, Ph.D.thesis*, Griffith University (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www4.gu.edu.au:8080/adt-root/public/adt-QGU20061031.151641/index.html>
180. WWF (World Water Forum). (2003) “*Poo taboo*” slows progress on world sanitation (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://www.abc.net.au/science/news/stories/2003/809480.htm>
181. Wyban, J.A., Pruder, G.D., and Leber, K.D. (1989). Paddlewheel effects shrimp growth in commercial earthen ponds. *Journal of the World Aquaculture Society*. Vol 20. No. 1.
182. YSI. *Oxygen Solubility Table*. (tiešsaiste) (skatīts 21.03.2007) Pieejams: <http://www.ysi.com/media/pdfs/DO-Oxygen-Solubility-Table.pdf>
183. Zipper, T., Fleishmann, N., Haberl, R. (1998) Development of a new system for control and optimization of small wastewater treatment plants using oxidation – reduction potencial. *Water Science and Technology*, Vol.38, No. 3, 1998, pp. 307– 314.

184. Волков, И.К., Зуев, С.М., Цветкова, Г.М. (2000) Случайные процессы: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 448 с.
185. Горяинов, В.Б., Павлов, И.В., Цветкова, Г.М., и др. (2001) Математическая статистика Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 424 с.
186. Гройсман, А. Ш., Хомутов, Н. Е. (1990) Растворимость кислорода в растворах электролитов. *Успехи химии*, 1990, Том 59, Номер 8, с. 1217–1250 (tiešsaiste) (skatīts 25.02.2010) Pieejams: [http://www.uspkhim.ru/php/authorize.phtml?jrnid=rc&paperid=3550&year\\_id=1990](http://www.uspkhim.ru/php/authorize.phtml?jrnid=rc&paperid=3550&year_id=1990)
187. Дьяконов, В., Абраменкова, И. (2002) MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник Питер, 2002. 608с с.
188. Дьяконов, В.П. (2008) Simulink 5/6/7 самоучитель. ДМК Пресс. 2008. 784 с.
189. Мануйлов, А. В., Родионов, В. И. Основы химии. Электронный учебник. (tiešsaiste) (skatīts 25.02.2008) Pieejams:<http://www.hemi.nsu.ru/ucheb161.htm>
190. Поршнева, С. В. (2003) Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. Горячая Линия – Телеком. 2003. 592 с.
191. Тюрин, Ю., Макаров, А. (2003) Анализ данных на компьютере. Инфра–М, 2003. 544 с.
192. Черных, И.В. (2008) Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. Питер, 2008. 290 с.
193. Шнидерс, А.А., Лайзанс, А.Д. (2008) Нестационарная модель переноса кислорода в аэротенке биологической очистки сточных вод. **В: Высокие Технологии, Фундаментальные И Прикладные Исследования, Образование** Том 13, Сборник трудов, Под редакцией А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко, 5.Международная конференция "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности", Ст.Петербург, Россия, Апрель 2008., pp. 384–386
194. Шнидерс, А. (2002) Моделирование и энергоэкономное управление системой аэрации сточных вод. **В: Труды 3-ей Международной научно-практической конференции "Экология и сельскохозяйственная техника"**. Санкт–Петербург: НИИМЭСХСЗ, 2002, С. 294–302.

## **PIELIKUMI**



1.pielikums

**Gulbenes NAI elektroenerģijas patēriņš, kWh, un attīrītie notekūdeņi, m<sup>3</sup>**

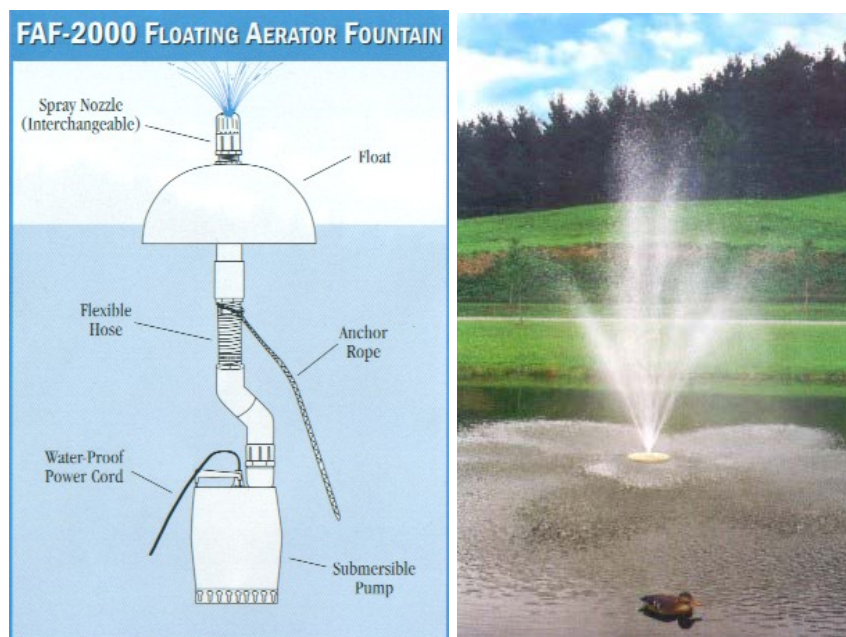
	2003.gads		2004.gads		2005.gads		2006.gads		2007.gads	
	Elektroenerģija kWh	Notekūdeņi m <sup>3</sup>	Elektroenerģija kWh	Notekūdeņi m <sup>3</sup>	Elektroenerģija kWh	Notekūdeņi m <sup>3</sup>	Elektroenerģija kWh	Notekūdeņi m <sup>3</sup>	Elektroenerģija kWh	Notekūdeņi m <sup>3</sup>
Janvāris	17 440	25 730	19 000	28680	16 120	46 110	21 087	23 070	20 698	62 850
Februāris	16 240	20 070	16 480	39 120	17 360	20 370	19 310	17 450	19 770	25 010
Marts	18 080	39 250	16 360	65 220	19 240	26 680	16 178	26 900	17 878	63 510
Aprīlis	14 520	46 570	12 840	39 020	17 760	47 520	17 114	42 210	14 151	40 800
Maijs	13 040	50 070	12 360	30 960	17 440	45 950	21 378	33 780	19 366	48 570
Jūnijs	13 120	33 020	11 880	45 500	13 920	30 750	18 889	29 830	14 354	31 670
Jūlijs	14 120	41 760	15 440	36 110	14 240	25 040	18 432	20 920	16 851	35 060
Augusts	13 440	36 090	13 600	34 680	13 760	45 200	17 373	29 660	14 606	28 870
Septembris	13 640	30 850	13 400	40 140	14 120	26 910	12 382	31 850	14 184	30 170
Oktobris	14 960	36 400	14 360	40 200	13 560	25 860	13 770	36 859	16 204	47 320
Novembris	16 040	54 360	15 800	43 690	14 480	26 970	19 230	44 640	16 440	50 760
Decembris	17 360	50 160	18 760	50 870	19 120	27 230	16 066	44 860	16 533	57 010
<b>Kopā:</b>	<b>182 000</b>	<b>464 330</b>	<b>180 280</b>	<b>494 190</b>	<b>191 120</b>	<b>394 590</b>	<b>211 209</b>	<b>382 029</b>	<b>201 035</b>	<b>521 600</b>

2.pielikums



**1.att Augšējās rotācijas aeratori (Paddlewheel aerator) (Wyban, 1989)**

## 2.pielikums (turpinājums)

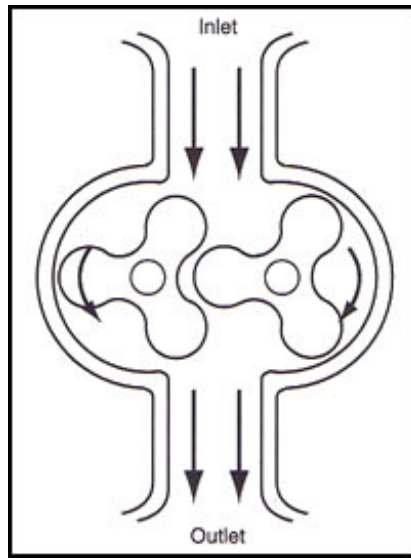


**2.att. Strūklakas tipa aeratori (Beckermills, 2008)**

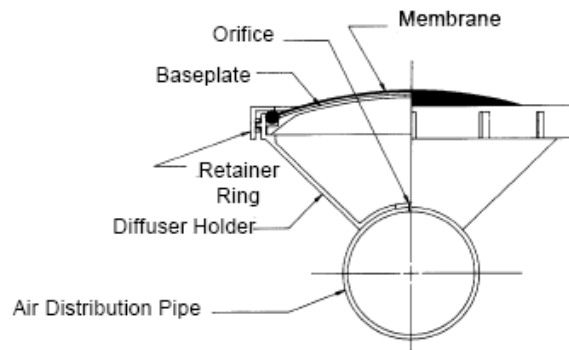


**3.att. Mehāniskie rotācijas aspiratori (AAS, 1989)**

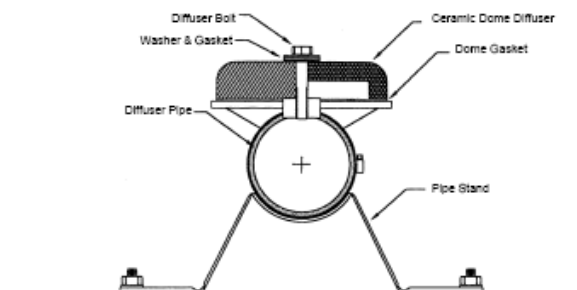
2.pielikums (turpinājums)



**4.att. Divu rotoru Rüttsa tipa gaisa kompresora darbības principiālā shēma (SuperchargersOnline, 2002)**



a) Membrane Disc Diffuser



b) Dome Diffuser Assembly

**5.att. Membrānas un keramiskie diska difuzori (USEPA 1999)**

2.pielikums (turpinājums)



**6.att. Membrānas tipa difuzora darbība ((USEPA 1999 )**



**7.att. Difuzoru tīkls aerācijas tvertnē (Environmental Dynamics)**

### 3.pielikums

Matlab komandrinda notekūdeņu sezonālītātes analīzei ar Furjē analīzes metodi

```
load('notudGulbene.dat')
month=notudGulbene(:,1);
relNums=notudGulbene(:,2);
Y = fft(relNums);
Y(1)=();
n=length(Y);
power = abs(Y(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period=1./freq;
bar(period,power);
axis((2 13 0 14));
ylabel('Furjē magnitūda');
xlabel('Period (mēn.)')
```

## 4.pielikums

**Meteoroloģiskie dati – mēneša vidējās temperatūras un nokrišņi Latvijā, 2003.–2010.g.g (autora kompilācija no [www.meteo.lv](http://www.meteo.lv))**

.	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		Vidēji ilgstoši	
	nokrišņi, mm	temp, C	nokrišņi, mm	temp, C	nokrišņi, mm	temp, C	nokrišņi, mm	temp, C	nokrišņi, mm	temp, C	nokrišņi, mm	temp, C	nokrišņi, mm	temp, C	nokrišņi, mm	temp, C	nokrišņi, mm	temp, C
Janvāris	37	-5.1	21	-6.2	46	-0.5	15	-5.8	100	0.5	50	-1	48	-2.1	21	-11.5	40	-10
Februāris	10	5.6	46	-2.6	17	-5.6	20	-7	30	-8	48	1.8	31	-4	45	-5.6	30	-5
Marts	11	0	52	0.3	23	-4.9	30	-3.9	27	4.3	70	1.7	50	0	42	-0.8	32	-1.7
Aprīlis	43	3.5	10	6	18	5.6	26	5.6	26	6	46	7.2	6	7	29	6	39	4.6
Maijs	50	12	37	10.1	78	10.6	38	11	65	12.2	19	10.7	22	11.2			49	10.6
Jūnijs	93	14	66	13.5	38	14.3	54	16	56	16.6	60	14.6	108	14			62	14.6
Jūlijs	68	19.7	72	19.8	70	16.3	20	18.8	112	19.3	64	16.5	111	17.4			78	16.6
Augusts	122	16.3	62	17.5	120	16.5	89	17	76	18	138	16.9	61	16			76	16
Septembris	30	12.2	73	12.7	43	13.6	47	14.3	79	11.8	35	11	67	13.6			72	11.6
Oktobris	72	4.5	88	7	43	7.3	76	9.6	88	7.2	110	8.7	113	5			65	6.7
Novembris	60	3.2	53	0.5	55	3.2	72	4	75	1.2	68	2.9	62	3.5			58	1.5
Decembris	30	1	58	1	52	-2.4	54	4.3	40	1.2	49	0	72	-3			49	-2.4

## 5.pielikums

### Prasības no apdzīvoto vietu attīrīšanas iekārtām emitētajiem notekūdeņiem attiecībā uz piesārņojuma komponentiem (LR MK noteikumi, 2007)

Nr. p.k.	Parametrs	Cilvēku ekvivalents	Koncentrācija vai attīrīšanas tehnoloģija	Piesārņojuma samazinājuma %
1.	Bioķīmiskais skābekļa patēriņš (BSP <sub>5</sub> ), ja temperatūra ir 20 °C (neveicot nitrifikāciju)	< 200	atbilstoša attīrīšana	–
		200–2000	atbilstoša attīrīšana	50–70
		2000–10000	25 mg/l	70–90
		> 10000	25 mg/l	70–90
2.	Ķīmiskais skābekļa patēriņš (ĶSP)	< 200	atbilstoša attīrīšana	–
		200–2000	atbilstoša attīrīšana	50–75
		2000–10000	125 mg/l	75
		> 10000	125 mg/l	75
3.	Suspendētās vielas – kopējais daudzums	līdz 10000	mazāk nekā 35 mg/l	90
		10000 un vairāk	mazāk nekā 35 mg/l	90
4.	Kopējais fosfors ( $P_{kop}$ )	< 2000	atbilstoša attīrīšana	–
		2000– 10000	atbilstoša attīrīšana	10–15
		10000–100000	2 mg/l	80
		>100000	1 mg/l	80
5.	Kopējais slāpeklis ( $N_{kop}$ )	< 2000	atbilstoša attīrīšana	–
		2000– 10000	atbilstoša attīrīšana	10–15
		10000–100000	15 mg/l	70–80
		>100000	10 mg/l	70–80

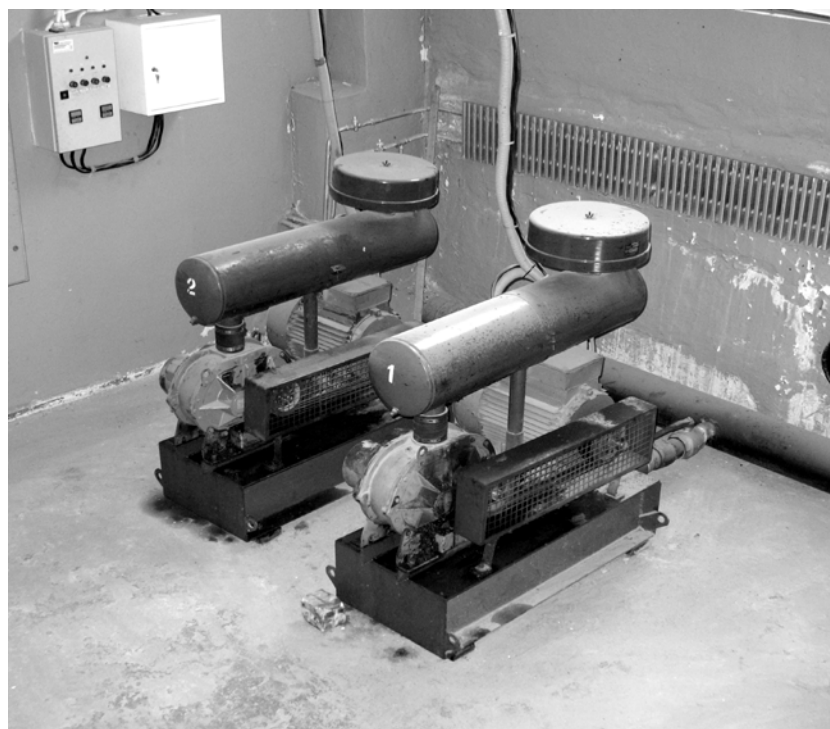


6.pielikums

Preiļu notekūdeņu attīrīšanas iekārtu attēli.



**1.att. Preiļu NAI aerācijas tvertne**

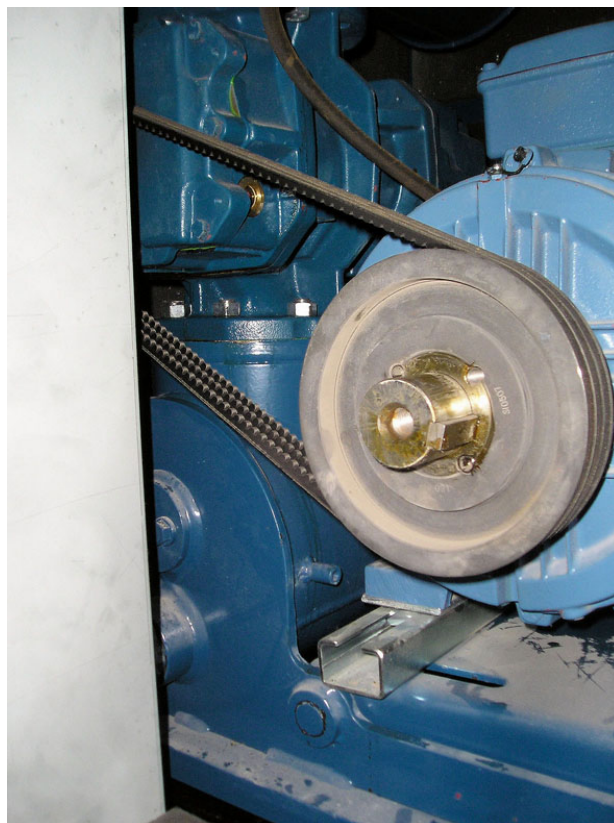


**2.att. Preiļu NAI aerācijas kompresori (pirms rekonstrukcijas, 2006.gads)**

6.pielikums (turpinājums)



**3.att. Pēc rekonstrukcijas uzstādītais Aerzen Inc. aerācijas kompresors  
Preiļu NAI, kopskats (2010.gads)**



**4.att. Aerzen Inc. aerācijas kompresora piedziņa –  
ķīļsiksnu pārvads (2010.gads)**

6.pielikums (turpinājums)



5.att. Aerzen Inc. aerācijas kompresora piedziņa – aerācijas kompresors (2010.gads)



6.att. Danfos VLT Aqua Drive vadības bloks ar frekvenču pārveidotāju(2010.gads)

## 7.pielikums

Elektroenerģijas tarifi industriālajam patērētājam – T6, T7 un T8, 2010.gads  
([http://www.latvenergo.lv/portal/page?\\_pageid=73,57222&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.latvenergo.lv/portal/page?_pageid=73,57222&_dad=portal&_schema=PORTAL))

T-6 (viena laika zona ar atļauto slodzi līdz 400 kW) 0,4 kV līnijas:

- abonēšanas maksa 12.12 LVL/gadā;
- maksa par elektroenerģiju 0.06694 LVL/kWh;
- maksa par ievadaizsardzības aparāta strāvas lielumu 1.92 LVL/A/gadā.

T-7 (divas laika zonas ar atļauto slodzi līdz 99,9 kW vai 200A) 0,4 kV līnijas:

- abonēšanas maksa 15 LVL/gadā;
- maksa par elektroenerģiju:
  - nakts zona un nedēļas nogale 0.06235 LVL/kWh;
  - dienas zona 0.07581 LVL/kWh.
- maksa par ievadaizsardzības aparāta strāvas lielumu 1.92 LVL/A/gadā

T-8 (trīs laika zonas, visas atļautās slodzes) 0,4 kV līnijas:

- abonēšanas maksa 15LVL/gadā;
- maksa par elektroenerģiju:
  - nakts zona un nedēļas nogale 0.05987 LVL/kWh;
  - maksimumstundās 0.08179 LVL/kWh;
  - dienas zona 0.07083LVL/kWh.
- maksa par ievadaizsardzības aparāta strāvas lielumu 1.92 LVL/A/gadā.

Laika zonas diferencēto tarifu lietošanai:

- 1) divu zonu tarifam (tarifs T-3, T-5, T-7, T-9):
  - a. dienas zona – darba dienās no plkst. 7:00 līdz 23:00,
  - b. nakts zona un nedēļas nogale – darba dienās no plkst. 23:00 līdz 7:00, sestdienās un svētdienās – visu diennakti.
- 2) trīs zonu tarifam (tarifs T-8):
  - a. dienas zona – darba dienās no plkst. 7:00 līdz 8:00, no 10:00 līdz 17:00, no 20:00 līdz 23:00,
  - b. maksimumstundu zona – darba dienās no plkst. 8:00 līdz 10:00 un no 17:00 līdz 20:00,
  - c. nakts zona un nedēļas nogale – darba dienās no plkst. 23:00 līdz 7:00, sestdienās un svētdienās – visu diennakti.