

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Andrius STYRA

PULSUOJANČIO SRAUTO EŽEKTORIAUS TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (T 009)

Vilnius Tech leidykla TECHNIKA, 2020

Disertacija rengta 2010–2020 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Vadovas

prof. habil. dr. Vladas VEKTERIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009) (2010–2014).

Moksliniai konsultantai

prof. habil. dr. Vladas VEKTERIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009) (2019–2020),

doc. dr. Artūras KILIKEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009) (2020).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Rimantas BELEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Nariai:

prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

doc. dr. Aušra MAŽEIKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004),

prof. habil. dr. Piotr VASILJEV (Vytauto Didžiojo universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

habil. dr. Sławomir WIERZBICKI (Varmijos ir Mozūrijos universitetas Olštynė, Lenkija, mechanikos inžinerija – T 009).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2020 m. lapričio 9 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel. (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2020 m. spalio 8 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilnius Tech talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilnius Tech leidyklos TECHNIKA 2020-035-M mokslo literatūros knyga

© Vilnius Tech leidykla TECHNIKA, 2020

© Andrius Styra, 2020

andrius.styra@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Andrius STYRA

INVESTIGATION OF PULSATING FLOW'S EJECTOR

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (T 009)

Vilnius Tech Press TECHNIKA, 2020

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2010–2020.

The dissertation is defended as an external work.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Vladas VEKTERIS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009) (2010–2014).

Scientific Consultants

Prof. Dr Habil. Vladas VEKTERIS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009) (2019–2020),

Assoc. Prof. Dr Artūras KILIKEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009) (2020).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Mechanical Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil. Rimantas BELEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

Members:

Prof. Dr Habil. Vytautas MARTINAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Assoc. Prof. Dr Aušra MAŽEIKIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004),

Prof. Dr Habil. Piotr VASILJEV (Vytautas Magnus University, Mechanical Engineering – T 009),

Dr Habil. Slawomir WIERZBICKI (University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland, Mechanical Engineering – T 009).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 9 November 2020**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 8 October 2020.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at Vilnius Tech repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas naujai sukurtas pulsuojančio srauto ežektorius, kuris gali būti naudojamas geležies junginiams iš vandens šalinti. Pagrindinis tyrimo objektas – naujai sukurtas optimalios mechaninės konstrukcijos pulsuojančio srauto ežektorius. Disertacijos tikslas – pritaikius pulsuojančio srauto ežektoriaus mechaninės konstrukcijos naujumą ir atsižvelgiant į atliktų pulsuojančio srauto kompleksinių teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatus, sukurti pulsuojančio srauto ežektorių, gebantį pagerinti bereagenčio geležies šalinimo iš vandens technologiją. Siekiant įgyvendinti tyrimų tikslą, buvo sprendžiami šie uždaviniai: atlikta mokslinės literatūros, kurioje nagrinėjamos ežektorių konstrukcijų charakteristikos ir juose vykstantys ežektuojamo srauto hidrodinaminiai procesai, analizė. Analitiškai ištirtos pulsuojančio srauto hidrodinaminių parametrų charakteristikos. Sukurtas pulsuojančio srauto ežektoriaus prototipas, pagrįstas akustinio lauko generavimu, ežektuojamam srautui susimaišant su darbinio skysčiu, kai kinta jų tekėjimo debitas. Eksperimentiškai ištirta sukurto pulsuojančio srauto ežektoriaus hidrodinaminių parametrų įtaka deguonies tirpumui vandenyje ir geležies koaguliavimui.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir keturi priedai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, pristatomas darbo aktualumas, aprašoma tyrimų metodika, nurodomas darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė ir ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema paskelbtos autoriaus publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra. Pirmajame skyriuje analizuojami pulsuojančią srautą generuojantys įrenginiai ir jų konstrukcijų analizė, procesai, vykstantys pulsuojančio srauto ežektoriuje. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pristatomi ežektoriaus generuojamo pulsuojančio srauto teoriniai ir analitiniai tyrimai.

Trečiajame skyriuje aprašomi pulsuojančio srauto ežektoriaus eksperimentiniai tyrimai, pateikta tyrimo metodika. Išsamiai išanalizuota generuojamų garso slėgio charakteristikų priklausomybė nuo akustinio lauko generatorių konstrukcijų. Įvertintas pulsuojančio srauto ežektoriuje vykstančių reakcijų efektyvumas.

Disertacijos tema paskelbtos devynios publikacijos: septynios – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, dvi – kituose leidiniuose. Išradimui „Pulsuojančio srauto ežektorius“ gautas Lietuvos patentas.

Abstract

The dissertation deals with a newly developed pulsating flow ejector that can be used to remove iron compounds from water. The main object of the research is a newly developed pulsating flow ejector of optimal mechanical design. The main goal of the dissertation is to create a pulsating flow ejector capable of improving the technology of beregent iron removal from water by applying the novelty of the mechanical construction of the pulsating flow ejector, taking into account the results of complex theoretical and experimental research of pulsating flow in the developed ejector. In order to achieve the goal of the research, the following tasks were solved: an analysis of the scientific literature on the characteristics of ejector structures and involved in ejection flow the hydrodynamic processes. Analytically investigated the pulsating flow of the hydrodynamic parameters characteristics. A prototype of a pulsating flow ejector has been developed based on the generation of an acoustic field in the ejected flow during mixing with the working fluid when their flow rate change. Was investigated experimentally created a pulsating flow ejector with influence of hydrodynamic parameters of oxygen solubility in water and iron coagulation.

The dissertation consists of an introduction, 3 chapters, general conclusions, references and four annexes.

The introductory chapter discusses the research problem, presents the relevance of the work, describes the research methodology, the scientific novelty of the work is indicated, practical significance of the work results and defensive statements. At the end of the introduction, the publications and reports published by the author on the topic of the dissertation and the structure of the dissertation are presented. The first chapter presents the pulsating flow generating devices and the analysis of their constructions, the processes involved in a pulsating flow ejector. At the end of the chapter, conclusions are formed and the tasks of the dissertation are specified.

The second chapter presents theoretical and analytical research of the pulsating flow generated by the ejector.

The third chapter describes the experimental research of the pulsating flow ejector and presents the research methodology. Analyzed in detail of generated sound pressure characteristics dependence of acoustic field generator designs. The efficiency of the reactions taking place in the pulsating flow ejector was evaluated.

Nine publications have been published on the topic of the dissertation: seven in peer – reviewed scientific journals, two – in other publications. A Lithuanian patent was obtained for the invention “Pulsed Flow Ejector”.

Žymėjimai

Simboliai

a – koeficientas dėl trinties įvertinantis tangentinio greičio sumažėjimą;
 B – talpos charakteringas parametras;
 c – garso greitis;
 Δd – slėgio pokytis;
 d – kameros diametras;
 e – vidinė energija;
 f – dažnis;
 F – jėga;
 f_μ – turbulencijos klampos faktorius;
 g – laisvo kritimo pagreitis;
 h – šiluminė entalpija;
 K – empirinis koeficientas;
 k – turbulencijos kinetinė energija;
 l – rezonansinės kameros gylis;
 Le – Lewis skaičius;
 P – vandens slėgis;

p_{ij} – įtempių tenzorius nuo slėgio ir klampos;
 p_1 – slėgis prieš kliūtį;
 p_2 – slėgis kavitacinės kavernos riboje;
 p_a – atmosferos slėgis deguonies tirpumo metu;
 p – vandens garų slėgis atsižvelgiant į temperatūrą;
 P_B – turbulencijos generavimas dėl plūdrumo jėgų;
 Pr – Prandtl'o skaičius;
 Q – dujų debitas;
 Q_s – vandens debitas;
 Q_f – faktinis tiekiamo oro kiekis;
 Q_h – vandens valandos debitas;
 q_i – difuzinis šilumos srautas;
 r – atstumas tarp atomų centrų;
 Re_{kr} – kritinis Reinoldso skaičius;
 r_j – atstumas tarp dalelių centrų j -oje fazėje;
 r_p – charakteringas atomo spindulys;
 St – Struchalio skaičius;
 Δt – laiko pokytis;
 t – laikas;
 u – greičio vektorius;
 $U(r)$ – Lenardo-Džonso potencialas;
 $U_{rel.}$ – dalelių santykinis greitis;
 v – dujų srauto greitis;
 W – garso galia;
 W_D – akustinio dipolio galia;
 W_K – akustinio kvadrupolio garso galia;
 W_M – akustinio monopolio garso galia;
 δ_{ij} – Kronekerio delta funkcija;
 ε – sąveikos energijos parametras;
 η – įsodinimo faktorius;
 μ – dinaminis klampos koeficientas;
 μ_t – turbulentinio sukuri klampos koeficientas;
 ρ – oro tankis;

ρ_p – dalelės tankis;
 τ_{ik} – klampios šlyties įtempimų tenzorius;
 ϕ – dalelės būsenos faktorius;
 $\phi(t)$ – fazė laiko atžvilgiu;
 ω – akustinis kampinis dažnis;
 $\omega\tau_p$ – akustinis Stokso skaičius.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	5
1. EŽEKTORIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ	7
1.1. Pulsuojantį srautą generuojantys įrenginiai ir jų konstrukcijų analizė	7
1.2. Procesai, vykstantys pulsuojančio srauto ežektoriuje	15
1.3. Geležies junginių sąveika vandenyje	21
1.4. Deguonies tirpumui įtaką darantys veiksniai	23
1.5. Akustinio lauko poveikis geležies junginių sąveikai	26
1.6. Pirmo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	28

2. EŽEKTORIAUS GENERUOJAMO PULSUOJANČIO SRAUTO TEORINIS TYRIMAS	29
2.1. Analitinis pulsuojančio srauto tyrimas	29
2.2. Pulsuojančio srauto modeliavimas	38
2.3. Antrojo skyriaus išvados.....	46
3. EKSPERIMENTINIAI EŽEKTORIŲ IR JO SRAUTŲ TYRIMAI	49
3.1. Ežektorių konstrukcijų lyginamasis eksperimentinis deguonies tirpumo skystyje tyrimas	50
3.2. Eksperimentinis akustinį lauką generuojančių ežektorių tyrimas.....	53
3.3. Akustinio lauko eksperimentinis tyrimas	60
3.4. Pulsuojančio srauto ežektoriaus eksperimentiniai tyrimai.....	64
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	73
BENDROSIOS IŠVADOS	75
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	77
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ...	83
SUMMARY IN ENGLISH	85
PRIEDAI ¹	99
A priedas. Patentas LT2013059. Pulsuojančio srauto ežektorius	100
B priedas. Modeliavimui naudojamos skysčio ir oro savybės.....	108
C priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	110
D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	111

¹ B, C, D priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	2
Aim of the thesis	3
Tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	3
Practical value of the research findings.....	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	4
Stucture of the dissertation.....	5
1. ANALYSIS OF EJECTORS RESEARCH	7
1.1. Pulsed flow generating devices and their design analysis.....	7
1.2. Processes in a pulsed ejector	15
1.3. Reacting a compounds of iron in the water.....	21
1.4. Factors affecting oxygen solubility	23
1.5. Effect of the acoustic field on the interaction of iron compounds	26
1.6. Conclusions of the first chapter and formulation of the tasks of the thesis.....	28

2. THEORETICAL INVESTIGATION OF EJECTOR GENERATION OF PULSATING FLOW	29
2.1. Analytical pulsed flow investigation.....	29
2.2. Pulse Flow Modeling	38
2.3. Conclusions of the second chapter	46
3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF EJECTORS AND FLOW'S	49
3.1. Comparative experimental investigation of oxygen solubility in liquid ejector structures	50
3.2. Experimental investigation on ejectors generating acoustic field	53
3.3. Experimental investigation on the acoustic field	60
3.4. Experimental research on pulsating ejector	64
3.5. Conclusions of the third chapter	73
GENERAL CONCLUSIONS	74
REFERENCES	77
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE DISSERTATION TOPIC	83
SUMMARY IN ENGLISH	85
ANNEXES ² ..	99
Annex A. Patent LT2013059. Pulsating Flow Ejector.....	100
Annex B. Liquid and air properties used for modeling (enclosed CD).....	108
Annex C. Declaration of academic integrity (enclosed CD).....	110
Annex D. Copies of the author's scientific publications on the topic of the dissertation (enclosed CD)	111

² The annexes B, C, D are supplied in the attached compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Požeminio vandens tiekimas su didesnės geležies junginių koncentracija vartotojams sąlygoja nemažai problemų: tirpiems geležies junginiams sąveikaujant su deguonimi, gaminasi mažai tirpus rusvos spalvos geležies hidroksidas, blogėja vandens skonis, jis tampa rusvas ir drumstas. Kaupiantis šiems dariniams, mažėja jų pralaidumas, o tai gali tapti ekonominė problema (Vreeburg *et al.* 2007). Su tokio pobūdžio problemomis susiduriama ne tik Lietuvoje ir Europoje, bet ir visame pasaulyje.

Geležies junginių šalinimas iš požeminio vandens grindžiamas dvivalenčių junginių oksidavimu į mažai tirpius junginius bei jų sulaikymu. Oksidavimui dažniausiai naudojamas deguonis esantis ore (Albrektienė *et al.* 2017, Krupińska *et al.* 2020, Munter *et al.* 2008) arba kiti reagentai (kalio permanganatas, aktyvus chloro turintis junginiai, mangano dioksidas ir pan.), taip skatinama neekologiška gamyba ir didinama gaminamo valymo įrenginio savikaina. Taip pat šių reagentų, stiprių oksidatorių panaudojimas ruošiant geriamąjį vandenį gali sudaryti žmogaus sveikatai žalingų reakcijos produktų (kancerogeninių junginių, chloro organinių junginių, manganatų ir kt.) (Albrektienė *et al.* 2017).

Siekiant užtikrinti, kad bendrosios geležies junginių koncentracija geriamajame vandenyje nevirsytų šiuo metu pagal Europos Sąjungos Tarybos

direktyvos 98/83/EB ir Lietuvos higienos normą HN 24:2017 esančių geriamojo vandens saugos ir kokybės reikalavimų, reikia ieškoti efektyvesnių, ekologiškesnių, bet nebrangių valymo įrenginių.

Geležies junginių šalinimas iš vandens yra sudėtingas, nes tam reikia sudėtingų įrenginių. Yra naudojama daug aukšto efektyvumo geležies valymo iš vandens įrenginių iš kurių labiausiai paplitę oro kompresoriniai bei reagentiniai. Šių įrenginių eksploatavimas sudėtingas, todėl jų taikymas yra ribotas. Tokių įrenginių pagrindiniai trūkumai yra per didelis triukšmingumas ir filtro regeneracijos metu reagentu šalinimo problema. Tai paskatino tobulinti hidrodinaminę bereagentinį geležies šalinimo iš vandens technologiją, kurios pagrindinis elementas yra ežektorius. Optimizuojant ežektoriaus mechaninę konstrukciją galima pasiekti geresnias sąlygas susidaryti hidrodinaminiam procesams, kurie supaprastintų bereagentinį geležies šalinimą iš vandens.

Darbo aktualumas

Lietuvos gyventojams centralizuotai tiekiamas tik požeminis vanduo (Klimas *et al.* 2006), tačiau 87 % gėlo požeminio vandens išteklių geležies koncentracija viršija Lietuvos geriamojo vandens higienos normas HN 24:2017 leidžiamą 0,2 mg/l ribą.

Šiuo metu pažangiausias būdas iš vandens minėtoms priemaišoms šalinti yra ežektorinės hidrodinaminės bereagentinės technologijos, kuriuose svarbiausias vaidmuo tenka deguonies esančios ore tirpumo vandenyje pagerinimas taip suaktyvinant geležies oksidavimo ir koaguliavimo procesus. Lietuvos ir užsienio mokslininkai (Mažeikienė *et al.* 2001, Khadse *et al.* 2005, Albrektienė *et al.* 2017, Kitaeva *et al.* 2019) eksperimentiškai tyrė vandens valymo nuo perteklinio geležies galimybes. Tačiau vykstant hidrodinaminiam bereagentiniam valymui nėra nustatyti ir optimizuoti tokie technologiniai parametrai kaip skystyje sukuriama akustinio lauko dažnis, intensyvumas ir kt. Geležies junginių šalinimo iš vandens priklausomybė nuo minėtų veiksnių dar nėra visiškai ištirta ir panaudota, kas aktualu dabartiniu metu.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – naujai sukurtas optimalios mechaninės konstrukcijos pulsuojančio srauto ežektorius.

Darbo tikslas

Atsižvelgiant į deguonies esančios ore tirpumo vandenyje ir geležies koaguliacijos procesų teorinių, skaitinio modeliavimo bei eksperimentinių tyrimų rezultatus, sukurti naujos mechaninės konstrukcijos pulsuojančio srauto ežektorių, galintį pagerinti bereagentinio geležies šalinimo iš vandens technologiją.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti iškelti šie uždaviniai:

1. Teoriškai išanalizuoti ežektorių konstrukcijų charakteristikas ir juose vykstančius ežektuojamo srauto hidrodinaminius procesus.
2. Analitiškai ištirti pulsuojančio srauto hidrodinaminių parametrų charakteristikas.
3. Sukurti pulsuojančio srauto ežektoriaus prototipą, pagrįstą akustinio lauko generavimu ežektuojamo srauto susimaišymo su darbinio skysčiu metu, kai kinta jų tekėjimo debitas.
4. Eksperimentiškai ištirti sukurto pulsuojančio srauto ežektoriaus hidrodinaminių parametrų įtaką deguonies tirpumui vandenyje bei geležies koaguliacijai.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi skaitiniai, kurie pagrįsti skaičiuojamąja skysčių dinamika, ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Skaitiniai tyrimai buvo atlikti naudojant programinę įrangą „SolidWorks Flow Simulation“. Atlikti pulsuojančio srauto sklaidžiamų akustinio lauko parametrų matavimai. Sukurto pulsuojančio srauto ežektoriaus hidrodinaminių procesų eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti naudojant sukurtą tyrimų stendą.

Darbo mokslinis naujumas

Darbo naujumą sudaro atliktų pulsuojančio srauto kompleksinių teorinių ir eksperimentinių sukurto ežektoriaus tyrimų rezultatai, taikant akustinio lauko susidarymo naujus konstrukcinius sprendimus, vykstančių hidrodinaminių procesų modeliavimas bei sukurto naujo pulsuojančio srauto ežektoriaus pritaikymas geležies junginiams iš vandens šalinti supaprastinant technologiją.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Naujai sukurto pulsuojančio srauto ežektoriaus tyrimai suteiks galimybę nustatyti optimalius hidrodinaminius parametrus, kurie suaktyvins deguonies esančios ore tirpumą vandenyje ir geležies junginių koaguliavimą, kas atitinkamai supaprastinta beregentinį geležies šalinimą iš vandens. Taikant konstrukcinius sprendimus pagerinamos sąlygos dvivalenčių junginių oksidavimui į mažai tirpius geležies junginius vandenyje. Pritaikius sukurtą pulsuojančio srauto ežektorių bus įmanoma efektyviau pašalinti geležį iš vandens ir tai leis išvengti žalos žmogaus sveikatai.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurtas įrenginys pagrįstas pulsuojančio srauto formavimu dviejų terpių susimaišymo metu. Šis srautas sukuria akustinį lauką, kuris padidina hidrodinaminio bereagentinio vandens valymo įrenginio efektyvumą, kai jų tekėjimo debitas kinta.
2. Naujai sukurto pulsuojančio srauto įrenginio pritaikymas sudaro geresnes sąlygas dviejų terpių susimaišymui, todėl geležies šalinimo efektyvumas padidėja >10%.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbtos devynios mokslinės publikacijos: dvi – *Clarivate Analytics (Web of Science)* duomenų bazės leidiniuose, viena – *Clarivate Analytics (Web of Science)* duomenų bazės *Conference Proceedings* leidinyje, šešios – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šešiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2011 m., 2012 m., 2013 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“ 2011 m. Prahoje, Čekijoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „The Seventh International Symposium about Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering“ 2012 m. Balatonfuredre, Vengrijoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „The 13th International Conference Mechatronic Systems and Materials“, 2017 m. Vilniuje, Lietuvoje.

Gautas Lietuvos Respublikos patentas Nr. LT2013 059 išradimui „Pulsuojančio srauto ežektorius“. Autoriai: Vladas Vekteris, Andrius Styra, Vytautas Striška, Artūras Kilikevičius.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas ir trys skyriai, bendros išvados, literatūros šaltinių sąrašas, autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas, santrauka anglų kalba.

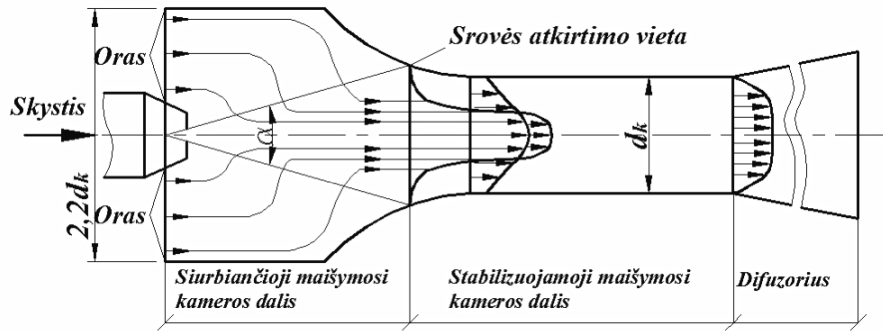
Darbo apimtis – 97 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 74 numeruotos formulės, 49 paveikslai ir 1 lentelė. Rašant disertaciją naudotasi 61 literatūros šaltiniu.

Ežektorių tyrimų analizė

Skyriuje atliekama literatūros analizė, ežektuojamų procesų tyrimas, teorinių ir eksperimentinių tyrimų apžvalga, generuojamo akustinio lauko specifiška, neregentinio vandens valymo teigiami ir neigiami aspektai. Dalis šio skyriaus medžiagos paskelbta publikacijose (Vekteris *et al.* 2011, 2014).

1.1. Pulsuojantį srautą generuojantys įrenginiai ir jų konstrukcijų analizė

Ežektorius – tai įrenginys, kuriame darbinio srauto kinetinė energija perduodama ežektuojamam srautui tiesioginio kontakto būsenoje. Šie įrenginiai skirstomi pagal darbinio ir ežektuojamojo srauto agregatinį būvį. Ežektoriai, skirti aeravimui, priskiriami prie grupės įrenginių, kurių darbinio ir ežektuojamojo srauto agregatinis būvis skirtingas. Ežektuojamo srauto slėgio padidėjimas vyksta be mechaninės energijos poveikio, todėl tai vienas iš pagrindinių ežektorinių įrenginių kokybės ir patikimumo garantų. Ežektoriaus veikimo principas paaiškinamas taip: srautas išteka iš tūtos greičiu c_t , laisvosios srovės išsiplečiančios kampu α pavidalo (1.1 pav.).



1.1 pav. Aerodinaminė ežektoriaus darbo schema
(Šakmanas 2008)

Fig. 1.1. Aerodynamic ejector work scheme (Šakmanas 2008)

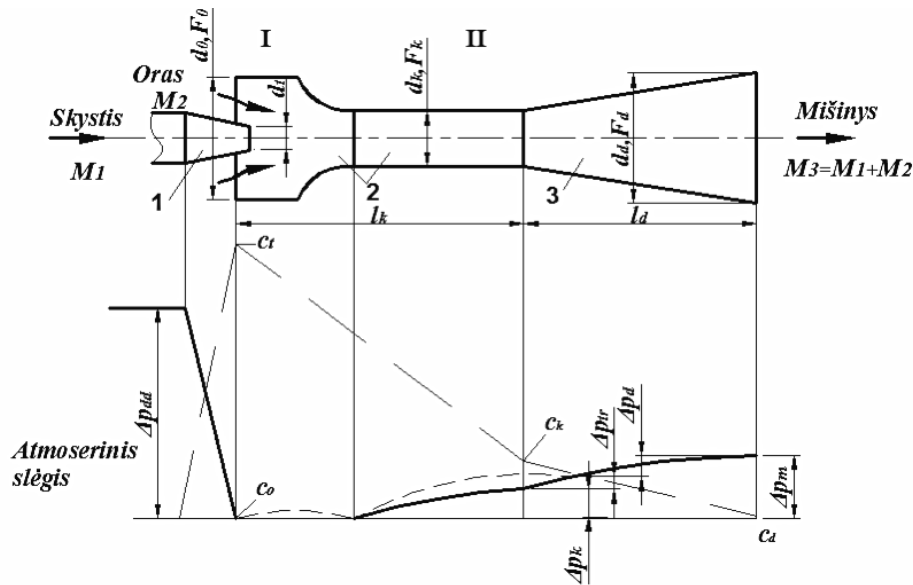
Tūtoje potencinė skysčio slėgio energija virsta kinetine srauto energija (Šakmanas 2008). Skysčio srovė maišymosi kameros įsiurbiančiosios dalies pabaigoje atsimuša į ežektoriaus sieneles. Oro, patenkančio į maišymosi kamerą, greitis palyginti mažas, todėl skysčio srovė susiurbia beveik nejudamą orą.

Skysčio srovės tekėjimo režimas yra turbulentinis. Esant šiam režimui dėl skersinių turbulentių pulsacijų skysčio dalelės išlekia (disperguoja) iš srovės į supantį orą ir perduoda oro dalelėms judesio kiekio impulsus, versdamos jas judėti išilgai srauto. Oras pasienio sluoksnyje turbulizuojamas, oro dalelės prasiskverbia į srovę, įgyja pagreitį ir kartu stabdo pačią srovę. Šis oro pagriebimo procesas, vykstantis pasienio sluoksnyje, nutrūksta srovės atkirtimo vietoje. Toliau, stabilizuojančioje kameros dalyje, dėl turbulentinės difuzijos išsilygina greičių ir koncentracijų laukai, nesikeičiant skysčio ir oro kiekių santykiui, gaunamas dvifazis srautas. Statinis slėgis įsiurbiamojoje kameros dalyje lieka beveik pastovus, o stabilizacijos dalyje didėja.

Greičių laukas, tiekiamas srauto į cilindrinę maišymosi kameros dalį, kaip matyti 1.1 pav., labai netolygus, bet išeidamas iš cilindrinės dalies išsilygina ir atitinka tekėjimo režimą. Tuomet sumažėja srauto kinetinė energija ir iš dalies pavirsta į potencinę, tada didėja statinis slėgis. Taigi, cilindrinėje maišymosi kameros arba stabilizacijos dalyje, vykstant maišymosi procesui, srautas yra stabdomas. Kameros ilgis turi būti toks, kad srautas visiškai susimaišytų.

Slėgio kreivė pagal ežektoriaus ilgį pavaizduota (1.2 pav.). Maišymosi kameros įsiurbiamosios dalies ribose slėgis pastovus, o cilindrinėje maišymosi kameros dalyje dėl energijos persiskirstymo slėgis kyla. Tai susiję su greičių lauko stabilizavimu. Besimaišančiam srautui tekant maišymosi kamera atsiranda energijos nuostolių, kurių didumą sudaro pats maišymosi procesas. Be to, šioje kameros dalyje atsiranda skirtingų nuostolių: pirma, trinties, antra, susijusių su

srauto stabdymu maišymosi kameroje ir difuzoriuje, trečia, kai mišinys išteka iš ežektoriaus (Šakmanas 2008).



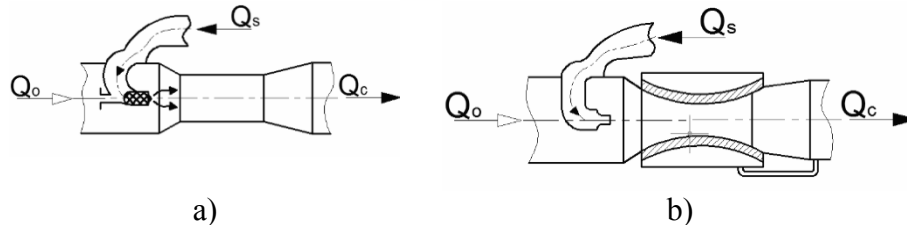
1.2 pav. Greičių ir slėgių transformacija ežektoriuje: 1 – tūta;
2 – maišymosi kamera; 3 – ežektoriaus žiotys (anga); 4 – difuzorius
(Šakmanas 2008)

Fig. 1.2. Speed and pressure transformation Ejector: 1 – nozzle; 2 – mixing chamber;
3 – The mouth of the ejector (hole); 4 – diffuser (Šakmanas 2008)

Prieš patenkant mišiniui į difuzorių, srautas privalo turėti kuo tolygesnį greičių lauką, nes, priešingu atveju, mažėja difuzoriaus efektyvumas, o kartu ežektoriaus naudingumo koeficientas. Difuzoriuje toliau vyksta intensyvus srauto maišymasis. Jei kameroje srautas su oru visiškai nesusimaišo, šis procesas turi pasibaigti difuzoriuje. Taigi difuzorius sudaro papildomų sąlygų, užtikrinančių tolygų mišinio koncentracijų lauką išeinant iš ežektoriaus.

Pasaulyje konstrukcinių ežektorių variantų aptinkama labai įvairių, tačiau išlieka pagrindiniai principai, kurie būtini tam, kad ežektorius dirbtų pagal savo paskirtį – ežekuoti orą ir jį maišyti su darbinio skysčio srautu. Pagal savo konstrukcines ypatybes ežektoriai gali būti skirstomi į reguliuojamus ir nereguliuojamus su skirtingomis išpurškimo angomis. Reguluojami ežektoriai skiriasi nuo nereguliuojamojo tipo tuo, kad juose yra galimybė keisti darbinio srauto išpurškimo angos dydį arba maišymosi kameros skerspjūvio plotą. Be visų skirtumų, kurie būdingi ežektoriams, išlieka pagrindiniai konstrukciniai elementai, pabrėžiantys šių įrenginių išskirtinumą: darbinio srauto išpurškimo

anga, maišymosi kamera, difuzorius, ežektuojamojo srauto atvamzdis. Darbinio srauto išpurškimo anga dažniausiai yra ežektoriaus centrinėje ašyje (1.3 pav.), tačiau gali būti panaudojamos sudėtingesnės konstrukcijos, kai išpurškimo anga išdėstoma žiedo forma aplink vidinę maišymosi kameros sienelės dalį. Vienas iš galimų variantų yra kombinuotas darbinio srauto išpurškimo angos išpildymo variantas (1.3 pav.). Tačiau sudėtingiausias konstrukcinis tokios angos sukonstravimas yra suformuojant kelias arba net kelias dešimtis išpurškimo angų aplink maišymosi kameros skerspjūvį (1.3 pav.).



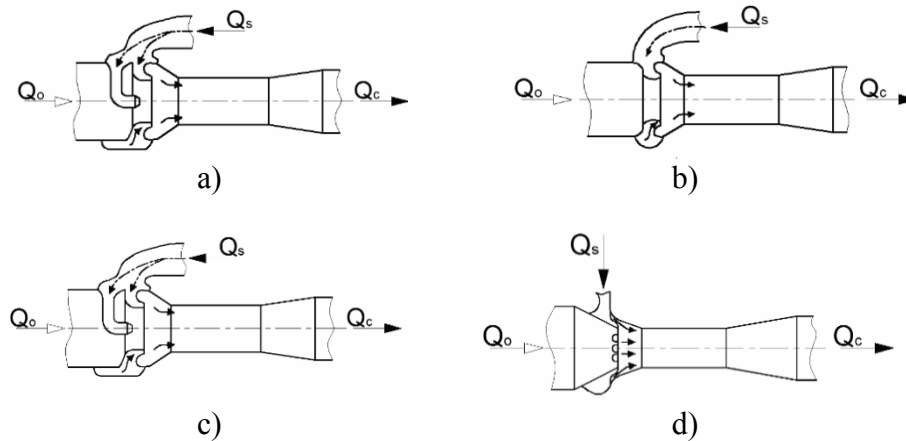
1.3 pav. Reguliuojamos ežektorių konstrukcijos: a) reguliuojamas srauto kiekis; b) reguliuojama maišymosi kameros konstrukcija (Liamaev 1988)

Fig. 1.3. Adjustable ejector design: a) control the amount of traffic; b) the regulated mixing chamber design (Liamaev 1988)

Ežektorinės aeravimo sistemos su centrine darbinio srauto išpurškimo anga (1.4 pav.) darbo principą galima suskirstyti į dvi pagrindines dalis. Pirmoje dalyje darbinis srautas teka turbulenciniu režimu išpurškimo angos link. Antroje dalyje darbinis srautas, ištekdamas iš išpurškimo angos, stumia prieš save esantį skysčio tūrį. Išstumto skysčio tūrio vietoje susidaro tuštuma, kurioje dėl sumažėjusio slėgio, iš aplinkos ežektuojamas oro srautas. Taip prasideda tiesioginis darbinio skysčio srauto ir ežektuojamojo oro maišymasis.

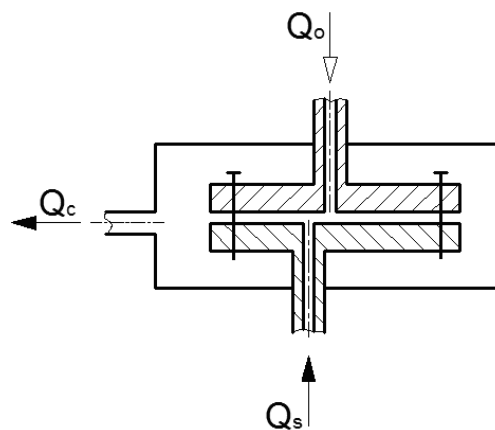
Pasitaiko netradicinių ežektorių variantų, kurie visiškai skiriasi nuo tradicinio tipo (1.5 pav.). Netradicinis plokštelinės ežektorinės aeravimo sistemos pagrindinis darbo principas yra tada, kai darbinis srautas tekėdamas atsimuša į plokštelę ir sukuria minimalaus slėgio zona, ties kuria yra suformuota ežektuojamo srauto anga. Darbinio ir ežektuojamo srauto susimaišymo santykis reguliuojamas plokštelėmis.

Kai kuriais atvejais pasitaiko ežektorinių sistemų įrengimas vamzdžio alkūnės konstrukcijoje (1.6 pav.) (Liamaev 1988). Šio tipo įrenginiuose darbinis srautas tiekiamas išoriniu vamzdžiu, o ežektuojamas srautas įsiurbiamas vidiniu.



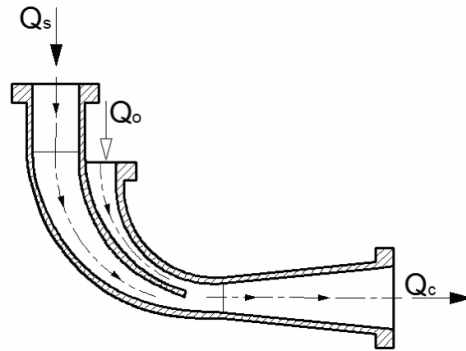
1.4 pav. Nereguliuojamos ežektorių konstrukcijos: a) centrinė darbinio srauto išpurškimo anga; b) žiedinė darbinio srauto išpurškimo anga; c) mišraus tipo darbinio srauto išpurškimo anga, d) purkštukų tipo darbinio srauto išpurškimo anga (Liamaev 1988)

Fig. 1.4. Unregulated ejector structure: a) a central service flow to the spraying outlet; b) the annular working stream to the spraying outlet; c) mixed type of the service flow to the spraying outlet, d) a nozzle type spray hole working stream (Liamaev 1988)



1.5 pav. Plokštelinis ežektorius: Q_s – darbinio srauto atvamzdis; Q_o – ežektuojamo srauto atvamzdis (Liamaev 1988)

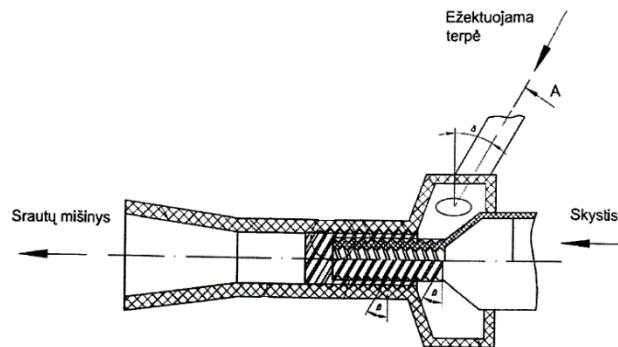
Fig. 1.5. Plate ejector: Q_s – working stream; Q_o – flow nipple (Liamaev 1988)



1.6 pav. Alkūninis ežektorinis įrenginys: Q_s – darbinio srauto atvamzdis;
 Q_o – ežektuojamo srauto atvamzdis (Liamaev 1988)

Fig. 1.6. Cranked the ejector device: Q_s – working stream; Q_o – flow nipple
 (Liamaev 1988)

Ežektorių konstrukcijų analizė. Efektyvus sumaišymas galimas tik esant tam tikram turbulentiškumo laipsniui, kuris tiesiogiai priklauso nuo darbinio srauto tekėjimo greičio (1.7 pav.).



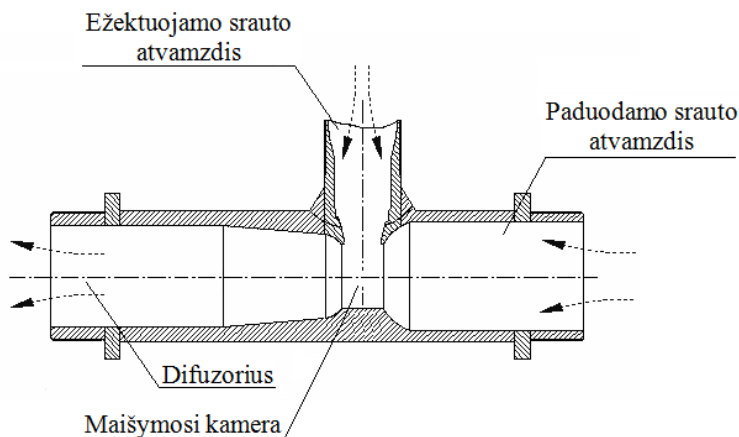
1.7 pav. Ežektorinis įrenginys (Vekteris *et al.* 2008)

Fig. 1.7. The ejector device (Vekteris *et al.* 2008)

Šio įrenginio konstrukcija negali užtikrinti stabilios ežektuojamos terpės koncentracijos darbiname sraute esant kintamam jo debitui, todėl ir jo efektyvumas keičiasi, kintant darbinio skysčio srauto debitui, ypač tai pasireiškia esant mažiems darbinio srauto debitams.

Kitas žinomas maišytuvas – ežektorinis įrenginys, susidedantis iš difuzoriaus, konfuzoriaus ir žiočių. Žiočių ertmė kanalu sujungta su ežektuojama terpe. Konfuzoriaus ir difuzoriaus paviršiuose išilgai darbinio srauto tekėjimo krypties

suformuoti kanalai ir iškilimai, dėl kurių vyksta intensyvesnis ežektuojamos terpės ir darbinio skysčio kontaktas ir jie geriau susimaišo (1.8 pav.).



1.8 pav. Ežektorinis įrenginys (Mazzei 1997)

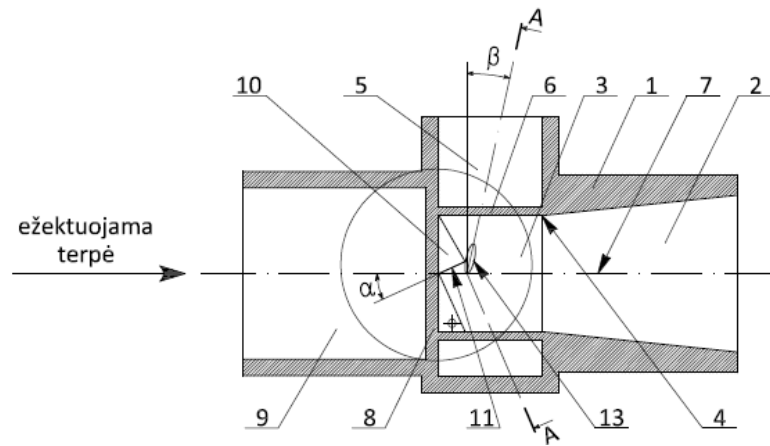
Fig. 1.8. The ejector device (Mazzei 1997)

Tačiau išdėstytų kanalų ir iškilimo sistema (1.8 pav.) negali užtikrinti proporcingo ežektuojamos terpės kiekio, pratekančio darbinio srauto debitui. Esant kintamam darbinio srauto debitui, ežektuojamos terpės kiekis nėra tiesiškai priklausomas nuo pratekančio darbinio srauto debito. Tai ypač pasireiškia esant mažiems debitams, kada suformuoti plyšiai ir iškilimai darbinio srauto tekėjimo kelyje negali sukurti pakankamos srauto turbulencijos. Netiesinė ežektuojamos terpės kiekio priklausomybė nuo darbinio srauto debito mažina šio ežektoriaus efektyvumą ir siaurina jo panaudojimo galimybes.

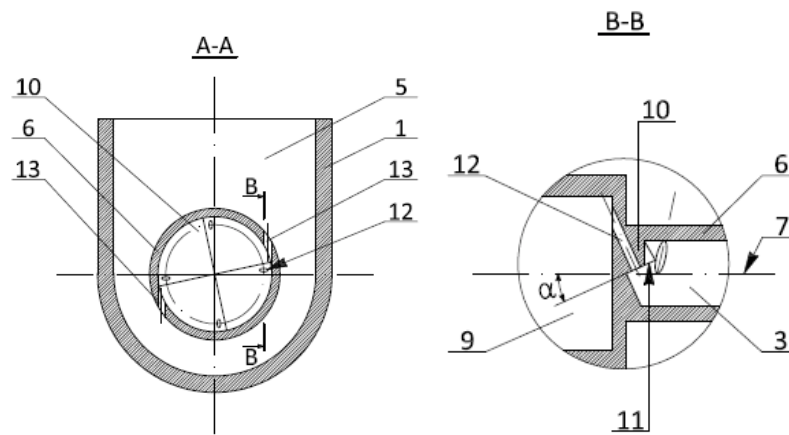
Visi išvardinti ežektoriai buvo naudojami srautams maišyti, geležies nusodinimas nebuvo vertinamas.

Siūlomo įrenginio paskirtis – padidinti pulsuojančio srauto ežektoriaus efektyvumą, užtikrinant ežektuojamos terpės debito tiesinę priklausomybę nuo darbinio srauto debito.

Ežektorius (1.9 pav.) priklauso skysčių prisotinimo deguonimi įrenginių sričiai ir gali būti taikomas vandens paruošimo sistemose, kur reikalaujama valomą vandenį prisotinti deguonimi prieš pat teršalų pašalinimo procesą, kai kinta jų tekėjimo debitas. Darbinio skysčio srautas veikiant slėgiui tiekiamas į žiočių ertmę kur yra įsukamas, dėl tangentine kryptimi išdėstytų skylių žiočių sienelėje ir nukreipiamas į žiočių dugną. Papildoma įsukto darbinio srauto turbulencija sukurama dėl dugne esančių iškilimų. Neigiamas slėgis susidaro netaisyklingo trikampio pasvirusios piramidės formos iškilimų siauriausioje jų plokštumoje ties skylę, jungiančia žiotis su ežektuojamos terpės ertme.



a)



b)

c)

1.9 pav. Pulsuojančio srauto ežektorius: a) šoninio pjūvis ties centrine ašimi; b) A-A pjūvis; c) B-B pjūvis

Fig. 1.9. Pulsating flow ejector: a) a side section along the central axis; b) A-A section; (c) B-B section

Per šią skylę patenka ežektuojamas srautas, kuris susimaišo su darbinio skysčiu. Pakeitus dinaminio ir statinio slėgių santykiui užsuktas srautas pradeda tekėti difuzoriaus link, uždarydamas darbinio skysčio patekimą pro skylę į žiotis, o tai sumažina statinį slėgį, todėl vėl atsidaro skysčio tekėjimas tangentine

kryptimi išdėstytomis skylėmis į žiočių ertmę. Procesas gali kartotis nuo 1 iki 20,0 kHz. Tai sudaro geras sąlygas dvejų terpių susimaišymui, o iškilimų išdėstymas žiočių dugne didėjančia nuo žiočių centro link sienelės radialinės krypties linkme, užtikrina tolygų ežektuojamos terpės patekimą į žiočių ertmę, kai yra kintamas darbinio skysčio tekėjimo debitas (1.9 pav.).

1.2. Procesai, vykstantys pulsuojančio srauto ežektoriuje

Pulsuojančio srauto formavimas užsuktoje srovėje yra sudėtingas hidrodinaminis reiškinys, kuris tiriamas jau daugelį metų. Tačiau jo universalus teorinis modelis dar nėra sukurtas. Vienas pirmųjų bandymų aprašyti recirkuliacinės zonos formavimąsi buvo Benjamin jungtinės būsenos teorija, pagrįsta banginiu modeliu ir eksperimentiškai patvirtintas užsuktiems tekėjimams kanale. Joje teigiama, kad recirkuliacinės zonos formavimasis yra pereinama būsena tarp tvarkingos simetrinės užsuktos srovės tekėjimo struktūros ir stipriai turbulizuoto srauto, kuriam nebūdinga simetrija. Tačiau laisvuose tekėjimuose ši teorija nepasitvirtino. Egzistuoja nemaža kitų teorijų, kuriomis bandoma nustatyti recirkuliacinės zonos formavimosi kriterijus (Billant *et al.* 1998). Pagrindinis šių teorijų trūkumas yra tai, kad gaunamos išvados galioja tik konkretaus eksperimento ar skaitmeninio modelio sąlygomis, tačiau jos negali būti vertinamos kaip universalūs recirkuliacinės zonos formavimosi teoriniai modeliai.

Per pastaruosius penkis dešimtmečius literatūroje buvo pateikta nemažai recirkuliacinės zonos klasifikacijos aprašymų. Pirminė recirkuliacinės zonos klasifikacija buvo įvesta sukurių virš delta sparno vizualizacijos eksperimentuose ir susijusi su vaizdine asociacija. Stebėtas į sukurių centrą įpurškiamos dažų srovelės susivijimas į spiralę aplink recirkuliacinę zoną buvo pavadintas spiraline arba S tipo forma, o tolygus dažų pasiskirstymas apgaubiant recirkuliacinę zoną buvo pavadintas burbulo arba B tipo forma. Faler ir Leibovich (Faler *et al.* 1997) praplėtė šią klasifikaciją ir išskyrė septynis skirtingus tipus, numeruodami juos nuo 6 iki 0: spiralinis (6 tipas), dviguba spiralė (5 tipas), suplotas burbulas (4 tipas), spiralės vija (3 tipas), asimetrinis burbulas (0 tipas). Ilgą laiką būtent šia klasifikacija buvo naudojama. Ir tik gerokai vėliau buvo pastebėtas ir aprašytas kokybiškai naujas kūgio tipas, kai dažant medžiaga tolygiai plečiasi sudarydama kūgio formą. Nors kūgio formos recirkuliacinės zonos egzistavimas buvo patvirtintas įvairiuose eksperimentuose (Billant *et al.* 1998, Faler *et al.* 1977), kol kas nėra pateiktos klasifikacijos, kuri apimtų visas žinomas spirales, burbulo ir kūgio formos variaciją. Dauguma autorių tiesiog prideda egzistuojančias kūgio formos recirkuliacinės zonos atmainas prie Faler ir Leibovich pateiktos klasifikacijos. Kitas didelis naudojamos klasifikacijos trūkumas yra teorinio

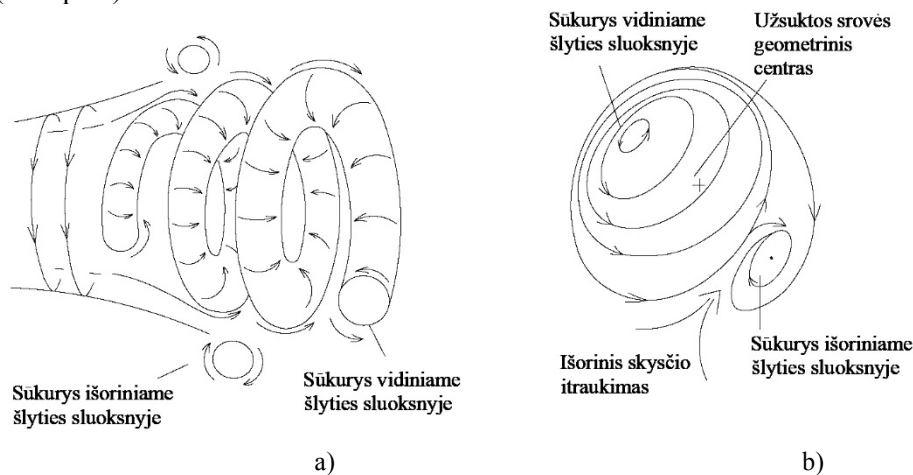
pagrindo nebuvimas. Nepaisant įvairių mėginimų teoriškai pagrįsti stebimų formų įvairovę, skirtingų autorių pateikiami teoriniai ir empiriniai perėjimo nuo vienos formos prie kitos kriterijai yra labai gaudžiai susiję su eksperimentinio įrenginio savybėmis ir sunkiai pritaikomi tiek kitų eksperimentatorių, tiek skaitmeninių modelių kūrėjų.

Bendros teorijos sukūrimą labai stabdo tai, kad recirkuliacinės zonos tyrimai užsuktuose reaguojančiuose ir nereaguojančiuose srautuose išskyrė ją į atskiras kryptis. Nepaisant bendro tyrimo objekto, šių dviejų krypčių ryšys yra menkas. Nereaguojančiame sraute gauti rezultatai retai panaudojami recirkuliacinės zonos formavimuisi reaguojančiame sraute analizuoti ir paaiškinti. Tokia padėtis istoriškai susiklostė dėl to, kad recirkuliacinės zonos formavimasis nereaguojančiuose srautuose su stipriu sukimosi momentu buvo nepageidautinas reiškinys, drastiškai keičiantis srauto tekėjimo lauką, sukeliantis nestabilumus. Moksliniai tyrimai šioje srityje buvo nukreipti į recirkuliacinės zonos formos klasifikavimą, teorinių modelių, galinčių vienareikšmiai nustatyti recirkuliacinės zonos formavimosi sąlygas standartiniuose tekėjimuose (sūkurys virš delta sparno, užsuktas tekėjimas vamzdyje ar tūtoje, tornadinis sūkurys), kūrimą.

Užsuktos srovės centre dėl išcentrinės jėgos veikimo mažėja slėgis ir stabdomas skysčio tekėjimas ašies kryptimi. Kai išcentrinės jėgos sukeltas išretinimas didesnis už srovės dinaminį slėgį, srautas prie ašies ima tekėti atgal. Srovės viduje susidaro stabili grįžtamo tekėjimo zona. Tokioje srovėje yra du šlyties sluoksniai, kuriuose generuojami sūkuriai: vidinis šlyties sluoksniai, kuriuose generuojami sūkuriai: vidinis šlyties sluoksnis tarp grįžtamo tekėjimo ir srovės bei išorinio šlyties sluoksnis tarp srovės ir ją supančio stovinčio fluido. Priklausomai nuo pradinių sąlygų pasirinktoje geometrinėje sistemoje galima realizuoti dviejų tipų recirkuliacinę zoną: spiralės tipo ir burbulo tipo. Būdingi spiralinės recirkuliacinės zonos požymiai yra užsuktos srovės centrinės dalies formavimasis į savarankišką besisukančią struktūrą, šios struktūros precesija aplink sukimosi ašį ir sūkurių judėjimas vidiniame šlyties sluoksnyje spiraline trajektorija. Tuo tarpu burbulo tipo recirkuliacinei zonai būdingas užsuktos žiedinės srovės plėtimasis, tolygus vidinės recirkuliacinės zonos aptekėjimas ir toroidinių sūkurių formavimasis vidiniame šlyties sluoksnyje. Burbulo ir spiralinės vidinės recirkuliacinės zonos klasifikacija neaprašo sūkurių elgesio išoriniame šlyties sluoksnyje. Ir vidinio, ir išorinio šlyties sluoksnių spiraliniai sūkuriai palaikomi energingo užsukto srauto. Jie konkuruoja tarpusavyje, nors kurie sūkuriai vyrauja, nulemia tūtos forma.

Spiralinio tipo recirkuliacinėje zonoje sūkurys vidiniame šlyties sluoksnyje pradeda formuotis netoli grįžtamojo tekėjimo zonos ribos. Stabdoma grįžtamojo tekėjimo, užsuktos srovės ašis pradeda stipriai plevėsuoti. Tikėtina, kad nusistovi toks precesijos dažnis, kuriuo generuojami nestabilumai labiausiai stiprinami vidiniame šlyties sluoksnyje. Dėl to vidiniame šlyties sluoksnyje suvirsta sūkurys,

kuris tempiamas greito išorinio srovės žiedo spirale sukasi apie grįžtamojo tekėjimo zoną. Dėl sukimosi statmenoje srovės tekėjimo kryptčiai plokštumoje spiralinis sūkurys intensyviai maišo žiedu tekančios užsuktos srovės ir grįžtančio srauto mases. Kai kuriais atvejais spiralinis sūkurys praplėšia žiedinę srovę ir įtraukia skystį į grįžtamą tekėjimą ne tik iš jos, bet ir iš stovinčios aplinkos. Toks visiškas žiedinės srovės įtraukimas uždaro recirkuliacinę zoną. Dėl proceso nesimetriškumo ašies atžvilgiu momentinė recirkuliacinė zona yra nesimetriška užsuktos srovės geometrinės ašies atžvilgiu. Suvidurkinta laike spiralinė recirkuliacinė zona yra gana simetriška ir panaši į burbulo tipo recirkuliacinę zoną. Išoriniame šlyties sluoksnyje taip pat formuojasi spiralinis sūkurys, kuris sukasi apie užsuktą srovę iš išorinės pusės. Išorinės ir vidinės spiralės žingsniai yra vienodi. Spiralės sukasi taip, kad vienos spiralės vija gultų tarp kitos spiralės vijų. Schematiškai tekėjimo laukas su būdingais sūkuriais pavaizduotas (1.10 pav.).

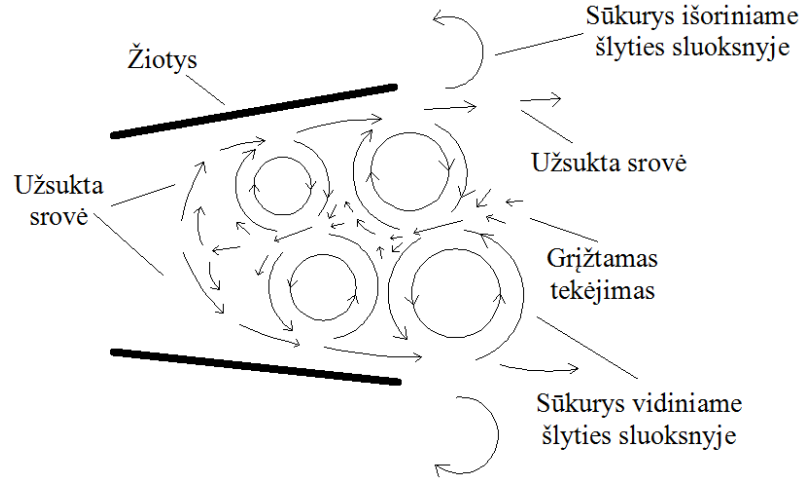


1.10 pav. Spiralinės recirkuliacinės zonos sūkurių struktūra: a) erdvinis vaizdas; b) pjūvis plokštumoje, statmenoje užsuktos srovės sukimosi ašiai (Lapienė *et al.* 2001)

Fig. 1.10. Spiral recirculating zone vortex structure: a) a three-dimensional image; b) section in a plane perpendicular to the axis of rotation fitted to all current (Lapienė *et al.* 2001)

Naudojant diverguojančią tūtą stebimas spiralinės recirkuliacinės zonos formavimasis (1.10 pav.). Grįžtamo tekėjimo zona įsiskverbia giliai į tūtą, tad apie šią zoną veja spiralinis vidinio šlyties sluoksnio sūkurys. Prie tūtos išėjimo šis sūkurys jau būna apsisukęs vieną kartą ir kaip ir pirmu atveju užpildęs visą grįžtamo tekėjimo zoną. Grįžtamasis srautas yra siauras, besiplakantis tarp sūkurio vijų (1.10 pav.). Prie tūtos sienelės tekančios užsuktos srovės ir

grįžtamojo srauto maišymasis yra labai stiprus. Kaip ir anksčiau nagrinėtu atveju, sūkurio priešpriešinės vijos pradeda ardyti vieną kitą, ir sūkurys subyra išeidamas iš tūtos arba tuoj už išėjimo. Konverguojančios tūtos atveju išorinio srauto įtraukimas už tūtos nestebėtas, todėl galima teigti, kad recirkuliacinė zona užsidaro dar tūtoje.



1.11 pav. Sūkurių vidiniame šlyties sluoksnyje schema (Lapienienė *et al.* 2001)

Fig. 1.11. Eddies in the inner shear layer scheme (Lapienienė *et al.* 2001)

Didėjant dujų koncentracijai pulsuojančiame sraute kinta akustinės bangos sklaidimo ypatumai: pakinta akustinės bangos greitis ir slopinimas, padidėja akustiniai triukšmai. Tokiose nevienalytėse aplinkose akustinės bangos keičia savo sklaidimo kryptį. Todėl būtina apskaičiuoti akustinės bangos sklaidimo trajektorijas kontroliuojamame skysčio sraute.

Akustinių bangų sklaidimo greitis c vandenyje be oro burbuliuko nulemia vandens tankis ρ_{sk} ir spūdomas β_{sk} . Šios fizikinius dydžius sieja lygtis:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\beta_{sk} \rho_{sk}}} \times \frac{1}{3} f_r. \quad (1.1)$$

Įvedus į vandenį nedidelį kiekį oro burbuliukų, mišinio spūdomą ir tankį galima apskaičiuoti pagal formules (Domenico 1982):

$$\beta_{sk,d} = (1 - q) \beta_{sk} + q \beta_d; \quad (1.2)$$

$$\rho_{sk,d} = (1 - q) \rho_{sk} + q \rho_d \times \frac{1}{3} f_r, \quad (1.3)$$

čia ρ_{sk} ir β_{sk} – atitinkamai oro tankis ir spūdumas; q – tūrinė oro koncentracija vandenyje.

Vandens tankis paprastai yra šimtus kartų didesnis už oro tankį, o oro spūdumas – šimtus kartų didesnis už skysčio spūdumą. Todėl esant nedideliame oro kiekiui vandenyje ($q < 10\text{--}15\%$) lėtas oro koncentracijos didinimas beveik nedarys įtakos bendram mišinio tankiui ir pastarasis išliks artimu vienfazio skysčio tankiui. Tuo tarpu bendras dvifazio skysčio – oro mišinio spūdumas, esant minėtoms sąlygoms, sparčiai didės. Dėl to, didinant tūrinę oro koncentraciją, galime stebėti akustinių bangų sklaidimo dvifazėse aplinkose greičio sumažėjimą, lyginant su analogiškais greičiais vienfaziuose srautuose.

Kai tirama aplinka yra vienalytė ir tūrinė oro koncentracija joje neviršija 60 %, tai akustinių bangų sklaidimo greitis tokioje dvifazėje skysčio – oro burbuliukų aplinkoje $c_{sk,d}$ gali būti išreikštas taip:

$$c_{sk,d} = \frac{1}{(1-q)\sqrt{\frac{1-q}{c_{sk}^2} + \frac{q\rho_{sk}}{\rho_d c_d^2}} + q\sqrt{\frac{q}{c_d^2} + \frac{(1-q)\rho_d}{\rho_{sk} c_{sk}^2}}} \times \frac{1}{3} f_r, \quad (1.4)$$

čia c_{sk} ir c_d – atitinkamai akustinių bangų sklaidimo greičiai vienfazėse nagrinėjamo skysčio ir oro aplinkose.

Akustikoje vienalytėmis laikomos aplinkos, kuriose akustinių bangų sklaidimo greitis nepriklauso nuo erdvinio nagrinėjamos aplinkos koordinačių. Tuo būdu, vienalytiškumo reikalavimas yra tenkinamas tik tada, kai maksimalus burbulų diametras d yra žymiai mažesnis už akustinių bangų dažnį f (akustinių bangų dažnis f yra gerokai žemesnis už oro burbuliukų rezonansinį dažnį f_r) ir aplinkos fizikiniai parametrai (temperatūra, oro koncentracija, slėgis ir kt.) nekinta erdvėje. Atsižvelgiant į įvairių autorių pateikiamus dvifazių terpių tyrimo rezultatus (Cheyne *et al.* 1995, Kafesaki *et al.* 2000, Ruffa 1992), šias aplinkas jau galima laikyti artimomis vienalytėmis, jei tenkinama sąlyga:

$$f \leq \frac{1}{3} f_r. \quad (1.5)$$

Oro burbuliuko rezonansinis dažnis f_r priklauso nuo burbuliukų spindulio r , skysčio ir oro fizinių savybių bei aplinkos sąlygų. Jei oro burbuliukai pakankamai dideli ($r > 100\ \mu\text{m}$), tai šilumos mainai ir klampumas beveik nedaro įtakos burbuliukų virpesių rezonansiniam dažniui f_r , kuris yra aprašomas Minaerto lygtimi (Ammari *et al.* 2017):

$$f_r \approx \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{3XP_0}{\rho_{sk}}}, \quad (1.6)$$

čia p_0 – pusiausvyrinis slėgis aplinkoje; X – efektinis dujų oro politropijos rodiklis.

Nagrinėjamu atveju burbuliuko virpesių procesas bus artimas adiabatiniam, kai $X = \gamma$, kai $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ – oro specifinių šilumų santykis.

Oro burbuliukų kolonos yra plačiai naudojamos kaip dujų ir skysčių kontaktoriai daugelyje sričių, tokių kaip absorbcija, kraujo deguonies skyrimas, fermentacija, biologinės reakcijos, anglies skystinimas ir nuotekų valymas. Dėl paprastos konstrukcijos, mažų eksploatavimo sąnaudų, didelio energijos efektyvumo ir gero masės bei šilumos perdavimo greičio, burbulų kolonos turi daug pranašumų, kai naudojamos kaip dujų ir skysčių kontaktoriai (Besagni *et al.* 2018). Tačiau jų projektavimas vis dar yra sudėtingas uždavinys dėl sudėtingos daugiafazių srautų struktūros, su kuria susiduria tokio tipo įranga. Visuose šiuose procesuose burbulo dydis yra svarbus projektavimo parametras, nes jis diktuoja turimą sąsajos plotą dujų ir skysčių masės perdavimui (Kazakis *et al.* 2008). Didelis burbuliukų aeracijos pranašumas yra didelis deguonies masės pernešimas vandenyje, nes tai yra dėl didelio tūrio specifinio fazės paviršiaus ploto ir mažesnio atsparumo transportavimui, palyginti su membraniniais metodais (Besagni *et al.* 2018, Kazakis *et al.* 2008, Kulkarni *et al.* 2007). Aeratoriuose pulsuojančio srauto generavimo schemos yra nuolat tobulinamos ir vykdomi tyrimai, siekiant išplėsti pulsuojančių srautų taikymo sritį. Iškyla klausimas dėl akustinių virpesių, kuriuos sukelia pulsuojančias srautas vandenyje, naudojimo (Debnath *et al.* 2020, Kulkarni *et al.* 2007, Šal *et al.* 2013). Tačiau teoriškai šis metodas mažai ištirtas. Akustinių bangų sklidimas skirtingose terpėse yra labai sudėtingas reiškinys, kurį lydi skirtingi procesai, tokie kaip kavitacija, smūgio bangos, mikrofilmai, sonochemija ir sonoluminescencija.

Šie procesai vyksta tuo pačiu metu ir taip pat sąveikauja tarpusavyje. Todėl aprašyti eksperimentinius rezultatus kyla sunkumų. Akustikos panaudojimas oksidacijos procesams vandenyje pagreitinoti ir nuosėdoms nusodinti leidžia išplėsti šio požiūrio taikymo sritį.

Yra keletas esminių parametrų, kurie aprašo hidrodinaminę burbuliukų kolonos elgseną, įskaitant (vidutinis burbulo skersmuo $\bar{d}_b$) ir (dujų kiekis ϕ_g) (Akita *et al.* 1974, Guan *et al.* 2017, Joshi *et al.* 2017). Šie veiksniai taip pat priklauso nuo sistemos geometrijos, fazių fizinių savybių ir dujų skirstytuvo tipo (Jha *et al.* 2008, Kantarci *et al.* 2005). Purkštuko (burbulų formavimo elemento) charakteristikos yra lemiamos, nes jos daro įtaką burbulų kolonų efektyvumui ir apibrėžia susidariusių burbulų dydžio pasiskirstymą ir tėkmės modelį (Shah *et al.* 1982). Paprastai dujų fazėms paskirstyti buvo naudojami akytos plokštelės, porėtus žiedus, perforuotas plokštelės (Mouza 2018, Šal *et al.* 2013).

Pramonėje naudojami didelio skersmens ir didelių gabaritų burbulinės kolonos: šioje situacijoje stebimi du pagrindiniai srauto režimai (ir pereinamasis srauto režimas tarp jų): a) vienalytis, b) pereinamasis ir c) nevienalytis srauto režimai (Besagni *et al.* 2016c, 2016a, 2016b, Besagni *et al.* 2017, Besagni *et al.* 2017, Lucas *et al.* 2016, Montoya *et al.* 2016, Mudde *et al.* 2009).

Burbulų sąveika su skysčiais ir dinamika, bei susidarymas įvairių mišinių aprašyti literatūroje (Akita *et al.* 1974, Besagni *et al.* 2018, 2016c, 2016a, 2016b, Guan *et al.* 2017, Joshi *et al.* 2017, Kulkarni *et al.* 2009, Kulkarni *et al.* 2011, Lucas, D. 2016, Maceiras *et al.* 2010, Montoya *et al.* 2016, Mouza 2018, Pourtousi *et al.* 2016, Shah *et al.* 1982, Yang *et al.* 2018, Zahradník *et al.* 1997, 1997).

1.3. Geležies junginių sąveika vandenyje

Geležis – kaitaus valentingumo (+2, +3) cheminis elementas, sudarantis 4,56 % žemės plutos masės. Geležis lengvai tirpsta rūgščioje terpėje, sudaro gana patvarius kompleksinius junginius su organinėmis medžiagomis. Požeminiame vandenyje geležis gali migruoti elementarių jonų pavidalu (dažniausiai divalenčių, apčiuopiamas trivalentės geležies kiekis požeminiame vandenyje galimas tik kompleksine forma), sudaryti įvairaus tirpumo joninius arba koloidinius kompleksinius junginius su OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , HS^- , S^{2-} , organinėmis medžiagomis (ypač fulvo ir huminėmis rūgštimis). Tai lemia labai sudėtingą geležies geochemiją požeminiame vandenyje (Diliūnas, J. 1998).

Divalentė geležis sutinkama divalentės geležies jonų Fe^{2+} arba hidratuotų jonų nuo $\text{Fe}(\text{OH})^+$ iki $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$ formoje. Didesnio šarmingumo vandenyje, kas charakteringa daliai Lietuvos požeminių vandenų, – tirpaus divalentės geležies bikarbonato formoje bei vandenyje esant H_2S – divalentės geležies sulfido formoje. Kadangi sulfidų tirpumas vandenyje yra mažesnis už bikarbonatų tirpumą, sulfidai greičiau išsiskiria nuosėdų pavidalu.

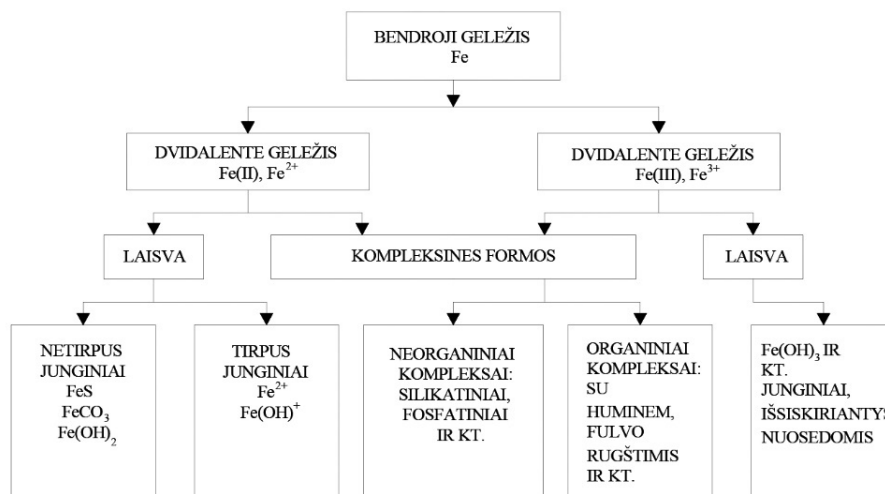
Požeminiame vandenyje divalentė ir trivalentė geležis dažnai sutinkama tirpių kompleksinių junginių formoje su įvairiais ligandais:

- neorganinės kilmės: silikatais, fosfatais, sulfatais ir kt.,
- organinės kilmės: su huminėmis, fulvo rūgštimis.

Geležies iš požeminio vandens šalinimo požiūriu, jos organiniai junginiai vandenyje yra labiausiai nepageidautini.

Paremkant geležies iš požeminio vandens šalinimo technologiją reikia žinoti bendrą geležies koncentraciją vandenyje, taip pat, kokioje formoje geležis yra vandenyje.

Požeminiame vandenyje galimų geležies formų schema pateikta 1.12 paveiksle.

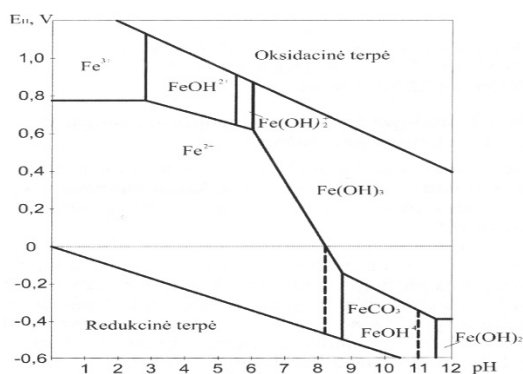


1.12 pav. Geležies formų požeminiame vandenyje schema (Diliūnas *et al.* 1998)

Fig. 1.12. Forms of iron in groundwater scheme (Diliūnas *et al.* 1998)

Daugiausia problemų šalinant geležį iš požeminio vandens sukelia ištirpusi kompleksinių junginių formoje geležis, ypač jei bendra geležies koncentracija vandenyje viršija prisotinimo laipsnį, priklausantį nuo pH ir šarmingumo.

Apie nekompleksinių junginių formoje esančios geležies būklę vandenyje, priklausomai nuo vandens oksidacinio-redukcinio potencialo Eh ir pH dydžio, galima spręsti iš 1.13 paveikslė pateiktos diagramos (Diliūnas *et al.* 1998).



1.13 pav. Oksidacijos – redukcijos potencialo (Eh) – vandenilio jonų koncentracijos (pH) diagrama. Tipinių geležies junginių zonos

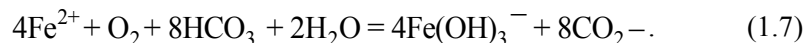
Fig. 1.13. Oxidation – reduction potential (Eh) – hydrogen ion concentration (pH) diagram. Typical iron compounds in the area

Vandens oksidacinis – redukcinis potencialas ir pH yra vieni iš svarbiausių rodiklių charakterizuojančių ne tik geležies būklę vandenyje, bet ir apsprendžiančių geležies iš požeminio vandens šalinimo technologijos parinkimą. Kaip matyti iš šios diagramos, kai vandens pH mažiau kaip 4,5, Fe vandenyje sutinkama Fe^{3+} , Fe^{2+} ir $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ jonų formoje (Alibeigi *et al.* 2008, Rajput *et al.* 2016). Kai vandens pH daugiau kaip 4,5 – divalentė geležis oksiduojasi iki trivalentės, šiai hidrolizuojantis iškrenta $\text{Fe}(\text{OH})_3$ nuosėdos. Oksidacijos greitis didėja, didėjant pH reikšmei. Redukcinėje terpėje, kai vandens pH didesnis kaip 8,4, ir vandenyje yra karbonatų, iš vandens gali išsiskirti geležies karbonatas, o esant vandens pH daugiau kaip 11,5 – divalentės geležies hidroksidas. Paprastai požeminių vandenų oksidacinis – redukcinis potencialas yra artimas nuliui, o jų pH mažesnis už 7,5. Šiose sąlygose divalentė geležis vandenyje yra tirpioje formoje ir į nuosėdas neiškrenta.

Keičiantis sistemos oksidaciniui – redukciniui potencialui ir pH, geležis iš vienos formos gali būti pervedama į kitą formą. Veikiant vandenį oksidatoriais, sistemos oksidacinis – redukcinis potencialas didėja.

Dažniausiai šio potencialo padidimui užtenka vandenį praturtinti oro deguonimi jį aeruojant.

Geležies šalinimas iš požeminio vandens pagrįstas jame vyraujančio divalentės geležies jonų (Fe^{2+}) pavertimu oksiduojant į trivalentės geležies (Fe^{3+}) jonus, kurie virsta į netirpius geležies junginius $\text{Fe}(\text{OH})_3$, kurie atsiskiria vandeniui tekant pro košiančiąją terpę (Doggaz *et al.* 2019, Mahmoud *et al.* 2019, Oliva *et al.* 2010). Požeminiame vandenyje daugiausia yra divalenčio jono forma. Geležį aeravimo įrenginio tiekiamas oro deguonis oksiduoja, pavyzdžiui, taip (Klimas *et al.* 2006):



Iš šios lygties išeina, kad 1 mg/l oksiduoti reikia 0,143 mg/l vandenyje ištirpusio deguonies.

1.4. Deguonies tirpumui įtaką darantys veiksniai

Deguonies tirpimas vandenyje – difuzinis procesas, besiplečiantis dviejų fazių sistemoje: dujos (oras) ir skystis (vanduo). Difuziniai masių mainai vyksta per fazių lietimosi paviršių. Masių mainų greitis nusakomas Fiko dėsnio:

$$\frac{dM}{dt} = -DA \frac{dC}{dy}, \quad (1.8)$$

čia dM/dt – masių mainų greitis (mase laikas⁻¹); D – difuzijos koeficientas (plotas laikas⁻¹); A – plotas, per kurį dujos difunduoja į tirpalą; dC/dy – koncentracijos gradientas.

Degunies tirpumas, jo tirpimo greitis priklauso nuo daugelio veiksnių. Įtakos turi oro burbuliukų paviršiaus plotas, degunies deficitas, vandens, prisotinto degunies, sluoksnio apie oro burbuliuką storis. Be išvardytų veiksnių, įtakos turi vandens prisotinimo degunimi koncentracija, vandens temperatūra ir jo cheminė sudėtis, slėgis bei turbulentiškumas.

Vandens prisotinimas degunimi priklauso nuo temperatūros ir degunies parcialinio slėgio, atsirandančio deguniui kontaktuojant su vandeniu.

Tirpinant degunį vandenyje, prisotinimo riba būna mažesnė. Tai įvertinama koeficientu β (Matuzevičius 1998):

$$\beta = \frac{C_S^n}{C_S^g}, \quad (1.9)$$

čia C_S^n – prisotinimo degunimi koncentracija užterštame vandenyje mg/l; C_S^g – prisotinimo degunimi koncentracija švariame vandenyje, mg/l.

Kintant atmosferos slėgiui, keičiasi prisotinimas degunimi, kuris išreiškiamas šia priklausomybe:

$$C_g = C_{S(760)} \times \frac{p_a - p}{760 - p}, \quad (1.10)$$

čia $C_{S(760)}$ – prisotinimas degunimi, kai atmosferos slėgis 760 mmHg, atsižvelgiant į temperatūrą, mg/l; p_a – atmosferos slėgis degunies tirpinimo metu, mmHg; p – vandens garų slėgis atsižvelgiant į temperatūrą, mmHg; p_a , p ir 760 vietoj mmHg gali būti matuojami Paskaliais (Pa).

Aeruojant vandenį aeratoriais, oro burbuliukas yra veikiamas slėgio, todėl kylant oro burbuliukui slėgis, palyginti su atmosferos, padidėja. Esant didesniam slėgiui, didėja vandens prisotinimo degunimi koncentracija. Aeravimo sistemose vandens temperatūra įvertinama tūrinio masių mainų koeficiento pokyčiu pagal priklausomybę:

$$KL(20\text{ }^\circ\text{C}) = KL(t) \times Kt = KL(t) [1 + 0,02(t - 20)], \quad (1.11)$$

čia t – vandens temperatūra; K – tūrinis masių mainų koeficientas.

Reikiamas tiekti oro kiekis (Matuzevičius 1998):

$$Q = q_{air} \times Q_h, \quad (1.12)$$

čia q_{air} – aeratorių skaičius; Q_h – vandens valandos debitas, m³/h.

Tikrinamas aeravimo intensyvumas I , kuris turi būti mažesnis už $I_{\max}$ ir didesnis už $I_{\min}$, ir oro kiekis, tenkantis 1 m² aeratorių paviršiaus.

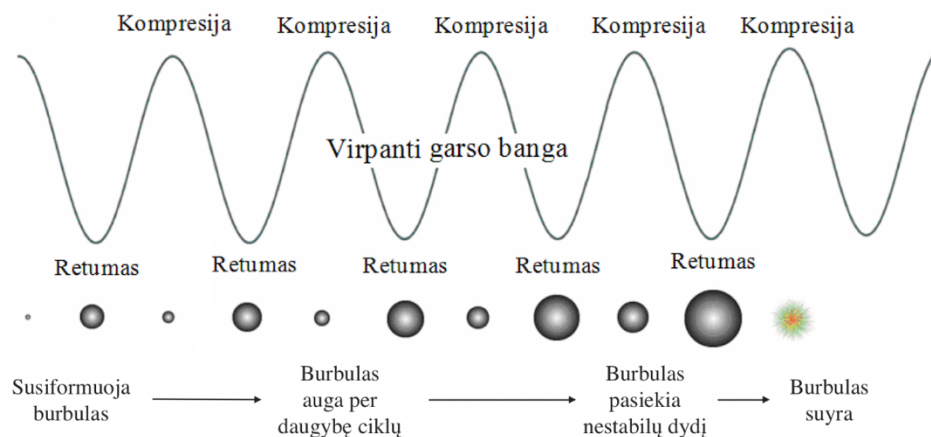
Faktinis aeravimo intensyvumas:

$$I = \frac{Q_f}{A}, \quad (1.13)$$

čia Q_f – faktinis tiekiamo oro kiekis (pagal parinktas orapūtes), m^3/h ; A – aeratorių paviršiaus plotas.

Vienas mechanizmas apima iš anksto egzistuojančius burbulus skystyje, kurie yra stabilizuojami, kad netirtų, todėl paviršius yra padengiamas organiniais teršalais.

Antras mechanizmas remiasi kietų dalelių (krislelių) egzistavimu skystyje su šiose dalelėse esančiomis dujomis. Indo sienelėse ar konteineryje, kuriame yra dujos, taip pat gali būti miniatiūrinių plyšių. Spaudimas dujinime plyšyje yra žemesnis nei išorinis skysčio slėgis. Todėl dujos difuzina į dujų kišenę, sukeldamos jos augimą. Tada susidaro burbulas, kai dujų kišenė išvyksta iš plyšio dėl spindulinių jėgų slėgio (Leong *et al.* 2011).



1.14 pav. Dujų burbulo sąveika akustiniame lauke (Leong *et al.* 2011)

Fig. 1.14 The gas bubble acoustic field interaction (Leong *et al.* 2011)

Kaip matoma (1.14 pav.), burbulas, susiformavęs vienu iš šių būdų, gali tada augti iki tol, kol pasiekia kritinį dydį vadinama jo rezonanso dydžiu. Burbulo rezonanso dydis priklauso nuo panaudoto garso lauko dažnio. Kai burbulai dėl augimo per procesus, vadinamus rektifikuota sąauga, pasiekia jų rezonanso dydį, gali pasireikšti du galimi įvykiai. Pirma, burbulas gali tapti nestabiliu ir suirti, dažnai grėsmingai, viename akustiniame cikle ar per mažą kiekį ciklų. Tai vadinama laikina kavitacija. Kita galimybė yra ta, kad burbulas virpės daugybę ciklų ties ar netoli linijinio rezonanso dydžio. Tai

vardinama stabilia kavitacija. Taip pat terminai – laikina ir stabili kavitacija – yra naudojami apibrėžti ar burbulai yra aktyvūs šviesos emisijai ar cheminėms reakcijoms (Leong *et al.* 2011).

1.5. Akustinio lauko poveikis geležies junginių sąveikai

Nuolatos yra tobulinamos akustikos technologijos generavimo schemas, vyksta darbai siekiant pagerinti šį metodą bei jo panaudojimo sritis. Keliamas klausimas apie akustinių virpesių panaudojimą vandenyje, nors šios srities teorija yra menkai ištirta. Dėl savo veikimo mechanizmo ištirti akustinio lauko poveikį įvairiose terpėse yra labai sudėtinga, nes vienu metu vyksta skirtingi procesai: kavitacijos, smūgio bangos, mikrosrautai, liuminescencija, kurie gali turėti abipusę įtaką. Todėl kyla sunkumų aprašant eksperimentinius rezultatus. Akustikos panaudojimas sustiprinant oksidacijos procesą vandenyje ir taip nusodinant stambiąsias priemaišas dar labiau išplečia šio fizikinio metodo panaudojimo sritį (Vikulin 2009).

Fizikiniai-cheminiai efektai, atsirandantys akustiniame lauke, veikiami tamprųjų vibracijų, t. y. jie atsiranda dėl mechaninių reakcijų. „Garso-cheminės reakcijos“ yra artimos radiolizei, fotolizei ir elektros iškrovoms.

Daugelio mokslininkų, kurie tyrė ultragarso poveikį cheminiams procesams, buvo įrodyta, kad veikiant akustinėms bangomis, oksidacijos reakcijos vyksta daug intensyviau. Suintensyvėja taip pat ir skilimo, organinių bei neorganinių junginių reakcijos, makromolekulių polimerizacija ir depolimerizacija ir galiausiai molekuliniai persigrupavimai.

Cheminės reakcijos, atsirandančios veikiant akustiniam laukui, yra skirstomos į tokius tipus:

1. Oksidacijos – redukcijos reakcijos tirpaluose.
2. Ištirpusių dujų kavitaciją (burbuliukų susidarymas).
3. Makromolekulių skilimo, kurios iššaukia polimerizacijos efektą.
4. Stereoizomerizacijos grandininės reakcijos.

Cheminų reakcijų suaktyvinimas akustinėms bangomis yra susijęs su akustinės kavitacijos reiškiniu, susidaro oro burbuliukai iš submikroskopinių dujų, garų branduolių esančių vandenyje iki milimetro skersmens dalelių, kurios pradeda pulsuoti akustiniai dažniu ir susijungia teigiamo slėgio fazėje.

Naudojant intensyvesnes nei $1 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ akustines bangas skystyje įvyksta kietosios terpės sprogdymas. Tuščiavidurė erdvė prisipildo skysčio garų, taip pat ir difuzinių dujų, ištirpusių skystyje ir ji virsta dvifaze sistema. Skysčiuose, kuriuose yra pakankamai daug ištirpusių dujų, kavitacijos procesas visada suaktyvina

degazacijos procesą. Daugeliu atvejų, ultragarso sukelta cheminė reakcija yra lydimą dalelių emisijos, kuriai turi įtakos įvairios medžiagos, esančios vandenyje (Rozenberga 1967).

Greitai koaguliacijai bet koks dalelių susidūrimas būna efektyvus. Šią teoriją sukūrė M. Smoluchovskis 1916 m.

Teorijos tyrimams buvo panaudotos tokios prielaidos:

1. Dispersinės fazės dalelės yra sferinės, o pačios dispersinės sistemos yra monadispersinės, tai yra vienodo dydžio dalelės.
2. Koaguliacijos greitį lemia keturi faktoriai:
 - Dalelių traukos jėgos spindulys;
 - Brauno judėjimo intensyvumas, kuris apibrėžia dalelio kiekio susidūrimą per laiko vienetą, kurį charakterizuoja difuzijos koeficientas;
 - Pradinė dalelių koncentracija;
 - Dalelės veikia tik traukos jėgos.

Šie teiginiai įrodo, kad tam tikru laiko momentu t_0 staiga dingsta dalelių atostūmio jėgos, po šio laiko tarpo bet koks dalelių susidūrimas sukelia dalelių sukibimą.

Tekant pulsuojančiam srautui kinta greitis ir slėgis. Sumažėjusio slėgio srityje iš skysčio burbuliukų pavidalu pradeda išsiskirti jame ištirpęs oras. Slėgiui toliau mažėjant, oro burbuliukai kaupiasi, jungiasi tarp savęs, jų užimama sritis didėja. Iš skysčio pradeda išsiskirti garo burbuliukai, kurie mechaniškai maišosi su oru.

Jeigu slėgis sumažėja tiek, kad esamoje temperatūroje skystis pradeda virti, tai prie vietinės kliūtis susidaro skysčio garų burbuliukų zona. Šiuos burbuliukus srautas perneša į didesnio slėgio zoną, kurioje jie kondensuojasi. Kondensacija vyksta greitai, o paliktą garo tuštumą staiga užpildo skystis. Skysčio dalelės pasiekia didelį greitį, o užkildžius burbuliukus skysta faze, jis staiga sumažėja iki nulio. Tarpusavyje susidauždamos skysčio dalelės sukuria didelius slėgius. Jeigu kondensacijos vieta yra arti kietos sienelės, tai dažni ir didelio intensyvumo hidrauliniai smūgiai, kurie veikia sienelės paviršių ir ilgainiui jį suardo eroziškai. Tie smūgiai kelia triukšmą ir virpina kietą paviršių. Toks reiškinys yra vadinamas kavitacija.

Kavitacinio skysčio tekėjimas apibūdinamas bedimensiniu parametru, vadinamu kavitacijos skaičiumi:

$$K = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \times v_1^2}, \quad (1.14)$$

čia p_1 – slėgis prieš kliūtį; p_2 – slėgis kavitacinės kavernos riboje; ρ – srauto tankis; v_1 – srauto greitis prieš kliūtį.

Diapazonas $0,1 > K < 1,0$ atitinka mažas kavitacijos skaičiaus reikšmes.

Kaip galima matyti iš formulės, kavitacijos reiškinys priklauso nuo slėgio skirtumo prieš patenkant srautui į maišymosi kamerą ir slėgio srautui esant maišymosi kameroje – kaklelyje. Taip pat priklauso nuo greičio kvadrato prieš maišymosi kamerą. Iš formulės matome, kad kavitacijos reiškinys ežektoriuje nėra pavojingas.

1.6. Pirmo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus mokslinės literatūros analizę galima padaryti tokias išvadas:

1. Atlikta mokslinės literatūros apžvalga parodė, kad yra nedaug darbų tyrinėjančių įrenginius, kurie geba užsukti oro, vandens mišinio srautą ir generuoti akustinį srautą.
2. Nustatyta, kad oro ir vandens mišinyje vykstantys hidrodinaminiai procesai yra nepakankamai ištirtinėti, ypač analizuojant bereagentinį geležies šalinimą iš vandens.
3. Mokslinėje literatūroje nepateikti bereagentinio geležies šalinimo iš vandens efektyvumo vertinimo tyrimai, kuriuose būtų lyginami tipinių bereagentinio geležies šalinimo metodų rezultatai su rezultatais naudojant akustinį srautą.

Atlikus mokslinės literatūros analizę, išryškintus probleminius klausimus bei darbo tikslą, disertaciniame darbe reikalinga išspręsti tokius pagrindinius uždavinius:

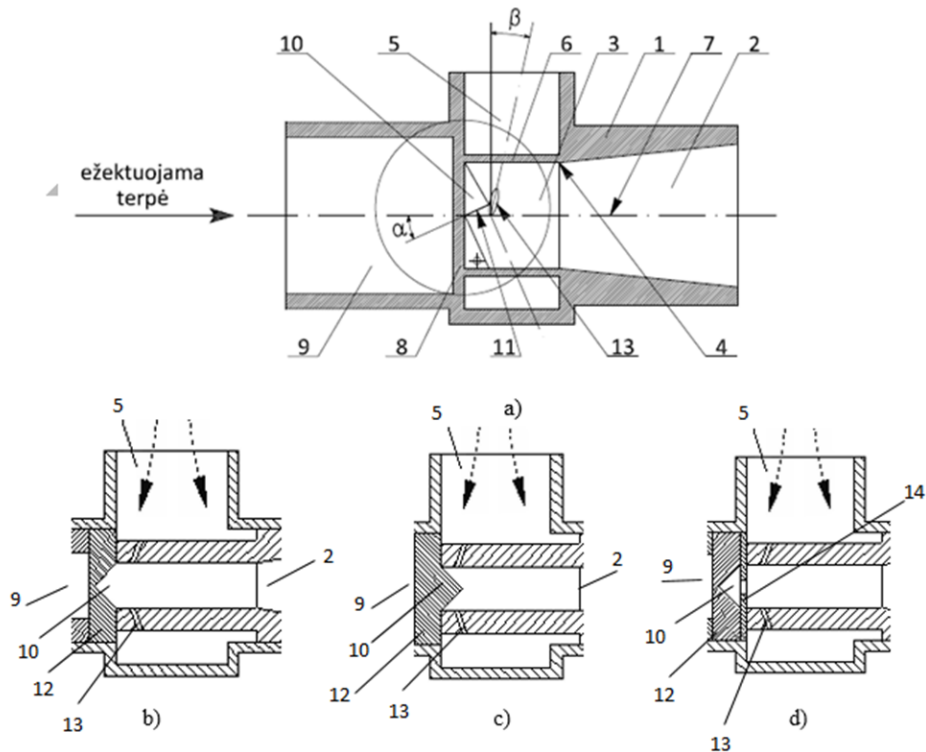
1. Išanalizuoti ir įvertinti konstrukcinius pulsuojančio srauto ežektoriuje oro ir vandens srautų hidrodinامينius parametrus.
2. Sukurti pulsuojančio srauto ežektoriaus prototipą, pagrįstą akustinio lauko generavimu, galinti suaktyvinti deguonies esančios ore tirpumą vandenyje ir geležies junginių koaguliavimąsi, kai kinta jų tekėjimo debitas.

Ežektoriaus generuojamo pulsuojančio srauto teorinis tyrimas

Skyriuje pateiktas analizinis pulsuojančio srauto tyrimas, išvesta Lithillo lygtis, analogiška plokščiosios akustinės bangos lygtiai. Skaičiavimais gauta, kad akustinis laukas siekia 152 dB dažnyje 6 Hz dažnyje, o tai tenkina koaguliacijos reikalavimus. Skaitmeninis pulsuojančio srauto modeliavimas patvirtino sukurto pulsuojančio srauto ežektoriaus tinkamumą akustinio lauko generavimui ir vandens beregentiniam valymui. Skyriaus tematika paskelbtos dvi publikacijos (Vekteris *et al.* 2017; 2018)

2.1. Analitinis pulsuojančio srauto tyrimas

Tyrimui buvo panaudotos trys ežektoriaus (2.1 pav.) modifikacijos: pirmoje modifikacijoje kūgis yra plokštelės viduje (2.1 pav. b); antroje modifikacijoje (c) kūgis yra plokštelės išorėje, trečioje modifikacijoje kūgis yra plokštelės viduje, o šalia jos yra dar viena plokštelė, kurios centre yra išgręžta skylė (2.1 pav. d). Visos šios modifikacijos yra panašios, tik tyrimo metu keičiamas difuzoriaus vidinis skersmuo ir skylių atstumas nuo difuzoriaus krašto.



2.1 pav. Pulsuojančio srauto ežektorius su skirtinga kūginės detalės padėtimi: a) schema; b) kai plokštelės viduje; c) kai plokštelės išorėje; d) kai plokštelės viduje, o šalia jos yra dar viena plokštelė, kurios centre yra išgręžta skylė: 1 – korpusas; 2 – difuzorius; 3 – žiotys; 4 – kūginė dalis; 5 – ežektuojamos terpės ertmė; 6 – sienelė; 7 – centrinė ašis; 8 – suformuotas dugnas; 9 – ežektuojamos terpės ertmė; 10 – nuožulnos; 11 – plokštuma; 12 – plokštelė; 13 – kiaurymės; 14 – papildoma plokštelė su skylė centre

Fig. 2.1. Pulsed flow ejector with different position of the conical part: a) diagram; b) when is inside the plate; c) when is on the outside of the plate; d) when is inside the plate and there is another plate next to it with a hole drilled in the center: 1 – housing; 2 – diffuser; 3 – mouth; 4 – conical part; 5 – ejected medium cavity; 6 – wall; 7 – central axis; 8 – formed bottom; 9 – cavity of ejected medium; 10 – inclined; 11 – plane; 12 – plate; 13 – holes; 14 – additional plate with hole in center

Bendru atveju klampaus skysčio judėjimas uždaroje sistemoje modeliuojamas judesio kiekio lygtimi, masės išsaugojimo dėsniu ir energijos išsaugojimo lygtimi.

Judesio kiekio lygtis užrašoma taip:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla p - \rho \nabla \Phi + \mu \nabla^2 v + (\mu + \mu') \nabla (\nabla \cdot v), \quad (2.1)$$

čia $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ – operatorius; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – Laplaso operatorius; μ' – taip vadinamas antrinis klampos koeficientas. Klampos koeficientai susieti išraiška $3\mu' + 2\mu = 0$. Φ – tūrio vieneto potencialas; p – slėgis; ρ – tankis; v – greitis.

Masės išsaugojimo dėsnis sujungia skysčio lokalinius ir konvekcinius klampus su greičio pokyčiais, divergencijos greičio vektoriaus išraiškomis pereinant nuo vienos fiksuotos erdvės prie kitos ir užrašoma vientisumo lygtimi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0, \quad (2.2)$$

energijos išsaugojimo sąlyga, kai nėra spindulinio šilumos perdavimo išreiškiama šilumokaitos lygtimi:

$$c_p \rho \frac{DT}{d\tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + q_v + \frac{Dp}{d\tau} + \mu \Phi_d, \quad (2.3)$$

čia $\frac{D}{d\tau}$ – taip vadinama substancinė išvestinė; c_p – izobarinis talpumas; q_v – vidinių šaltinių išskiriamas šilumos kiekis; λ – šilumos laidumo koeficientas; Φ_d – disipacinė funkcija:

$$\begin{aligned} \Phi_d = 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 - \\ \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2; \end{aligned} \quad (2.4)$$

būvio lygtis:

$$p = g \cdot \rho \cdot R \cdot T, \quad (2.5)$$

čia R – dujų pastovioji; T – temperatūra; g – laisvo kritimo pagreitis.

Suprastiname lygtis (2.1) ir (2.2):

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial}{\partial x_j} v_i \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial e_{ij}}{\partial x_j}; \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho v_j = 0, \quad (2.7)$$

čia $e_{ij} - (i, j)$ -oji tenzorius klampių įtempių dedamoji.

Stokso dujoms šis dydis gali būti išreikštas per greičio gradientą:

$$e_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right), \quad (2.8)$$

čia μ – dujų klampa.

Padaugindami lygtį (2.7) iš v_i ir sudedami gautą rezultatą su lygtimi (2.6) ir sujungdami panašius narius, gausime:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_i = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho v_i v_j + \delta_{ij} p - e_{ij} \right), \quad (2.9)$$

pridėdami ir išskaičiuodami dydžius $c_0^2 \partial \rho / \partial x_i$ gauname lygtį:

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + c_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = - \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i}, \quad (2.10)$$

čia $T_{ij} = \rho v_i v_j + \delta_{ij} [(p - p_0) - c_0^2 (\rho - \rho_0)] - e_{ij}$ – turbulentinių įtempių Lighthillo tenzorius; c_0 – garso greitis.

Išdiferencijavus lygtį (2.7) pagal laiką t ir panaudojus divergencijos operaciją lygčiai (2.10) bei išskaičiuojant iš vieno santykio kitą gausime Lighthillo lygtį (Lighthill *et al.* 1952):

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (2.11)$$

čia ρ' – tankio pulsacija.

Lygtis (2.11) turi banginę formą kaip lygtis aprašanti akustinį lauką generuojamą kvadrupolinio šaltinio $\partial^2 T_{ij} / \partial x_i \partial x_j$ nejudamoje terpėje.

Tokiu būdu iš šios lygties seka, kad egzistuoja tiksli analogija tarp pulsuojančio tankio ir pulsuojančio tankio mažos amplitudės, kurie nustatomi kvadrupolinių šaltinių pasiskirstymu, kai kurioje akustinėje terpėje, kurioje garso greitis lygus c_0 .

Lighthillo lygtį (2.11) galima užrašyti taip:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial m}{\partial t} - \frac{\partial F_i}{\partial x_i} - \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (2.12)$$

čia $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$, m – triukšmo šaltinis; $T_{ij} = \rho' v_i v_j + p_{ij} - c_0^2 p \delta_{ij}$ – Lighthillo tenzorius.

$$p_{ij} = p \delta_{ij} + \mu \left[-\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{2 \partial v_k}{3 \partial x_k} \delta_{ij} \right], \quad (2.13)$$

čia p_{ij} – įtempių tenzorius nuo slėgio ir klampos.

$$\delta_{ij} = 1, \text{ kai } i = j; \delta_{ij} = 0, \text{ kai } i \neq j. \quad (2.14)$$

Kadangi (2.12) lygties sprendinys nėra gautas, tai Lighthillas pasiūlė laikyti tenzorių T_{ij} žinomu ir nagrinėti (2.12) lygties dešiniąją pusę kaip užduotą. Tokiu būdu (2.12) lygtis siūloma spręsti kaip banginę lygtį su žinoma dešine puse. Tuomet lygties (2.12) sprendinys susideda iš trijų dedamųjų. Pirmoji aprašo šaltinio m skleidžiamą garsą:

$$\rho' \left(\bar{x}, t \right) = \rho' - \rho = \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_R \frac{\partial}{\partial t} m \left(\bar{y}, t - \frac{r}{c_0} \right) \frac{dS}{r'}, \quad (2.15)$$

čia $\bar{x}$, $\bar{y}$ – spinduliai-vektoriai, stebėjimo taško ir skysčio elemento dS ; $r = \left| \bar{x} - \bar{y} \right|$ – atstumas tarp taškų $\bar{x}$ ir $\bar{y}$.

Antroji dedamoji aprašo garso spinduliavimą veikiant srautą jėga F :

$$\rho' \left(\bar{x}, t \right) = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x} \int_R \frac{F_i \left(\bar{y}, t - \frac{r}{c_0} \right)}{r} dS. \quad (2.16)$$

Trečioji dedamoji aprašo turbulentinio srauto sukeltą triukšmą:

$$\rho' \left(\bar{x}, t \right) = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{x_i x_j}{r^3} \int_R \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial t^2} \left(\bar{y}, t - \frac{r}{c_0} \right) dS. \quad (2.17)$$

Lygties (2.12) sprendinys, kai $m = 0$, $F = 0$ atrodo taip:

$$\begin{aligned} \rho' = & \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_R T_{ij} \frac{dS}{r} + \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{\rho' v_i v_n - f_i}{r} ds + \\ & \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_S \frac{\partial}{\partial t} (\rho' v_n) \frac{ds}{r}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

čia f_i – jėgų projekcija į ašį x_i , kuriomis ežektoriaus vienetinis plotas s veikia į srautą; v_n – greičio normalė į paviršių visos funkcijos dešinėje lygties (2.18) pusėje skaičiuojamos laiko momentui $\tau = t - \frac{r}{c_0}$.

Kai ežektoriaus paviršius virpa savo plokštumoje, tai $v_n = 0$, tuomet iš (2.18) lygties išeina:

$$\rho'(x, t) = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_R \frac{T_{ij} dS}{r} - \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{f_i}{r} ds. \quad (2.19)$$

Esant jėgos f_i pulsacijai,

$$\rho' \approx \frac{x_i}{4\pi c_0^3 r^2} \frac{\partial F_i \left(t - \frac{r}{c_0} \right)}{\partial t}, \quad (2.20)$$

čia $F_i(t) = \int_S f_i(y, t) ds$ – suminė jėga veikianti srautą.

Šios lygtys rodo, kad formuojantis srautui triukšmas sklinda ne tik nuo ežektoriaus, bet ir dėl turbulizacijos. Todėl gautos lygtys yra svarbios skaičiuojant srauto sukeltą akustinį spinduliavimą. Esant srauto turbulizacijai tikslinga priimti, kad T_{ij} tai stacionari atsitiktinė laiko funkcija.

Gauta išraiška (2.18) galima naudoti skaičiuojant slėgio spektrą akustiniame lauke, generuojama turbulentiniu srautu, tuo atveju, kai kietos ribos neturį įtakos procesui akustiniam laukui susidaryti.

Tyrinėjant pulsuojantį srautą lygtis (2.1–2.3) užrašome cilindrinėse koordinatėse, laikydami, kad klampa pasireiškia tik esant greičių gradientui, todėl tiriamuoju atveju jos galime nevertinti, tuomet šios lygtys bus tokios:

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \omega^2 r = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (2.21)$$

$$v_r \frac{\partial \omega}{\partial r} r + v_z \frac{\partial \omega}{\partial z} r + v_r \omega = 0; \quad (2.22)$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}; \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot r \cdot v_r)}{\partial r} = 0; \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\rho \cdot c_p} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (2.25)$$

čia ω – kampinis srauto greitis.

Gautos lygtys (2.21–2.25) kartu su (2.5) lygtimi rodo laisvo sūkurių greičių pasiskirstymą $\omega r^2 = \text{const}$, o adiabatinės statinės temperatūros pagal spindulį pasiskirstymas duoda visos temperatūros pagal spindulį pastovumą. Klamos jėgos negali pakeisti šių greičių pasiskirstymo. Įrodyta, kad nei spūdimas, nei klampa negali sraute keisti potencialaus tekėjimo dėsnio – laisvo sūkurių dėsnio. Aišku, kad ir šilumos laidumas negali keisti greičio profilio.

Įrašę (2.17) lygtį į lygtis (2.21, 2.23, 2.24 ir 2.25) gauname:

$$\left\{ \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{x_i x_j}{r^3} \int_R \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial t^2} \left(y, t - \frac{r}{c_0} \right) dS \right\} \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \omega^2 r \right) = -\frac{\partial p}{\partial r}; \quad (2.26)$$

$$\left\{ \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{x_i x_j}{r^3} \int_R \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial t^2} \left(y, t - \frac{r}{c_0} \right) dS \right\} \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z}; \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial[\rho' \cdot r \cdot v_r]}{\partial r} = 0, \quad (2.28)$$

čia

$$\rho' \equiv \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{x_i x_j}{r^3} \int_R \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial t^2} \left(y, t - \frac{r}{c_0} \right) dS;$$

$$\left\{ \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{x_i x_j}{r^3} \int_R \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial t^2} \left(y, t - \frac{r}{c_0} \right) dS \right\} \left(\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{c_p} \frac{\partial p}{\partial r} \right). \quad (2.29)$$

Atitinkamas lygtis galima gauti įrašius (2.18) lygtį į lygtis (2.21–2.25).

Lygtys (2.26–2.29) atspindi pulsuojantį srautą.

Plokščios bangos lygtis:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}, \quad (2.30)$$

čia $c^2 = \frac{\gamma p_{at}}{\rho}$; γ – adiabatinis koeficientas; p_{at} – atmosferinis slėgis; ρ – tankis.

Šias lygtis galima nagrinėti įrašius ir plokščios akustinės bangos sprendinį. Plokščios akustinės bangos (2.30) sprendinys atrodo taip:

$$p = \phi_1 \left(t - \frac{z}{c} \right) + \phi_2 \left(t + \frac{z}{c} \right), \quad (2.30a)$$

čia c – garso greitis; pirmas narys – tai banga judanti teigiama kryptimi, o antras narys – banga judanti atvirkščia kryptimi.

Tipinis dalinis sprendinys bangai judant teigiama kryptimi:

$$p = p_m e^{i\omega_g \left(t - \frac{z}{c} \right)} = p_m e^{i(\omega_g t - kz)}, \quad (2.31)$$

čia p_m – garso slėgio amplitudė; ω_g – kampinis svyravimų dažnis ($\omega_g = 2\pi f$, f – svyravimų dažnis); $k = \omega_g/c$ – banginis skaičius.

Garso slėgio lygio priklausomybė nuo dažnio pateikta 2.2 paveiksle.

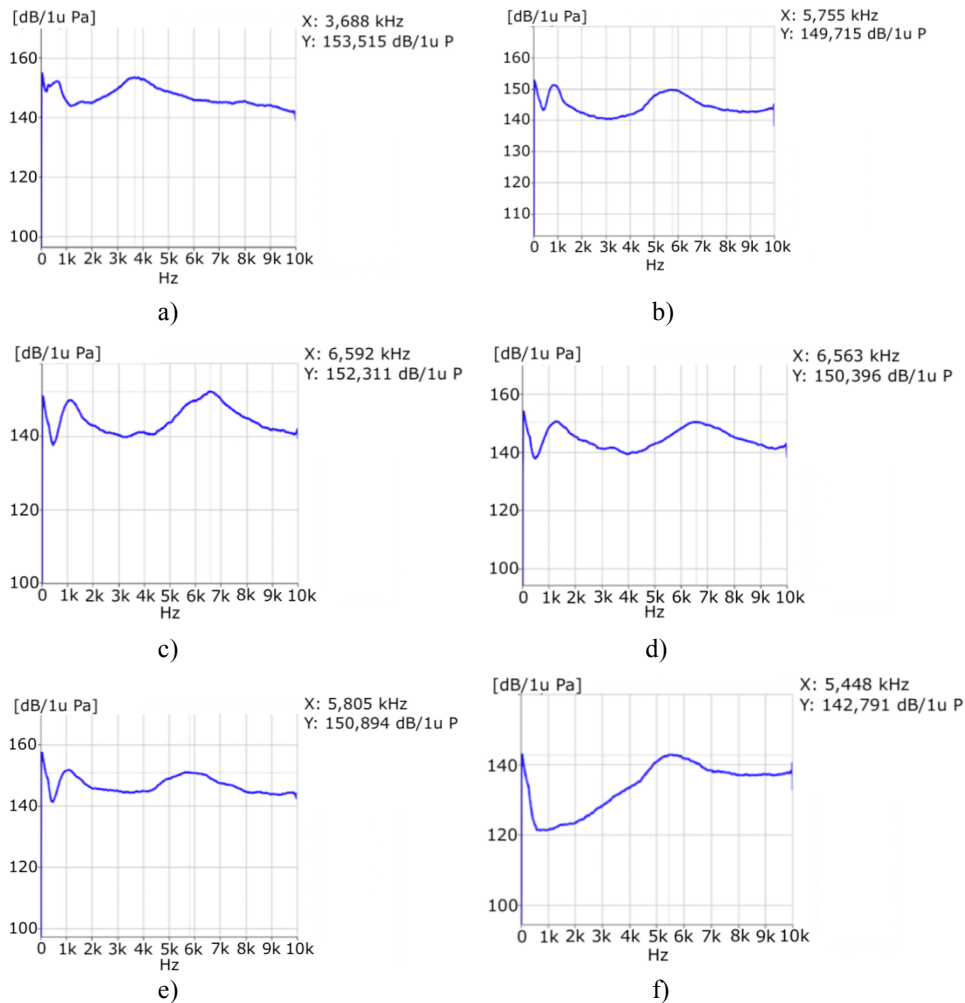
Garso slėgio lygio ribinė reikšmė siekia 152,311 dB prie 6,592 Hz dažnio.

Nagrinėjant Lighthill formulę (2.11) arba (2.12) matmenų teorijos (Lighthill *et al.* 1952) pagrindu galima gauti srauto garso galią:

$$L_W = 10 \lg \left(k_0 \frac{\rho_0^2 v_0^8 d^2}{\rho_\infty c_\infty^5} / W_0 \right), \quad (2.32)$$

čia v_0 – ištekmėjimo greitis; ρ_0 arba ρ_∞ – srauto išeinančio iš tūtos tankis ir aplinkos terpės tankis; k_0 – koeficientas svyruoja nuo $3 \cdot 10^{-5}$ iki $(1,5-2,5) \cdot 10^{-5}$; c_∞ – garso greitis vandenyje; $W_0 = 10^{-12}$ – atraminė garso galia W ; d – išėjimo tūtos skersmuo; L_W – garso galios lygis dB.

Skaičiavimais nustatyta, kad didžioji srauto akustinės energijos dalis išspinduliuoja pirmais dešimčia kalibrų t. y. $x = (0-10)d$. Akustinė galia išspinduliuojama kiekvienu vienetiniu srauto kalibru t. y. $\Delta x/d = 1$, yra pastovi visame srauto ilgyje, o pagrindiniame ilgyje sumažėja iki $dw/dx \approx x^{-6}$. Galima nustatyti, kad apie 65 % suminės akustinės galios išspinduliuojama srauto pradžioje.



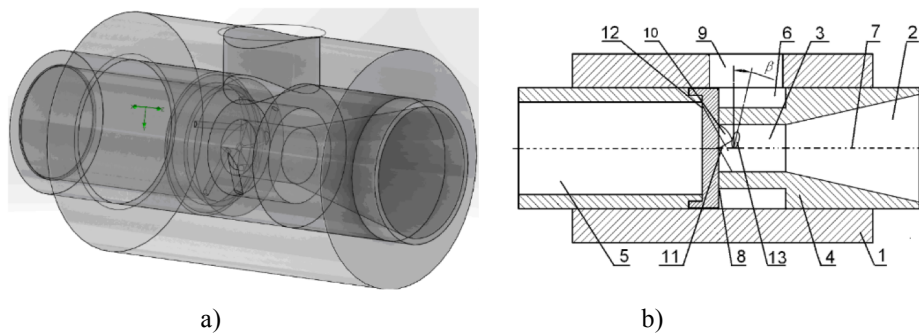
2.2 pav. Garso slėgio lygio priklausomybė nuo dažnio: a) prie 3688 Hz; b) prie 5755 Hz; c) prie 6952 Hz; d) prie 6563 Hz; e) prie 5805 Hz; f) prie 5448 Hz

Fig. 2.2. The Sound pressure level versus frequency: a) at 3688 Hz; b) at 5755 Hz; c) at 6952 Hz; d) at 6563 Hz; e) at 5805 Hz; f) at 5448 Hz

Analizuojant grafikus pateiktus 2.2 paveiksle matyti, kad garso lygio reikšmė prie 3688 Hz yra 149,715 dB, atitinkamai prie 5755 Hz yra 153,515 dB; prie 6952 Hz yra 150,396 dB; prie 6563 Hz yra 152,311 dB; prie 5805 Hz yra 150,894 dB; prie 5448 Hz yra 142,791 dB.

2.2. Pulsuojančio srauto modeliavimas

Pulsuojančio srauto ežektorius parodytas 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Tyrimo objektas: a) pulsuojančio srauto ežektoriaus erdvinis vaizdas; b) pulsuojančio srauto ežektoriaus schema: 1 – korpusas; 2 – difuzorius; 3 – žiotis; 4 – siaurėjanti kūginė dalis; 5 – ežektuojamos terpės ertmė; 6 – sienelė; 7 – ašis; 8 – žiočių dugnas; 9 – darbinio skysčio terpės ertmė; 10 – netaisyklingo trikampio nuožulniosios plokštumos; 11 – plokštuma; 12 – kiaurymės; 13 – tangentine kryptimi suformuotos kiaurymės

Fig. 2.3. The object: a) the pulsed flow ejector space view; b) the pulsed flow ejector: 1 – housing; 2 – diffuser; 3 – mouths; 4 – whip tapering part; 5 – cavity of ejected medium; 6 – enclosure; 7 – axis; 8 – mouth bottom; 9 – Working liquid medium cavity; 10 – irregular triangular pyramid slope surface; 11 – a plane; 12 – hole; 13 – formed in a direction tangential to the hole

Pulsuojančio srauto sukuriama ežektoriaus tyrimai atlikti taikant specialią programinę įrangą „SolidWorks 2011 SP2.0, Flow Simulation 2011 2.0. Build 1525“. „Flow Simulation“ naudoja Favre suvidurkintas Navjė Stokso lygtis, kuriose atsižvelgiama į turbulentinio srauto laiko vidurkio įtaką srauto parametrams. Į kitus didelio masto nuo laiko priklausančius reiškinius atsižvelgiama tiesiogiai. Šios procedūros metu lygtyse įtraukiami papildomi nariai, žinomi kaip Reinoldso įtempiai, kurie reikalauja papildomos informacijos. Modeliuojant srautą, šiai lygčių sistemai užbaigti naudojamos transporto lygtys, skirtos turbulentinei kinetinei jėgai ir jos išskaidymo koeficientui, vadinamajam $k-\epsilon$ modeliui, apskaičiuoti.

„Flow Simulation“ naudoja vieną lygčių sistemą tiek laminariniams, tiek turbulentiniam srautams aprašyti. Be to, įmanomas perėjimas iš laminarinės būsenos į turbulentinę, ir (arba) atvirkščiai. „Flow Simulation“ naudoja masės, judėjimo ir energijos išsaugojimo supaprastintas 2.1–2.3 lygtis, kurios Dekarto koordinatinių sistemoje gali būti užrašytos taip (Islam *et al.* 2013):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0; \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, i=1,2,3; \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H; \quad (2.37)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2},$$

čia u – srauto greitis; ρ – srauto tankis; S_i – išorinė masės pasiskirstymo jėga per masės vienetą; h – šiluminė entalpija; Q_H – šilumos šaltinis tūrio vienetui; τ_{ik} – klampios šlyties įtempių tenzorius; q_i – difuzinis šilumos srautas. Tariaime, kad srautas yra niutoninis skystis.

Niutoniniams skysčiams klampios šlyties įtempių tenzorius apibrėžiamas kaip

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right). \quad (2.38)$$

Remiantis Boussinesq prielaida, Reinoldso įtempių tenzoriaus išraiška yra tokia

$$\tau_{ij}^R = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (2.39)$$

čia δ_{ij} – Kronekerio delta funkcija (ji lygi vienetui, kai $i=j$, kitu atveju lygi nuliui); μ – dinaminės klampos koeficientas; μ_t – turbulentinio sūkurio klampos koeficientas; k – turbulencijos kinetinė energija (μ_t ir k , kai tekėjimas laminarinis, lygūs nuliui). Turbulentinio modelio k - ε rėmuose μ_t charakterizuojamas dviem pagrindinėmis turbulencijos savybėmis: turbulencijos kinetinė energija k ir turbulencijos disipacija ε :

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \quad (2.40)$$

čia f_μ – turbulencijos klampos faktorius. Jis apibrėžiamas taip:

$$f_\mu = \left[1 - \exp(-0,025R_y) \right]^2 \times \left(1 + \frac{20,5}{R_T} \right), \quad (2.41)$$

čia $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$; $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}$; y – atstumas iki sienos.

Ši funkcija leidžia įvertinti laminarinio ir turbulentinio tekėjimo režimų perėjimą.

Dvi papildomos pernešimo lygtys naudojamos siekiant įvertinti turbulencijos kinetinę energiją ir disipaciją:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k; \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon, \quad (2.38)$$

čia S_k ir S_ε apibrėžiama taip:

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B; \quad (2.39)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}. \quad (2.40)$$

čia P_B – turbulencijos generavimas dėl plūdumo jėgų; jis gali būti išreikštas kaip

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad (2.41)$$

čia g_i – laisvojo kritimo pagreičio komponentė x_i kryptimi; konstanta $\sigma_B = 0,9$; konstanta C_B apibrėžiama kaip: $C_B = 1$, kai $P_B > 0$, ir $C_B = 0$, kai $P_B < 0$;

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3, \quad f_2 = 1 - \exp(-R_T^2). \quad (2.42)$$

Konstantos C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε yra apibrėžtos empiriškai. „Flow Simulation“ programinėje įrangoje minėtos konstantos turi šias reikšmes:

$$C_\mu = 0,09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92, \quad \sigma_k = 1,0, \quad \sigma_\varepsilon = 1,3. \quad (2.43)$$

Kai Lewis skaičius $Le = 1$, difuzinis šilumos srautas aprašomas taip:

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.44)$$

čia konstanta $\sigma_c = 0,9$; Pr – Prandtlo skaičius; h – šiluminė entalpija.

Šios lygtys apibrėžia ir laminarinį, ir turbulentinį tekėjimus. Be to, įmanomas perėjimas iš vieno tekėjimo režimo į kitą ir atgal. Parametrai k ir μ_t yra lygūs nuliui tik tada, kai tekėjimo režimas laminarinis.

Skaičiavimo tinklelis. „Flow Simulation“ skaičiavimo tinklelis yra stačiakampis visame skaičiavimo lauke, todėl tinklelio elementų kraštinės yra statmenos nustatytoms Dekarto koordinačių sistemos ašims ir nepritaikytos kietai / skystai sąsajai. Taigi, kieta / skysta sąsaja nupjauna šalia sienelės esančius elementus. Vis dėlto, naudojant specialius matus, masės ir šilumos srautai yra apdorojami tinkamai šiuose daliniuose elementuose.

Stačiakampis skaičiavimo laukas yra konstruojamas automatiškai (gali būti pakeistas rankiniu būdu), todėl apima kietąjį kūną ir turi kraštines plokštumas, statmenas nustatytoms Dekarto koordinačių sistemos ašims. Gautas stačiakampis skaičiavimo tinklelis ir naudojamas pagrindinėms lygtims spręsti.

Erdvinės aproksimacijos. Išcentruotų baigtinių tūrių metodas (FV) yra naudojamas lokaliai patobulinto stačiakampio tinklelio pagrindinėms lygčių aproksimacijoms gauti. Pagrindinės lygtys yra integruojamos pagal kontrolės apimtį, kuri yra tinklelio elementas, ir aproksimuojamos su pagrindinių kintamųjų išcentruotų elementų reikšmėmis. Integralinės tvermės dėsniai gali būti pateikti elemento tūrio forma ir paviršiaus integraline lygtimi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int U dv + \oint F \times ds = \int Q dv \quad (2.45)$$

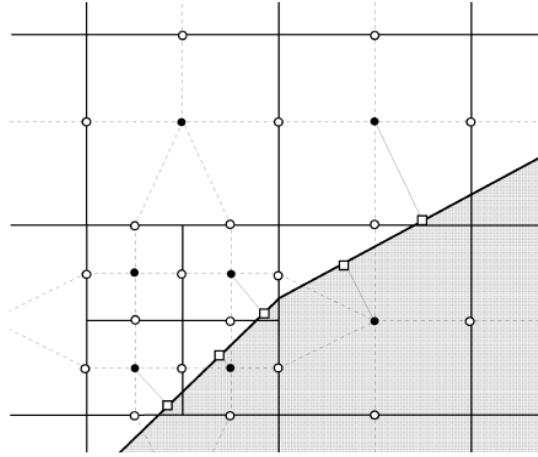
yra pakeista diskrečia forma

$$\frac{\partial}{\partial t} (Uv) + \sum_n F \times S = Qv, \quad (2.46)$$

čia n – elemento paviršių skaičius.

Srautų F antrinės priešpriešinės aproksimacijos yra pagrįstos netiesiogiai apdorotomis modifikuotomis Leonardo „greitosiomis“ aproksimacijomis (Roache 1998) ir suminio svyravimo mažėjimo (TVD – angl. *Total Variation Diminishing*) metodu.

Nagrinėdami dalinių tinklelio elementų lygtį, mes įvedame papildomus kraštinius paviršius ir atitinkamus kraštinius srautus, atsižvelgdami į kraštines sąlygas bei geometriją, ir naudojame specialią skaičiavimo procedūrą (2.4 pav.).



2.4 pav. Skaičiavimo tinklelio elementai kietosios / skystosios sąsajos metu

Fig. 2.4. Computational mesh cells at the solid / fluid interface

Skaitinio algoritmo forma. Indeksas n žymi laiko lygį, o „*“ – tarpinės srauto parametrų reikšmės. Šis skaitinis algoritmas yra naudojamas srauto parametrams pagal laiko lygmenį $(n+1)$ apskaičiuoti naudojant žinomas laiko lygmens reikšmes n :

$$\frac{U^* - U^n}{\Delta t} + A_h(U^n, p^n)U^* = S^n; \quad (2.47)$$

$$L_h \delta p = \frac{\text{div}_h(\rho u^*)}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t}; \quad (2.48)$$

$$\rho^* = \rho(p^n + \delta p, T^*, y^*), \rho u^{n+1} = \rho u^* - \Delta t \cdot \text{grad}_h \delta p; \quad (2.49)$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p; \quad (2.50)$$

$$\rho T^{n+1} = \rho T^*, \rho \kappa^{n+1} = \rho \kappa^*, \rho \varepsilon^{n+1} = \rho \varepsilon^*, \rho y^{n+1} = \rho y^*; \quad (2.51)$$

$$\rho^{n+1} = \rho(p^{n+1}, T^{n+1}, y^{n+1}), \quad (2.52)$$

čia: $U = (\rho u, \rho T, \rho \kappa, \rho \varepsilon, \rho y)^T$ yra visas pagrindinių kintamųjų kompleksas, išskyrus slėgį p , $u = (u_1, u_2, u_3)^T$ yra greičio vektorius, $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T$ yra sudedamųjų koncentracijų skysčių mišinio vektorius, o $\delta p = p^{n+1} - p^n$ yra pagalbinis kintamasis, kuris vadinamas slėgio korekcija. Šie parametrai yra diskrečios funkcijos, pateiktos elementų centruose. Jie skaičiuojami naudojant diskrečias lygtis (2.47–2.52), kurios aproksimuoja pagrindines diferencialines lygtis. 2.47–

2.52 lygtyse A_h , div_h , grad_h ir $L_h = \text{div}_h \text{grad}_h$ yra diskretūs operatoriai, kurie aproksimuoja atitinkamus diferencialinius operatorius antriniu tikslumu.

Į šį algoritmą vietoje tankio ρ įstatomas kintamas tankis:

$$\rho' \left(\bar{x}, t \right) = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{x_i x_j}{r^3} \int_R \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial t^2} \left(\bar{y}, t - \frac{r}{c_0} \right) dS \quad (2.53)$$

arba

$$\begin{aligned} \rho' = & \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_R T_{ij} \frac{dS}{r} + \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{\rho' v_i v_n - f_i}{r} ds + \\ & \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_S \frac{\partial}{\partial t} (\rho' v_n) \frac{ds}{r} \end{aligned} \quad (2.54)$$

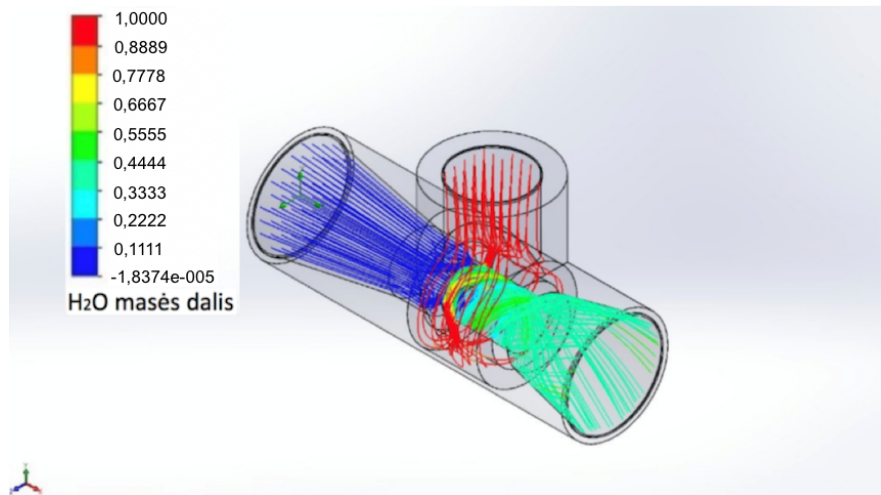
arba

$$\rho'(x, t) = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_R \frac{T_{ij} dS}{r} - \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{f_i}{r} ds. \quad (2.55)$$

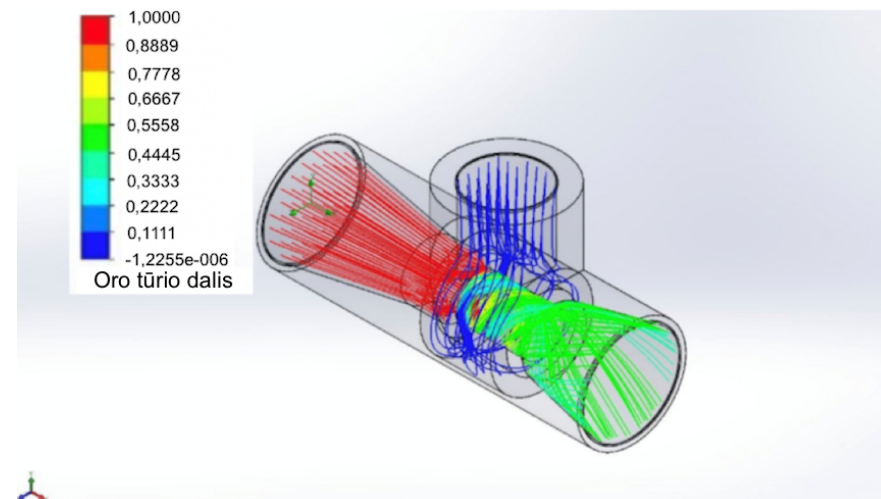
2.47 lygtis atitinka pirmąjį algoritmo veiksmą, kai visiškai numanomos diskrečios konvekcijos / išsklaidymo lygtys yra sprendžiamos tam, kad būtų gautos tarpinės judesio kiekio ir galutinės turbulentinių parametų, temperatūros ir rūšių koncentracijų reikšmės. Elipsinio tipo lygtis (2.48) yra naudojama slėgio korekcijai δp apskaičiuoti. Ši lygtis yra apibrėžiama tokiu būdu, kad galutinis judesio kiekio laukas ρu^{n+1} , apskaičiuotas 2.47 lygtimi, tenkina visiškai numanomą diskrečiąją kontinuumo lygtį. Galutinės srauto parametų reikšmės yra nustatytos 2.49–2.52 lygtimis. Modeliavimui naudojamos skysčio ir oro savybės parodytos priede B.

Uždaviniui spręsti pasirinkti ir laminarinis, ir turbulentinis srautas. Sienelės šiurkštumas Ra nustatytas $25 \mu\text{m}$, sienelės terminė sąlyga – adiabatinė. Pradinis tinkelio lygis – 8 (maksimaliai leistinas). Rezultatų rezoliucijos tankis – 8 (maksimaliai leistinas). Išsamesnės pradinės ir kraštinės sąlygos pateiktos priede.

Skaitmeninės analizės rezultatai pateikti priede bei grafiškai pavaizduoti 2.5–2.8 paveiksluose. Buvo skaičiuojamos viso srauto modelio parametų reikšmės, o ne tam tikruose konkrečiuose pjūviuose ar taškuose. Pateiktos minimalios bei maksimalios reikšmės. Taigi, galime analizuoti visos tiriamos sistemos parametų reikšmių svyravimus.

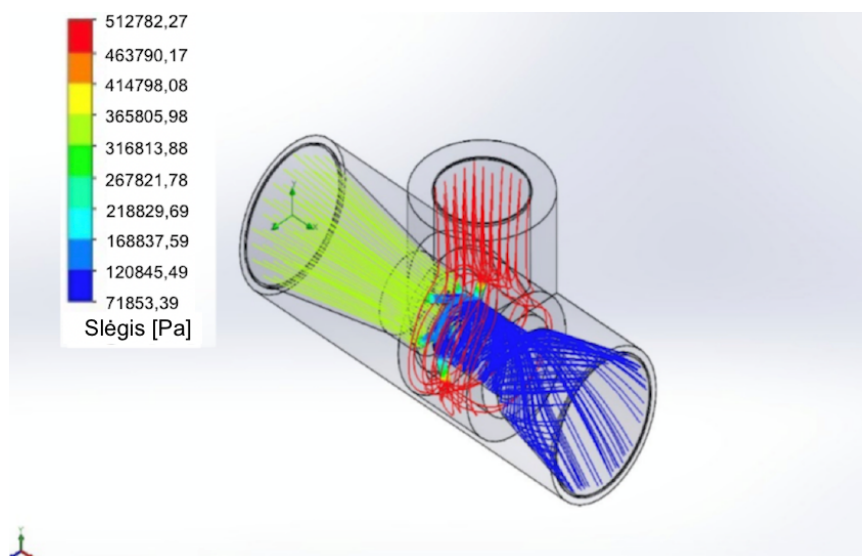


a)

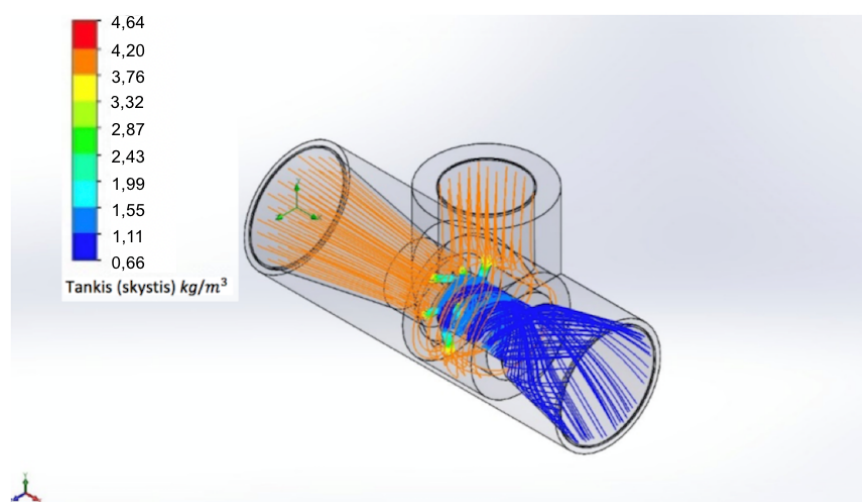


b)

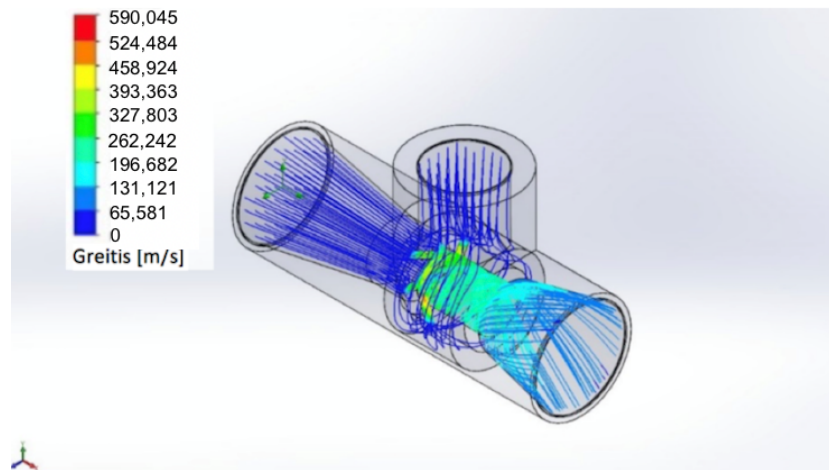
2.5 pav. Skaitmeninės analizės rezultatai: a) vandens masės dalis; b) oro masės dalis
Fig. 2.5. Results of digital analysis: a) mass fraction of water; b) air mass fraction



2.6 pav. Tiriamos sistemos slėgio pasiskirstymas sraute
Fig. 2.6. Pressure distribution in the flow of the investigated system



2.7 pav. Tiriamos sistemos srauto tankio kitimas
Fig. 2.7. Variation of flow density of the investigated system



2.8 pav. Tiriamos sistemos srauto greičio kitimas
Fig. 2.8. Variation of the flow rate of the investigated system

Kaip matome srauto slėgis maišantis orui su vandeniu (2.6 pav.) kinta nuo 0,0718 MPa iki išeinančio srauto slėgio 0,512 MPa, o srauto tankis (2.7 pav.) nuo 0,66 kg/m³ iki 4,64 kg/m³ ir srauto greitis siekia nuo 65,56 m/s iki 590 m/s (2.8 pav.).

Įrašius modeliavimo rezultatus į 2.32 formulę, gauname, kad srautas sukuria didesnę nei 100 dB akustinį lauką, tenkinantį greitosios koaguliacijos reikalavimus.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Analitiniais tyrimais įrodyta, kad nei spūdimas, nei klampa negali sraute keisti potencialaus tekėjimo dėsnio – laisvo sūkurio dėsnio, todėl tiriamuoju atveju jų galime nevertinti.
2. Analitiniai tyrimai parodė, kad gauta Lithilo lygtis analogiška plokščios akustinės bangos lygčiai, pagal kurią skaičiuojamasis akustinis laukas siekia nuo 142,791 dB iki 153,515 dB. Šie rezultatai rodo, kad pulsuojantis srautas sukuria didesnę nei 100 dB akustinį lauką, tenkinantį greitosios koaguliacijos reikalavimus.
3. Skaitiniai tyrimai parodė, kad didžiausios srauto slėgio ir tankio pulsacijos vyksta maišantis orui su vandeniu, tai sukuria išeinančio srauto slėgį iki nuo 0,0718 MPa iki 0,512 MPa, o tankį nuo 0,66 kg/m³ iki 4,64 kg/m³.

4. Analitiniai skaičiavimai parodė, kad garso galios lygis svyruoja nuo 80 dB iki 120 dB. Suprojektuotas ežektorius gali būti naudojamas bereagentiniam vandens valymui, pašalinant geležies jonus (Fe^{2+}) iš vandens.

Eksperimentiniai ežektorių ir jo srautų tyrimai

Skyriuje analizuojama pulsuojančio srauto ežektorių sukeliama akustinio lauko parametrų įtaka vandenyje esantiems geležies junginiams. Pasiūlyta pulsuojančio srauto ežektoriaus eksperimentinio tyrimo metodika ir nustatyti efektyvaus srauto generuojamo garso konstrukciniai parametrai ir akustinio lauko charakteristikos.

Ištirta vandens srauto ištirpusio deguonies kiekio koncentracija, nustatyta, kad ežektoriaus su spiralinio tipo recirkuliacinėje zonoje generuojamais sūkuriais požymiais efektyvesniu oro (deguonies) prisotinimu. Eksperimentiškai nustatyta, kad naudojant pulsuojančio srauto ežektorių su oro kamera ($d = 7,99$ mm, $l = 2,23$ mm, $V = 142,46$ mm³) geležies junginių oksidacijos procesas vyksta veiksmingiau.

Skyriaus tematika paskelbtos penkios publikacijos (Vekteris *et al.* 2011a; 2011b; 2014; Styra *et al.* 2012).

3.1. Ežektorių konstrukcijų lyginamasis eksperimentinis deguonies tirpumo skystyje tyrimas

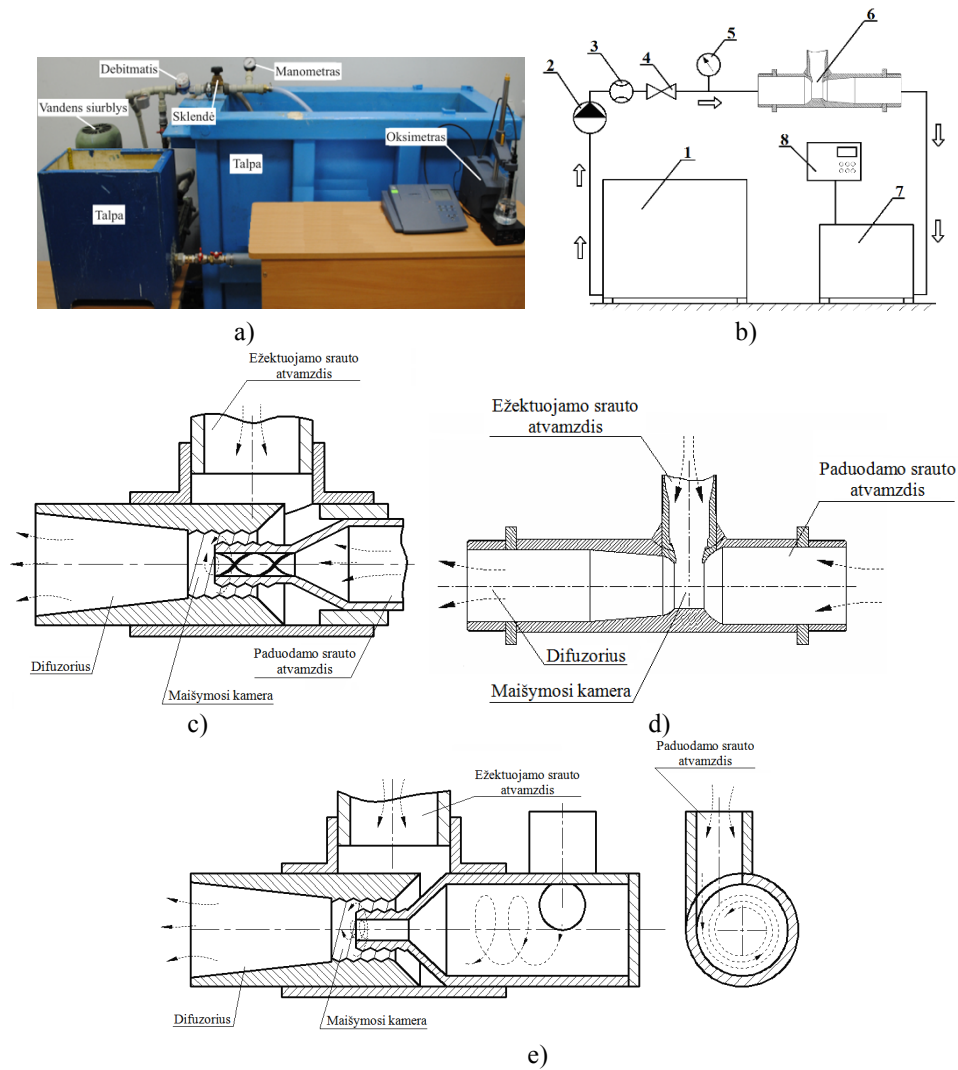
Ežektoriaus konstrukcijų lyginamojo tyrimo stendas yra dviejų fazių: dujos ir skystis sumaišymo efektyvumui nustatyti parodytas (3.1 pav.).

Matavimo priemonės, įranga ir tyrimo metodika. Tiriamos ežektorių konstrukcijos parodytos 3.1. pav., c, d, e.

Eksperimentas atliekamas naudojantis specialiai sukurtu 3.1 pav. parodytu stendu, kuris susideda iš vandens talpos 1 pirminei vandens patikrai, iš šios talpos vandens siurbliu 2 skystis (vanduo) yra tiekiamas pro debitmatį 3, pagal kurį reguliuojama sklende 4 buvo nustatomas pasirinktas paduodamo skysčio (vandens) debitas. Jis buvo tiekiamas į tyrimo objektus 6, iš kurių srautas buvo tiekiamas į talpą 7, iš kurios buvo tikrinamas vandenyje ištirpusių dujų (oro, deguonies) kiekis mg/l.

Iš oro ištirpusio deguonies kiekio matavimui ir tyrimui buvo naudojamas oksimetras inoLab Oxi 730, kurio matavimo ribos ($0 \div 200$) % O_2 , ($0 \div 19,9$) mg/l O_2 , ($0 \div 90$) mg/l O_2 ir leistinoji paklaida $\pm 0,5$ %.

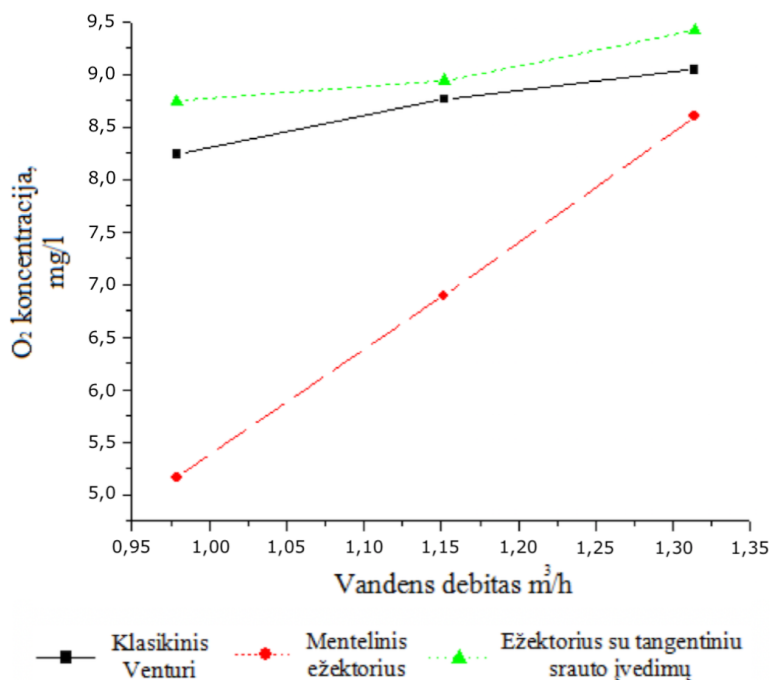
Eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas tokia seka: pirmuoju bandymu buvo fiksuojamas tiekiamo vandens ištirpusios deguonies kiekis O_2 , mg/l. Įjungus vandens siurblių pagal debitmačio rodmenis sureguliuojama sklendė ir pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 0,97 \text{ m}^3/\text{h}$. Oksimetru fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l. Pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 1,15 \text{ m}^3/\text{h}$ ir vėl fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l. Pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 1,31 \text{ m}^3/\text{h}$ ir vėl fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l. Antruoju bandymu buvo įjungiamas vandens siurblys, pagal debitmačio rodmenis sureguliuojama sklendė ir pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 0,97 \text{ m}^3/\text{h}$. Oksimetru fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l. Pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 1,15 \text{ m}^3/\text{h}$ ir vėl fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l. Pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 1,31 \text{ m}^3/\text{h}$ ir vėl fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l. Trečiuoju bandymu buvo įjungiamas vandens siurblys, pagal debitmačio rodmenis sureguliuojama sklendė ir pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 0,97 \text{ m}^3/\text{h}$. Oksimetru fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l. Pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 1,15 \text{ m}^3/\text{h}$ ir vėl fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l. Pasirenkamas vandens debitas $Q_s = 1,31 \text{ m}^3/\text{h}$ ir vėl fiksuojamas ištirpusios deguonies kiekis vandenyje O_2 , mg/l.



3.1 pav. Deguonies tirpumo skystyje eksperimentinio tyrimo stendo: a) bendras vaizdas; b) schema: 1 – talpa; 2 – vandens siurblys; 3 – debitmatis; 4 – sklendė; 5 – manometras; 6 – tyrimo objektas; 7 – talpa; 8 – oksimetras (inoLab Oxi 730); c) klasikinė Ventūri tūtos konstrukcija; d) mentelinio ežektorius konstrukcija; e) ežektoriaus su tangentine srauto įvedimu konstrukcija

Fig 3.1. The experimental test bench for oxygen solubility in liquid: a) main view; b) scheme: 1 – cap; 2 the water pump; 3 – flowmeter; 4 – valve; 5 – manometer; 6 – the subject matter; 7 – capacity; 8 – Oximeter (inoLab Oxi 730); c) Classical Venturi nozzle construction; d) Mentelinis ejector construction; e) Ejector with tangential introduction construction

Tiriant aeratorius, buvo daroma prielaida, kad sukurtos naujos konstrukcijos ežektoriai prisotins vandenį deguonimi geriau nei klasikinės konstrukcijos – Venturi vamzdis, nes ištekantio srauto aeratorių fakelo forma yra artima spiralinio sūkurio formai, kuri sukuria srauto pulsacijas pagerinančias deguonies tirpumą skystyje. Tyrimo rezultatais norima nustatyti efektyviausią ežektoriaus konstrukciją, kuri pagerins difuzinį procesą dviejų besiliečiančių fazių sistemoje: dujose ir skystyje.

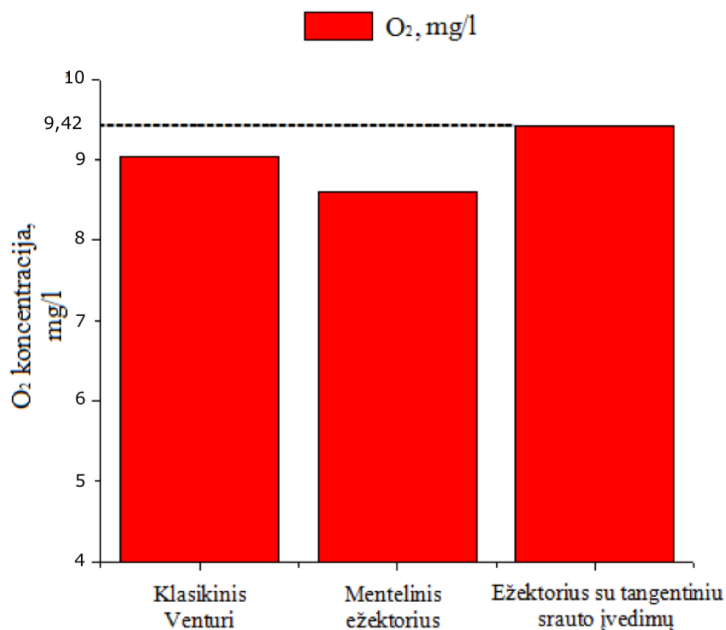


3.2 pav. Skysčio debito priklausomybė nuo deguonies koncentracijos

Fig 3.2. Fluid flow dependence on the oxygen concentration

3.2 paveiksle pateikti duomenys ežektorių deguonies tirpumo vandenyje esant trims skirtingiems vandens debitams $0,97 m^3/h$, $1,15 m^3/h$ ir $1,31 m^3/h$, kurie leidžia matyti efektyviausio aeratoriaus deguonies tirpumo priklausomybę nuo vandens debito.

Iš diagramų matyti, kad ežektorius su tangentiniu srauto įvedimu pasiekia didžiausią deguonies tirpumo efektyvumą vandenyje mg/l , esant tam pačiam skysčio debitui bei lyginant su plačiai naudojamu, klasikine konstrukcija – Venturi vamzdžiu.



3.3 pav. Ežektorių konstrukcijų deguonies tirpumo skystyje palyginimas

Fig 3.3. Ejector structures of oxygen solubility in the liquid comparison

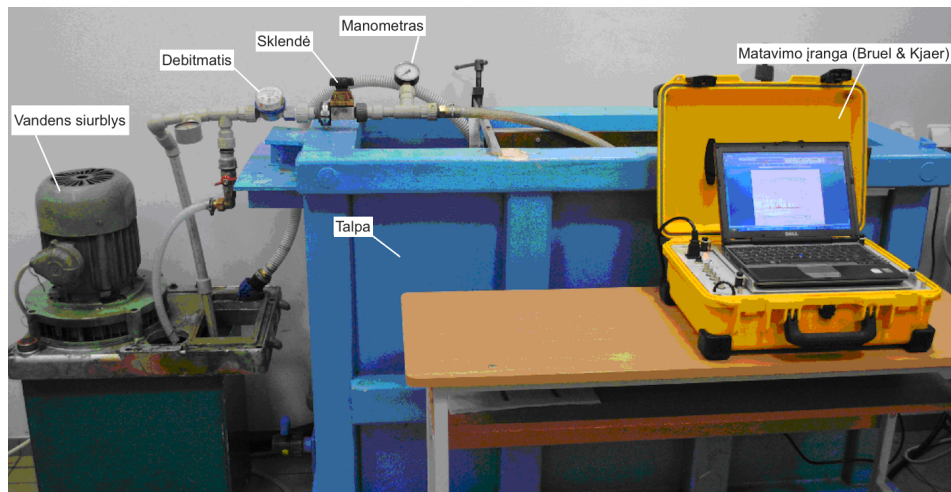
Parodyta, kad aeratorius su tangentine srauto įvedimu pasiekia didžiausią deguonies tirpumo efektyvumą vandenyje. Iš gautų diagramų galime teigti, kad ištirtų ežektorių darbas yra efektyvesnis esant didesniems darbiniais srautams, kurie siekia iki $1,31 \text{ m}^3/\text{h}$. Nustatyta, kad deguonies tirpumą skystyje pagerina aeratoriaus ištekančio srauto spiralinio sukurio forma, kuri sukuria srauto pulsacijas.

3.2. Eksperimentinis akustinį lauką generuojančių ežektorių tyrimas

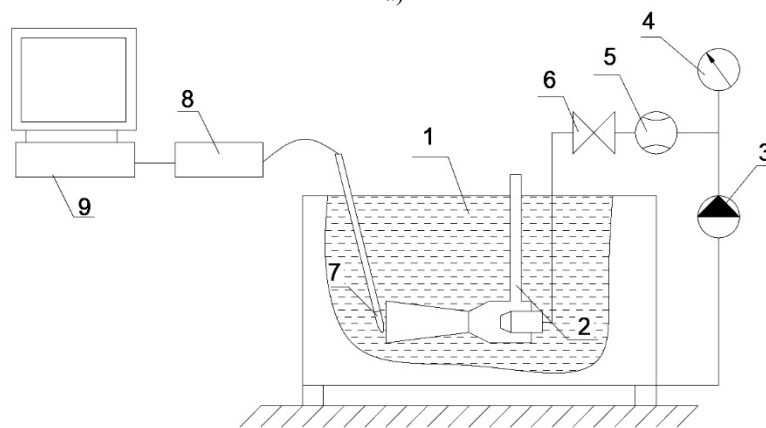
Akustinį lauką generuojančių ežektorių parodytų tyrimų stendas garso priklausomybei nuo dažnio efektyvumui nustatyti parodytas 3.4 paveiksle a, b ir tiriamieji objektai parodyti (3.5 pav., 3.6 pav., 3.7 pav.)

Pirmajam bandymui buvo sukurtas stendas parodytas 3.4 paveiksle, b. Jis sudarytas iš talpos 1, kuri yra pripildyta vandentiekio vandens. Iš talpos siurbliu 3 yra tiekiamas darbinis srautas į ežektorių 5. Darbinio skysčio slėgis matuojamas manometru 4, o debitmačiu 5 matuojamas darbinio skysčio debitas, vanduo tiekiamas per sklendę 6. Išmatuoti sklindančios akustinės bangos parametrams

buvo naudojamas hidrofonas (Briel & Kjaer) 7, o duomenys sukaupiami duomenų kaupiklyje 8 ir apdoroti kompiuteriu 9.



a)



b)

3.4 pav. Akustinį lauką generuojančių ežektorių eksperimentinio tyrimo stendo:

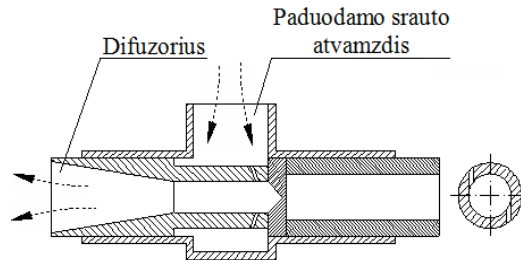
a) bendras vaizdas; b) schema: 1 – talpa; 2 – ežektorius; 3 – vandens siurblys; 4 – manometras; 5 – debitmatis; 6 – reguliuojama sklendė; 7 – hidrofonas (Briel & Kjaer); 8 – duomenų kaupiklis; 9 – kompiuteris

Fig. 3.4. The experimental test bench for acoustic field generating ejectors: a) main view; b) scheme: 1 – tank; 2 – ejector; 3 – water pump; 4 – manometer; 5 – flowmeter; 6 – adjustable valve; 7 – hydrophone (Briel & Kjaer); 8 – data collection; 9 – PC

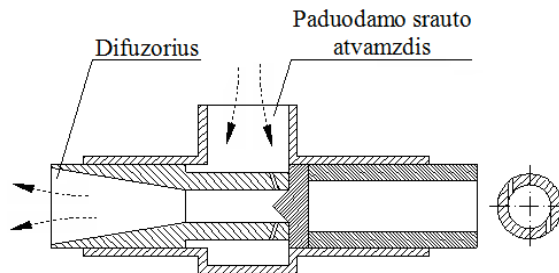
Darbinė terpė: vanduo, siurblio darbinis slėgis iki 2,5331 MPa, siurblio galia 2,2 kW, debito matavimas vyko debitmačiu (nuskaitymo ribos vizualiai),

tikslumas $0,001 \text{ m}^3$, slėgio matavimas vyksta manometru (nuskaitymas vizualinis), antra tikslumo klasė, skysčio srautas reguliuojamas sklende, akustinio lauko tyrimui naudojamu hidrofону „Bruel & Kjaer“ (matavimo paklaida $\pm 2 \text{ dB}$).

Šiam bandymui buvo sukurtos trys specialios paskirties ežektoriai. Pirmajame specialios paskirties ežektoriuje kūgis yra plokštelės viduje (3.5 pav.) Jis sudarytas iš korpuso 1, difuzoriaus 2, kuriame yra išgręžtos 2 skylutės 20° kampu tangentine kryptimi, ir plokštelės 3, kurios viduje yra kūgio formos įdubimas. Plokštelė įtvirtinama įveržus difuzorių 2.



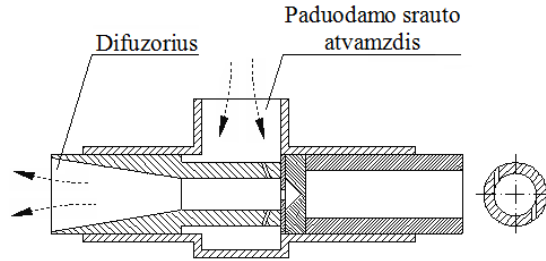
3.5 pav. Pirmasis specialios paskirties ežektorius
Fig. 3.5. The first special purpose Ejector



3.6 pav. Antrasis specialios paskirties ežektorius
Fig. 3.6. The second special purpose Ejector

Antrajame specialios paskirties ežektoriuje kūgis yra plokštelės išorėje (3.6 pav.). Jis sudarytas iš korpuso 1, difuzoriaus 2, kuriame yra išgręžtos 2 skylutės 20° kampu, tangentine kryptimi ir plokštelės 3, kurios išorėje yra kūgio formos iškilimas. Plokštelė įtvirtinama įveržus difuzorių 2.

Trečiajame specialios paskirties ežektoriuje kūgis yra plokštelės viduje, o šalia jos yra dar viena plokštelė, kurios centre yra išgręžta skylė (3.6 pav.). Ežektorius sudarytas iš korpuso 1, difuzoriaus 2, kuriame yra išgręžtos 2 skylutės 20° kampu tangentine kryptimi, plokštelės viduje yra kūgio formos įdubimas, ir šalia jos yra kita plokštelė 4, kurios centre yra išgręžta skylė. Abi plokštelės įtvirtinamos įveržus difuzorių 2.



3.7 pav. Trečiasis specialios paskirties ežektorius
Fig. 3.7. The third special purpose Ejector

Visos šios konstrukcijos yra panašios, tik eksperimento metu keičiasi difuzoriaus vidinis skersmuo ir skylių atstumas nuo difuzoriaus krašto.

Atliekant eksperimentinius tyrimus buvo naudoti tokie parametrai: vandens slėgis $P = 0,8$ MPa, vandens debitas $Q = 2,40 \times 10^{-4}$ m³/s; vandens temperatūra $t = 291,15$ K.

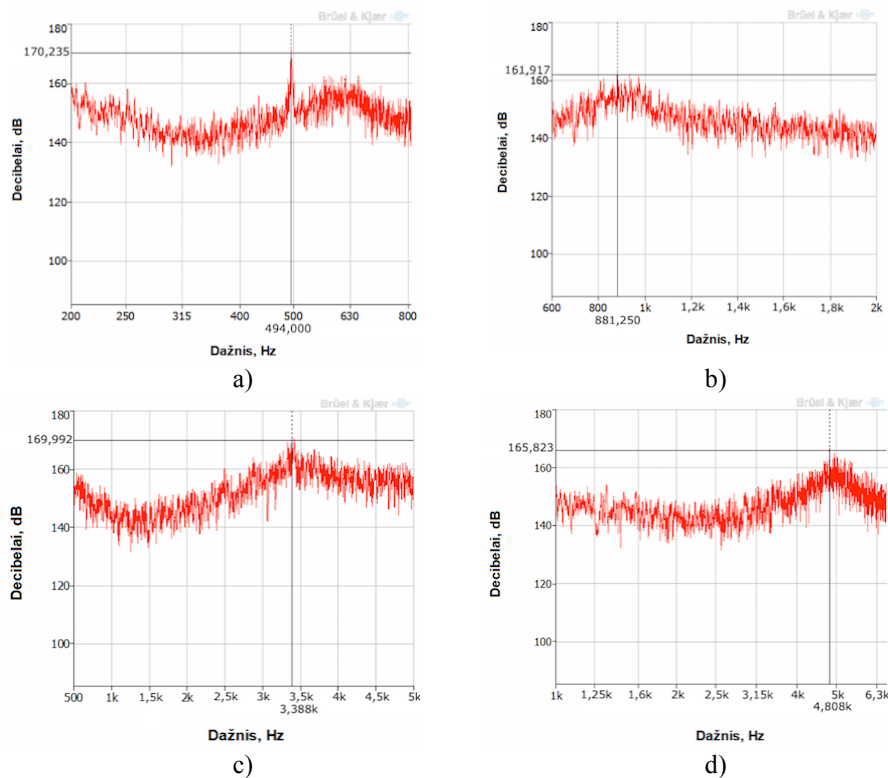
Eksperimentas buvo atliekamas tokia tvarka: įjungus vandens siurbį pagal manometro rodmenis nustatomas vandens slėgis $P = 0,6$ MPa. Panardintu į vandenį hidrofonu, kaip parodyta eksperimento stendo schemoje 3.4 pav., matuojama ežektoriuje susidariusi akustinė banga. Tuomet nustatomas vandens slėgis $P = 0,7$ MPa. Vėl panardinamas į vandenį hidrofonas ir matuojama susidariusi akustinė banga. Nustatomas vandens slėgis $P = 0,8$ MPa. Vėl panardinamas į vandenį hidrofonas ir matuojama susidariusi akustinė banga. Nustatomas vandens slėgis $P = 0,9$ MPa. Panardintu į vandenį hidrofonu matuojama susidariusi akustinė banga. Nustatomas vandens slėgis $P = 1$ MPa. Panardintu į vandenį hidrofonu matuojama susidariusi akustinė banga. Tokiu principu bandymas kartojamas visoms naujai sukurtoms ežektorių konstrukcijoms. Iš jų buvo parinkta keletas konstrukcijų, kuriose akustinės bangos rodmenys yra didžiausi.

Pirmojo bandymo gautų rezultatų analizė (3.8 pav., a, b, c, d).

Pagal paveikslą pavaizduotus garso lygio priklausomybės nuo dažnio grafiką, kur

$$\begin{aligned} L &= 10 \lg(I / I_0) \text{ arba } I = I_0 \cdot 10^{0,1L}; \\ I_0 &= 10^{-16} \text{ W/cm}^2; \\ I &= 10^{-16} \cdot 10^{0,1 \cdot 168,751}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

čia: I_0 – garso intensyvumas girdėjimo slenkstyje, L – garso intensyvumo lygis, dB.

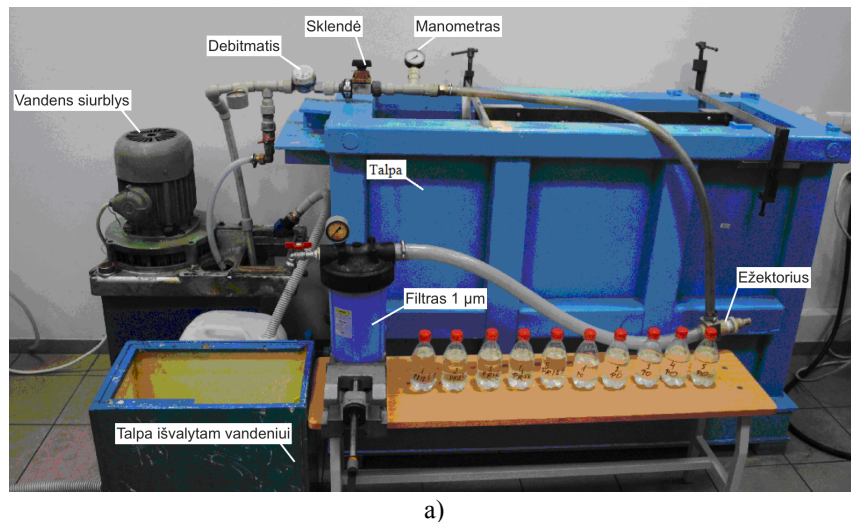


3.8 pav. Garso lygio priklausomybė nuo dažnio: a) garso lygio reikšmė prie 494 Hz; b) garso lygio reikšmė prie 881 Hz; c) garso lygio reikšmė prie 3388 Hz; d) garso lygio reikšmė prie 4808 Hz

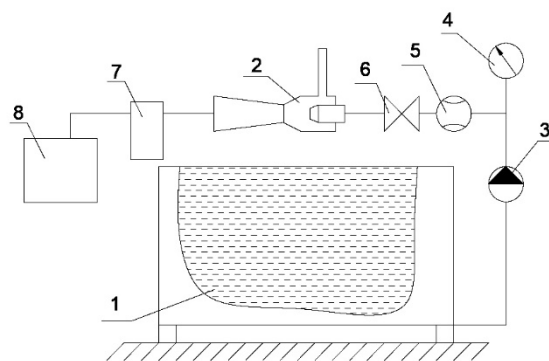
Fig. 3.8. The sound level versus frequency: a) sound level value at 494 Hz; b) sound level value at 881 Hz; c) sound level value at 3388 Hz; d) sound level value at 4808 Hz

Kad vyktų akustinė koaguliacija, turi būti garso intensyvumas ne mažesnis nei 1 W/cm^2 arba 10^{-4} W/m^2 . Taigi paskaičiavus visais penkiais variantais garso intensyvumą, galime pastebėti, kad visais variantais vyksta akustinė koaguliacija.

Antrajam bandymui buvo sukurtas 3.9 paveiksle pavaizduotas eksperimentinis stendas a) parodytas stendas, kuris sudarytas iš talpos 1, pripildytos vandentiekio vandens. Iš talpos siurbliu 3 yra tiekiamas darbinis srautas į ežektorių 5. Darbinio skysčio slėgis matuojamas manometru 4. Debitmačiu 5 matuojamas darbinio skysčio debitas. Vanduo tiekiamas per sklendę 6. Išmatuoti sklindančios akustinės bangos parametrams buvo naudojamas hidrofonas (Bruel & Kjaer) 7, o duomenys sukaupiami duomenų kaupiklyje 8 ir apdoroti kompiuteriu 9.



a)



b)

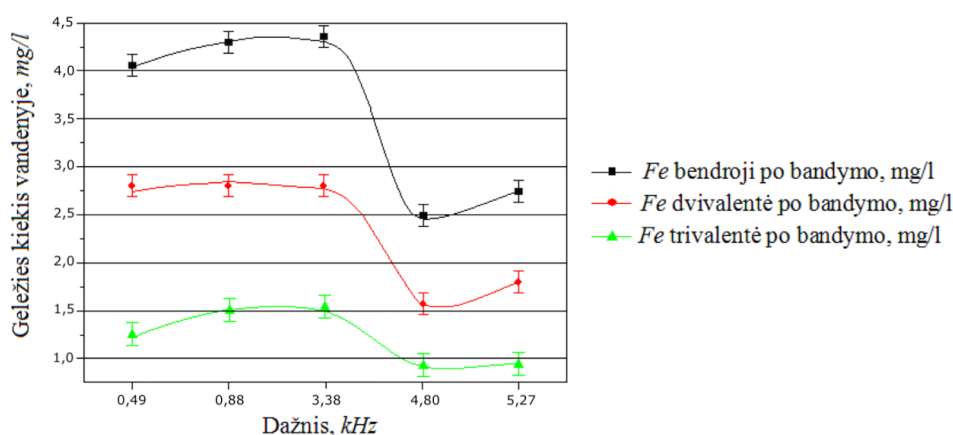
3.9 pav. Geležies junginių pokyčio vandenyje priklausomybė nuo dažnio eksperimentinio tyrimo stendo: a) bendras vaizdas; b) schema: 1 – talpa; 2 – ežektorius; 3 – vandens siurblys; 4 – manometras; 5 – debitmatis; 6 – reguliuojama sklendė; 7 – filtras 1 μm ; 8 – talpa išvalytam vandeniui

Fig. 3.9. The Experimental test of iron compounds in water and dependence to acoustic field: a) main view; b) scheme: 1 – tank; 2 – ejector; 3 – water pump; 4 – manometer; 5 – flowmeter; 6 – adjustable valve; 7 – filter 1 μm ; 8 – container for purified water

Darbinė terpė: vanduo, siurblio darbinis slėgis iki 2,5331 MPa, siurblio galia 2,2 kW, debito matavimas vyksta debitmačiu (nuskaitymo ribos vizualiai), tikslumas 0,001 m^3 , slėgio matavimas vyksta manometru (nuskaitymas vizualinis), antra tikslumo klasė, skysčio srautas reguliuojamas sklende, akustinio lauko tyrimui naudojamu hidrofonu „Bruel & Kjaer“ (matavimo paklaida ± 2 dB).

Atliekant eksperimentinius tyrimus buvo naudoti tokie parametrai: vandens slėgis $P = 0,8$ MPa, vandens debitas $Q = 0,00024$ m³/s; vandens temperatūra $t = 291,15$ K.

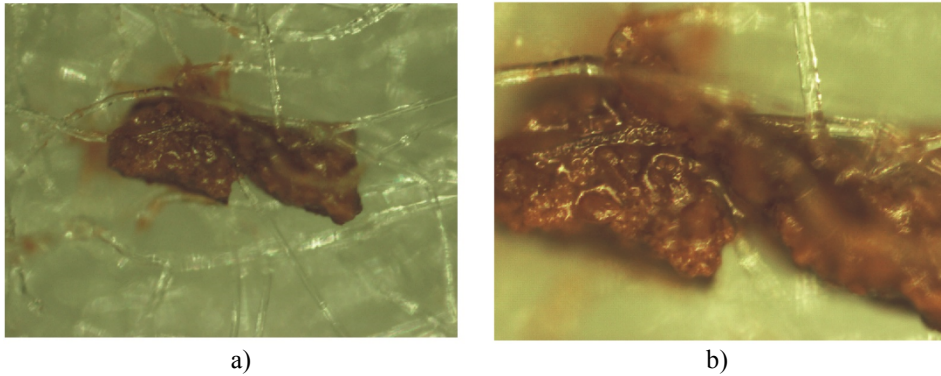
Eksperimentas atliekamas tokia tvarka: įjungus vandens siurbį, pagal manometro rodmenis nustatomas vandens slėgis $P = 0,6$ MPa. Panardintu į vandenį hidrofonu, kaip parodyta eksperimento stendo schemoje 3.8 pav., matuojama ežektoriuje susidariusi akustinė banga. Nustatomas vandens slėgis $P = 0,7$ MPa. Vėl panardinamas į vandenį hidrofonas ir matuojama susidariusi akustinė banga. Nustatomas vandens slėgis $P = 0,8$ MPa. Vėl panardinamas į vandenį hidrofonas ir matuojama susidariusi akustinė banga. Nustatomas vandens slėgis $P = 0,9$ MPa. Panardintu į vandenį hidrofonu matuojama susidariusi akustinė banga. Nustatomas vandens slėgis $P = 1$ MPa. Panardintu į vandenį hidrofonu matuojama susidariusi akustinė banga. Tokiu principu bandymas kartojamas visoms naujai sukurto ežektorių konstrukcijoms. Iš jų buvo parinkta keletas konstrukcijų, kuriose akustinės bangos rodmenys yra didžiausi.



3.10 pav. Geležies junginių pokyčio vandenyje priklausomybė nuo dažnio

Fig 3.10. Iron change in water versus frequency

3.11 paveiksle matyti, kad esant skirtingiems dažniams geležies išvalymas iš vandens yra skirtingas. Tai rodo, kad esant didesniam akustinio lauko dažniui geležies dalelės sukimba į didesnius agregatus, kurie filtruojant mechaniniu filtru lengviau pasišalina iš vandens.



3.11 pav. Geležies dalelių koaguliacija po akustinio lauko poveikio:

a) vaizdas padidintas 50 kartų; b) vaizdas padidintas 100 kartų

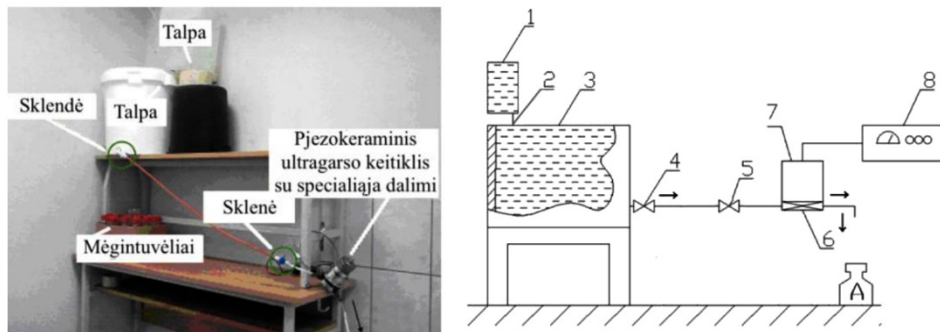
Fig. 3.11. Iron particles after the coagulation of the acoustic field effect:

a) the image is magnified 50 times; b) images a 100-fold increase

3.3. Akustinio lauko eksperimentinis tyrimas

Šiame poskyryje aprašomas išsikeltas uždavinys siekiant ištirti garso daromą įtaką ištirpusiems vandenyje geležies junginiams, tyrimo standas pateiktas 3.12 paveiksle.

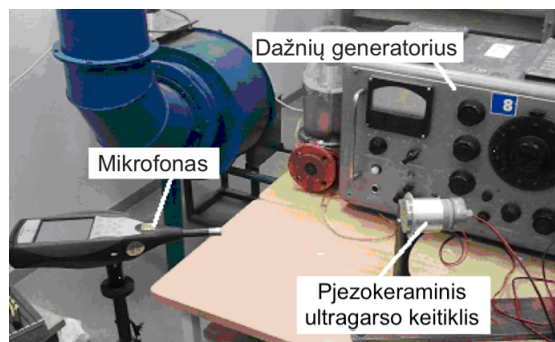
Matavimo priemonės, įranga ir tyrimo metodika. Ištirti garso daromą įtaką ištirpusios vandenyje, bendrosios geležies koaguliacijos procesams, buvo sukonstruotas eksperimentinis standas (žiūrėti 3.12 pav.), kurį sudaro vandens talpykla 1, skirta pastoviam vandens lygiui palaikyti, kad debitas išliktu pastovus. Ji panardinta į pagrindinę vandens talpyklą 3, iš kurios išteka srautas atsukus sklendę 4. Pirmasis mėginys, dar nepaveiktas garso bangų, bus paimtas į mėgintuvėlį „A“. Šio mėgintuvėlio turinys bus ištirtas ir nustatytas divalentės, tivalentės, bei bendroji geležies koncentracija vandenyje. Kiti mėginiai bus veikiami garso bangomis. Vanduo pratekės pro specialiąją pjekokeraminio ultragarso keitiklio dalį 6, kur bus paveiktas pjekokeraminio ultragarso keitiklio 7, kuris bus prijungtas prie dažnių generatoriaus 8. Galiausiai paveiktas vanduo ištekės į mėgintuvėlį „A“. Nustatyti kokį poveikį divalentėi ir trivalentėi geležiai daro akustinės bangos buvo naudojami skirtingi garso dažniai nuo 8 kHz iki 20 kHz. Iš vandens talpyklos (3), skirtingais debitais 0,083 l/min, 0,350 l/min ir 0,850 l/min vanduo tekėjo sukonstruotu stendu. Pirmas vandens mėginys dar nepaveiktas garso bangomis buvo paimtas į mėgintuvėlį (A), kad nustatyti geležies kiekį prieš bandymą. Kiti vandens mėginiai jau paveikti garso bangomis buvo paimti į 15 likusių mėgintuvėlių.



3.12 pav. Akustinio lauko eksperimentinio tyrimo stendo: a) bendras vaizdas; b) schema: 1 – vandens talpa pastoviam lygiui palaikyti; 2 – vamzdis jungiantis abi talpas; 3 – pagrindinė vandens talpa; 4, 5 – sklendės; 6 – specialioji dalis; 7 – ultragarsinis keitiklis; 8 – stiprintuvas; A – mėgintuvėliai

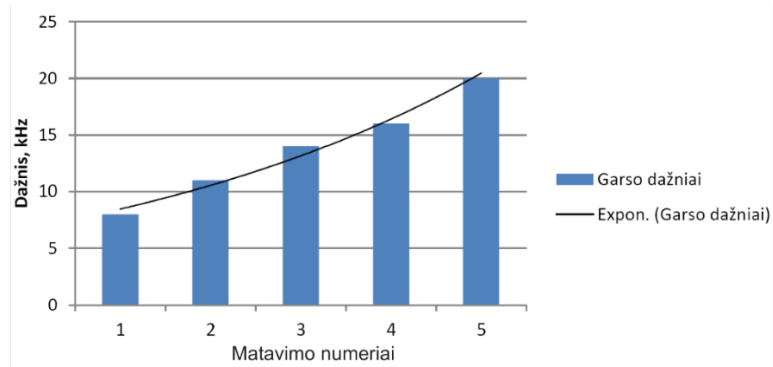
Fig. 3.12. The Experimental test of acoustic field: a) main view; b) scheme: 1 – water tank for stable liquid level; 2 – tube; 3 – main water tank; 4, 5 – valve; 6 – special piezoceramic part; 7 – ultrasound transducer; 8 – amplifier; A – test tubes

Virpesių matavimo sistema matuoja ir fiksuoja virpesius sensoriumi, kuris įmontuotas akustinio lauko zonoje. Programine įranga analizuojami sensoriaus užfiksuoti virpesių dažniai ir amplitudės laiko atžvilgiu. Iš gautų duomenų ir jų analizės išvedami akustinio lauko parametrai.



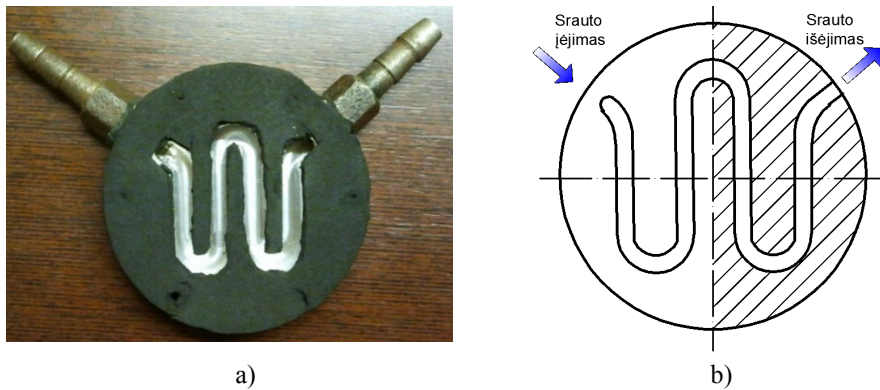
3.13 pav. Pjezokeraminio ultragarso keitiklio garso slėgio charakteristikų matavimo stendas

Fig. 3.13. Sound pressure characteristics of piezoceramic ultrasonic transducer measuring stand



3.14 pav. Garso dažnių eksponentinė kitimo kreivė

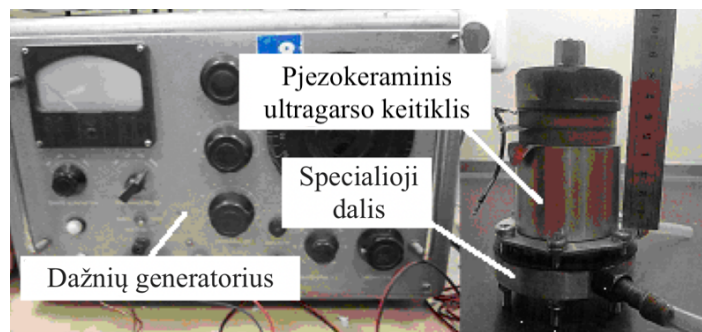
Fig. 3.14. Sound frequency exponential curve



3.15 pav. Pjezokeraminio ultragarso keitiklio specialioji dalies:

a) bendras vaizdas; b) schema

Fig. 3.15. Piezoceramic ultrasonic transducer special part: a) main view; b) scheme



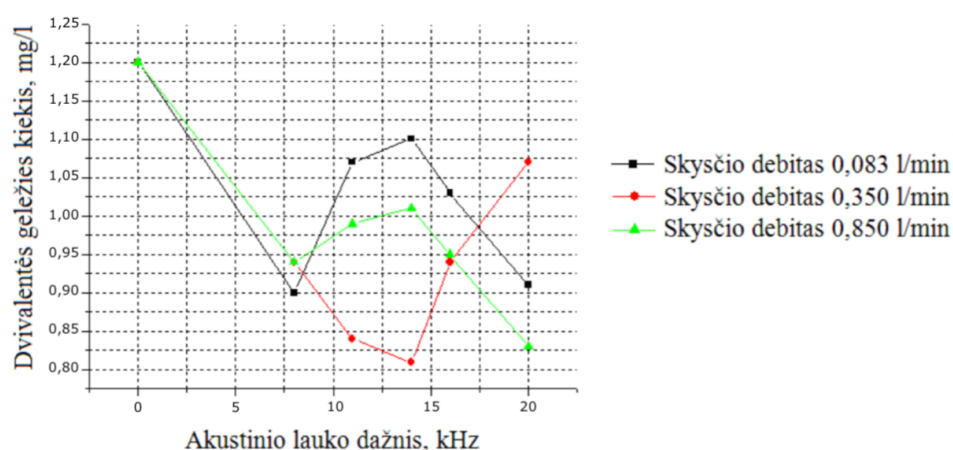
3.16 pav. Akustinio lauko eksperimentinio tyrimo įranga

Fig. 3.16. Acoustic field experimental research equipment

Atliekami tyrimai su minimaliu debitu 0,083 l/min. Sureguliuojamas debitas, atsukamas kranelis. Matuojamas debitas, neužsukant kranelio paimamas 1-as mėginys nepaveiktas ultragarso bangų. Tuomet nustatomas garso dažnis (8 kHz) 2-as mėginys; nustatomas garso dažnis (11 kHz) 3-as mėginys; nustatomas garso dažnis (14 kHz) 4-as mėginys; nustatomas garso dažnis (16 kHz) 5-as mėginys; nustatomas garso dažnis (20 kHz) 6-as mėginys; užsukamas kranelis. Atliekami tyrimai su vidutiniu debitu. 0,350 l/min. Sureguliuojamas debitas, atsukamas kranelis. Matuojamas debitas, nustatomas garso dažnis (8 kHz) 7-as mėginys; nustatomas garso dažnis (11 kHz) 8-as mėginys; nustatomas garso dažnis (14 kHz) 9-as mėginys; nustatomas garso dažnis (16 kHz) 10-as mėginys; nustatomas garso dažnis (20 kHz) 11-as mėginys; užsukamas kranelis. Atliekami tyrimai su maksimaliu debitu 0,850 l/min. rezultati pateikti (3.17 ir 3.18 pav.).

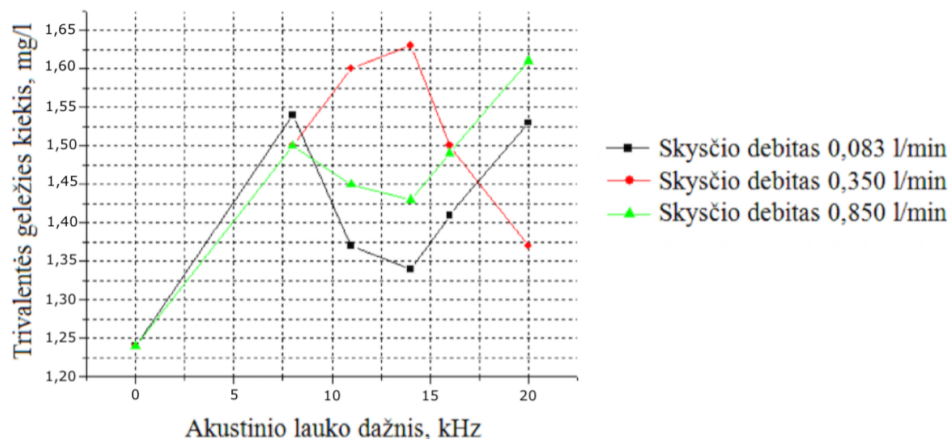
Sureguliuojamas debitas, atsukamas kranelis. Matuojamas debitas, nustatomas garso dažnis (8 kHz) 12-as mėginys; nustatomas garso dažnis (11 kHz) 13-as mėginys; nustatomas garso dažnis (14 kHz) 14-as mėginys; nustatomas garso dažnis (16 kHz) 15-as mėginys; nustatomas garso dažnis (20 kHz) 16-as mėginys; užsukamas kranelis.

Mėgintuvėlių turinys buvo ištirtas laboratorijoje ir nustatyti bendrosios, divalentės ir trivalentės geležies kiekiai. Bendrosios geležies kiekis sudarė 2,44 mg/l.



3.17 pav. Divalentės geležies kiekio kitimas vandenyje, esant skirtingam skysčio greičiui ir garso dažniui

Fig. 3.17. Ferrous Flow water at different fluid speed of sound frequency



3.18 pav. Trivalentės geležies kiekio kitimas vandenyje, esant skirtingam skysčio greičiui ir garso dažniui

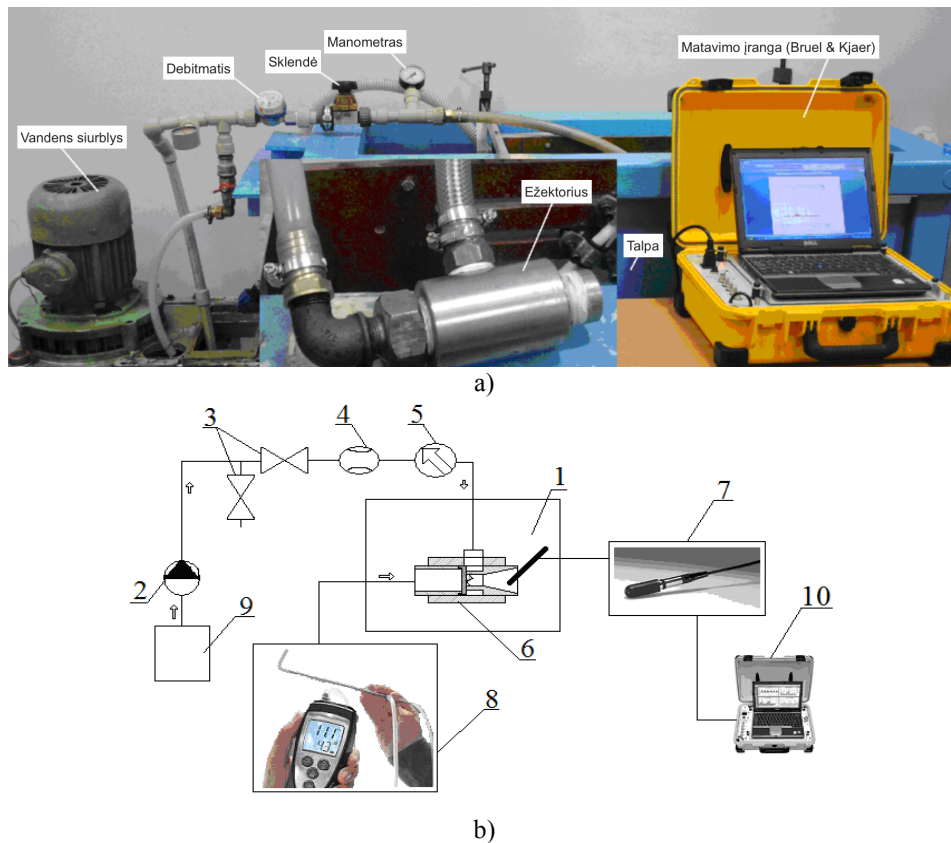
Fig. 3.18. Ferric Flow water at different fluid speed of sound frequency

Eksperimento metu buvo nustatytas divalentės (Fe^{2+}) ir trivalentės geležies (Fe^{3+}) kiekis vandenyje esant skirtingam skysčio tekėjimo greičiui ir garso dažniui. Iš eksperimente gautų rezultatų matyti, kad divalentės geležies (Fe^{2+}) virsmui į trivalentės geležies (Fe^{3+}) netirpias nuosėdas įtaką daro skysčio debito ir akustinio dažnio santykis. Didžiausias oksidacijos efektas pasiektas prie 0,350 l/min skysčio debito esant 14 kHz dažniui. Taip pat 3.16–3.17 paveiksluose matome, kad prie kitų skysčio debitų geležies junginių virsmas nuo 14 kHz proporcingai didėja didinant akustinio lauko dažnį. Todėl galime daryti prielaidą, kad didinant akustinio lauko dažnį esant 0,850 l/min vandens debitui galima tikėtis efektyvesnės oksidacijos.

3.4. Pulsuojančio srauto ežektoriaus eksperimentiniai tyrimai

Pulsuojančio srauto ežektoriaus eksperimentinis stendas pateiktas 3.19 ir 3.20 paveiksluose.

Ir pulsuojančio srauto ežektoriaus oro kameros eksperimentinių tyrimų, ir pulsuojančio srauto ežektoriaus sukuriama akustinio lauko efektyvumo tyrimo metu buvo eksperimentiškai nagrinėjamas pulsuojančio srauto ežektorius prieš aktyvavimą ir po aktyvavimo.



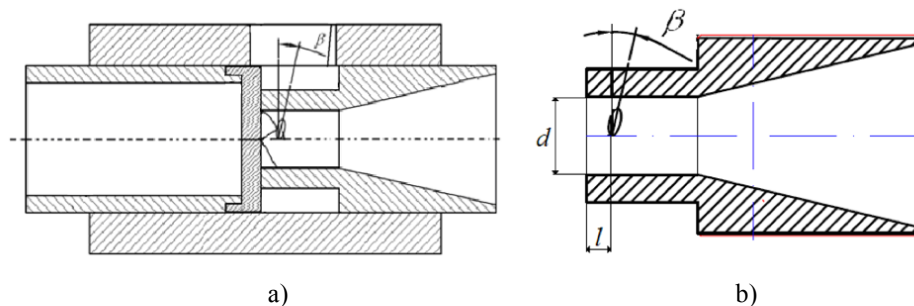
3.19 pav. Pulsuojančio srauto ežektoriaus eksperimentinio tyrimo stendo: a) bendras vaizdas; b) schema: 1 – talpa; 2 – vandens siurblys; 3 – vožtuvai; 4 – debitmatis; 5 – manometras; 6 – ežektorius; 7 – hidrofonas TC 4013; 8 – manometras su „Pito“ vamzdeliu; 9 – talpa su geležingu vandeniu; 10 – „Brüel&Kjaer“ triukšmo ir vibracijų analizatorius Type 9727 su kompiuteriu Dell

Fig. 3.19. The Experimental test of Pulsed flow ejector: a) main view; b) scheme: 1 – capacity; 2 – the water pump; 3 – valves; 4 – flowmeter; 5 – manometer; 6 – Ejector; 7 – a hydrophone TC 4013; 8 – manometer with “Pete” tube; 9 – capacity with ferruginous water; 10 – Brüel & Kjaer noise and vibration analyzer Type 9727 with a Dell computer

Akustinio lauko ciklone matavimams buvo naudojama Brüel & Kjaer virpesių matavimo sistema „Type 9727“. Ji sudaryta iš mašinų diagnostikos įrankių dėžės, universalios programinės įrangos „Type 7910“, daugiakanalio duomenų bloko „Type PULSE 3560-B“, nešiojamojo „Dell“ kompiuterio bei hidrofono „TC 4013“ (3.18 pav.).

Įrenginys mechaniškai veikia kai darbinio skysčio srautas veikiant slėgiui tiekiamas į žiočių ertmę kur yra įsukamas, dėl tangentine kryptimi išdėstytų skylių žiočių sienelėje ir nukreipiamas į žiočių dugną. Papildoma įsukto darbinio srauto turbulencija sukurama dėl dugne esančių iškilimų. Neigiamas slėgis susidaro netaisyklingo trikampio pasvirusios piramidės formos iškilimų siauriausioje jų plokštumoje ties skylę jungiančia žiotis su ežektuojamos terpės ertme. Per šią kiaurymę patenka ežektuojamas srautas, kuris susimaišo su darbinio skysčiu. Pasikeitus dinaminio ir statinio slėgių santykiui užsuktas srautas pradeda tekėti difuzoriaus link, uždarydamas darbinio skysčio patekimą pro skylę į žiotis, o tai sumažina statinį slėgį, todėl vėl atsidaro skysčio tekėjimas tangentine kryptimi išdėstytomis skylėmis į žiočių ertmę. Procesas gali kartotis nuo 1 iki 20,0 kHz. Tai sudaro geras sąlygas dvejų terpių susimaišymui, o iškilimų išdėstymas žiočių dugne didėjančia nuo žiočių centro link sienelės radialinės krypties linkme, užtikrina tolygų ežektuojamos terpės patekimą į žiočių ertmę, kai yra kintamas darbinio skysčio tekėjimo debitas.

Buvo išmatuotas pulsuojančio srauto ežektoriaus kuriantis akustinis fonas, su skirtingais oro kameros turiais, keičiant konstrukcijos specialiąsias dalis (3.20 pav.). Oro kameros tūriai prieš aktyvavimą pateikti 3.1 lentelėje.



3.20 pav. Pulsuojančio srauto ežektoriaus:

a) schema; b) kameros specialiosios dalies schema

Fig. 3.20. Pulsating flow ejector: a) scheme; b) Chamber scheme of special part

3.1 lentelė. Pulsuojančio srauto ežektoriaus oro kameros ilgiai l ir diametrai d

Table 3.1. Pulsating flow ejector air chamber length l and diameter d

Kameros diametras d , mm	Kameros ilgis l , mm	Kameros tūris V , $1 \cdot 10^{-3}$
6,00	3,88	142,46
	4,88	276,88
	5,88	429,41
	6,88	583,35

Vėliau buvo suaktyvintas pulsuojančio srauto ežektorius ir išmatuotas akustinis fonas jame. Pulsuojančio srauto ežektoriaus skleidžiamas akustinio triukšmo lygis yra stabilus visame garso diapazone prie skirtingo tūrio oro kamerų ir sudaro $\sim 175 \text{ dB} \pm 15 \text{ dB}$.

Išmatavę pulsuojančio srauto ežektoriaus akustinio lauko stiprumą perėjome prie pulsuojančio srauto ežektoriaus geležies junginiams vandenyje efektyvumo nustatymo. Tiekiant oro srautą iš talpos (3.19 pav.) su geležingu vandeniu (9) vandens siurblio (2) pagalba per vožtuvus (3), debitmatį (4), manometrą (5) į ežektorių (6). Eksperimento metu buvo imami vandens mėginiai per vožtuvą (3) prieš akustinio lauko poveikį ir po akustinio lauko poveikio.

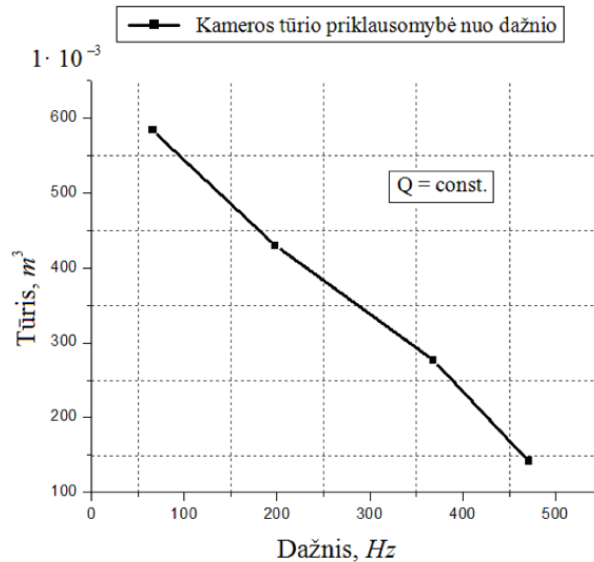
Eksperimento metu buvo gauti skirtingi akustinio lauko dažniai. Tada buvo imami mėginiai paveikus ir nepaveikus akustinio lauko bangomis. Eksperimento tikslumui užtikrinti vandens tyrimų laboratorijoje buvo paruošti mėgintuvėliai su druskos rūgštis (HCL) tirpalu. Tokiu būdu buvo yra užfiksuojamas divalentės (Fe^{2+}) geležies kiekis, kuriam nustatyti buvo pilama 0,1 litro mėginio (3.19 pav.). Po eksperimento mėginiai buvo pristatyti į sertifikuotą vandens tyrimų laboratoriją.

Eksperimento metu laboratoriniams tyrimams buvo paimti 16 skirtingų mėginių:

- Pirmas mėginys prieš pradedant eksperimentą: vanduo nepaveiktas ultragarso bangomis.
- Penki mėginiai po garso poveikio (8, 11, 14, 16, 20 kHz) dažnio bangomis, naudojant vandens debitą 0,083 l/min.
- Antras tyrimo punktas pakartojamas su tais pačiais garso dažniais tik naudojant didesnius vandens debitus 0,350 l/min ir 0,850 l/min.

Į tyrimo stendą įstatomas pulsuojantis ežektorius su oro kameros tūriu $V = 142,46 \text{ mm}^3$. Įjungiamas vandens siurblys ir pagal apsisukimus per minutę sureguliuojamas vandens debitas $Q_s = 0,16 \text{ l/s}$. Su Bruel & Kjaer virpesių matavimo sistema „Type 9727“ fiksuojamas akustinio lauko dažnis. Paimamas vandens mėginys nepaveikus akustinio lauko bangomis. Paimamas vandens mėginys paveikus akustinio lauko bangomis. Eksperimentas kartojamas esant skirtingiems pulsuojančio ežektoriaus kameros tūriams ($276,88 \text{ mm}^3$; $429,41 \text{ mm}^3$; $583,35 \text{ mm}^3$; $737,29 \text{ mm}^3$). Įstatomas pulsuojantis ežektorius su pakeistos oro kameros tūriu $V = 142,46 \text{ mm}^3$. Įjungiamas vandens siurblys ir pagal apsisukimus per minutę sureguliuojamas vandens debitas $Q_s = 0,23 \text{ l/s}$. Su Bruel & Kjaer virpesių matavimo sistema „Type 9727“ fiksuojamas akustinio lauko dažnis. Paimamas vandens mėginys nepaveikus akustinio lauko bangomis. Paimamas vandens mėginys paveikus akustinio lauko bangomis. Eksperimentas kartojamas esant skirtingiems pulsuojančio ežektoriaus kameros tūriams ($276,88 \text{ mm}^3$; $429,41 \text{ mm}^3$; $583,35 \text{ mm}^3$; $737,29 \text{ mm}^3$). Įstatomas pulsuojantis ežektorius su pakeistos oro kameros tūriu $V = 142,46 \text{ mm}^3$. Įjungiamas vandens

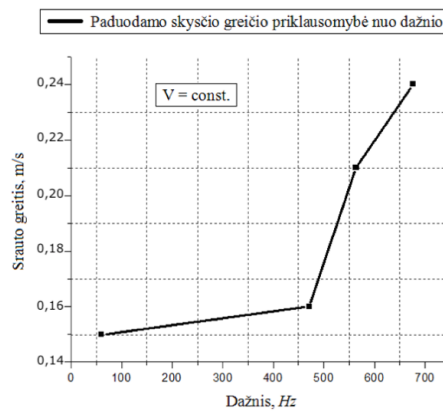
siurblys ir pagal apsisukimus per minutę sureguliuojamas vandens debitas $Q_s = 0,26$ l/s. Su Bruel & Kjea virpesių matavimo sistema „Type 9727“ fiksuojamas akustinio lauko dažnis. Paimamas vandens mėginys nepaveikus akustinio lauko bangomis. Paimamas vandens mėginys paveikus akustinio lauko bangomis. Eksperimentas kartojamas esant skirtingiems pulsuojančio ežektoriaus kameros tūriams ($276,88 \text{ mm}^3$; $429,41 \text{ mm}^3$; $583,35 \text{ mm}^3$; $737,29 \text{ mm}^3$).



3.21 pav. Pulsuojančio srauto ežektoriaus kameros tūrio priklausomybė nuo dažnio prie pastovaus darbinio skysčio debito

Fig. 3.21. Pulsating flow ejector chamber volume versus frequency at a constant flow rate of working fluid

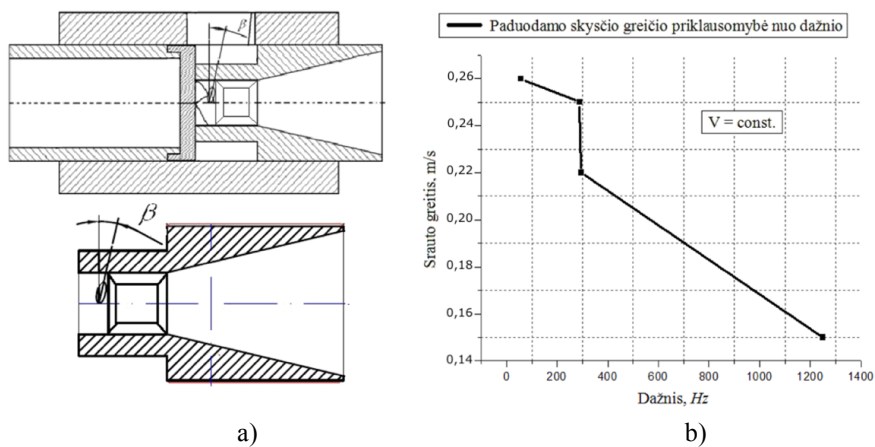
Iš gautų pulsuojančio srauto ežektoriaus eksperimento rezultatų, pavaizduotų 3.21 paveiksle, matome, kad didėjant oro kameros tūriui mažėja sukuriama akustinio lauko dažnis. Nustatyta, kad mažinant kameros tūrį, t. y. atstumą nuo žioties, didėja sukeliama pulsacijos dažnis. Taip pat 3.22 paveiksle matome, kad didėjant paduodamo srauto greičiui didėja sukuriama akustinio lauko dažnis esant pastoviam pulsuojančio srauto ežektoriaus oro kameros tūriui.



3.22 pav. Pulsuojančio srauto ežektoriaus darbinio srauto priklausomybė nuo dažnio prie pastovaus kameros tūrio

Fig. 3.22. Pulsating flow ejector working flow versus frequency at a constant volume of the chamber

3.23 paveiksle matyti, kad darbiniam srautui tekant nuo žiočių dugno difuzoriaus link dėl papildomos įvorės didėja statinis slėgis ir proporcingai mažėja dinaminis slėgis, taip sumažinamas įtekančio srauto debitas. Todėl sukuriama pulsaciją galima keisti priklausomai ne tik nuo darbinio srauto greičio, bet ir nuo papildomos įvorės dydžio.



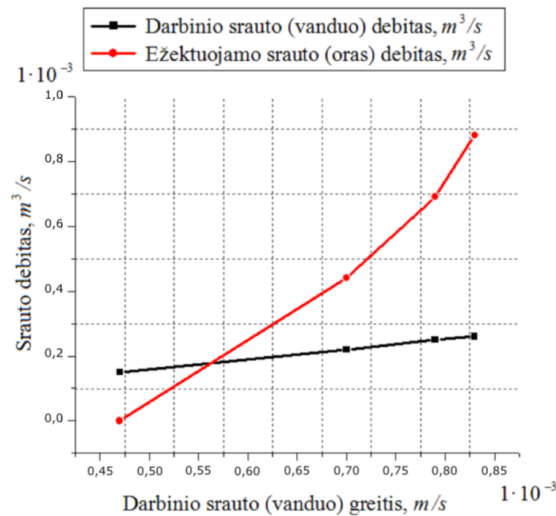
3.23 pav. Pulsuojančio srauto ežektorius su įvore: a) konstrukcijos schema ir specialioji kameros dalis; b) darbinio srauto priklausomybė

Fig. 3.23. Pulsed flow ejector with sleeve: a) construction diagram and special part of the chamber; b) working flow versus frequency at a constant volume

Siekiant nustatyti prie kokio pulsuojančio srauto ežektoriaus akustinio lauko dažnio vyksta efektyviausias divalentės (Fe^{2+}) ir trivalentės (Fe^{3+}) geležies kiekio vandenyje kitimas, buvo sukurtas eksperimentinis stendas.

Bandymas buvo atliktas pagal schemą (3.21 pav.) su geležingu vandeniu keičiant pulsuojančio srauto ežektoriaus oro kameros tūrį ($142,46 \text{ mm}^3$; $276,88 \text{ mm}^3$; $429,41 \text{ mm}^3$; $583,35 \text{ mm}^3$; $737,29 \text{ mm}^3$) ir paduodamo vandens srauto debitą.

Eksperimento metu buvo gauti skirtingi akustinio lauko dažniai. Tada buvo imami mėginiai paveikus ir nepaveikus akustinio lauko bangomis. Eksperimento tikslumui užtikrinti vandens tyrimų laboratorijoje buvo paruošti mėgintuvėliai su druskos rūgštis (HCL) tirpalu. Tokiu būdu buvo yra užfiksuojamas divalentės (Fe^{2+}) geležies kiekis, kuriam nustatyti buvo pilama 0,1 litro mėginio. Po eksperimento mėginiai buvo pristatyti į sertifikuotą vandens tyrimų laboratoriją.

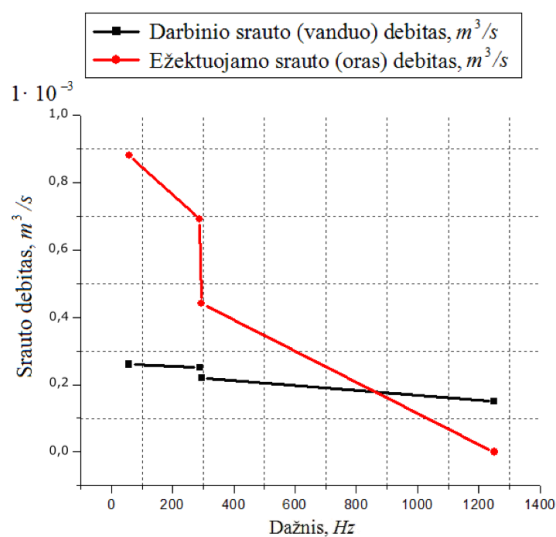


3.24 pav. Pulsuojančio srauto ežektoriaus mišinio debito priklausomybė nuo darbinio srauto tekėjimo greičio

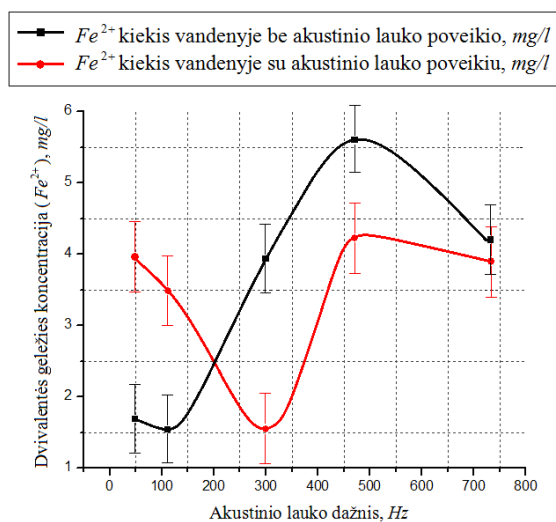
Fig. 3.24. Pulsating flow ejector mixture flow dependence working stream flow rate

Iš gautų rezultatų (3.24 pav.) kameroje matome mišinio santykį ir galime teigti, kad kameroje susidariusio mišinio savybės yra artimos dujų savybėms.

Iš šios priklausomybės matome (3.25 pav.), kad keičiant darbinio srauto tekėjimo greitį galime gauti reikiamą pulsaciją ir ežektuojamos terpės oro kiekį.

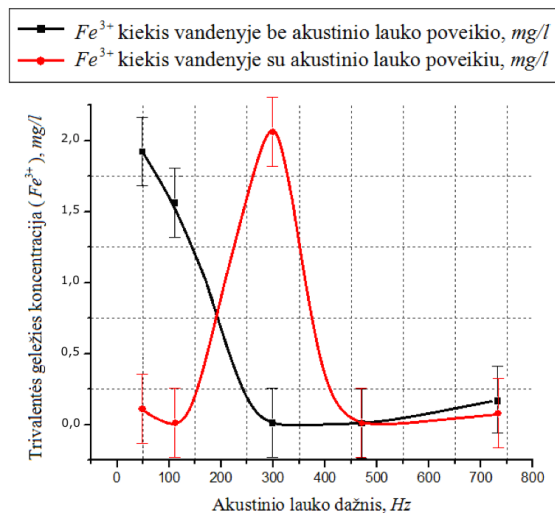


3.25 pav. Srautų mišinio debito priklausomybė nuo dažnio
Fig. 3.25. Streams flow versus frequency



3.26 pav. Divalentės geležies kiekio vandenyje priklausomybė
nuo akustinio lauko dažnio
Fig. 3.26. Ferrous iron in water dependence on the frequency of the acoustic field

Iš eksperimente gautų rezultatų (3.26 pav.) matome vandenyje esančios divalentės geležies (Fe^{2+}) kiekio priklausomybę prieš akustinio lauko poveikį ir po akustinio lauko poveikio, kurį sukuria pulsuojančias srautas. Nustatyta, kad pulsuojančio srauto ežektorius su $429,41 \text{ mm}^3$ oro kameros tūriu sukuriamas akustinio lauko dažnis 300 Hz divalentę geležį (Fe^{2+}) oksiduoja į trivalentę (Fe^{3+}).



3.27 pav. Trivalentės geležies kiekio vandenyje priklausomybė nuo akustinio lauko dažnio

Fig. 3.27. Trivalent iron in water dependence on the frequency of the acoustic field

Iš eksperimente gautų rezultatų (3.27 pav.) matome vandenyje esančios trivalentės geležies (Fe^{3+}) kiekio priklausomybę prieš akustinio lauko poveikį ir po akustinio lauko poveikio, kurį sukuria pulsuojančias srautas. Nustatyta, kad pulsuojančio srauto ežektorius su $583,35 \text{ mm}^3$ oro kameros tūriu sukuriamas akustinio lauko dažnis 49 Hz trivalentę geležį (Fe^{3+}) redukuoja į divalentę (Fe^{2+}). Taigi galime daryti prielaidą, kad pulsuojančio srauto ežektoriuje vyksta akustinės kavitacijos reakcija.

Eksperimento metu po akustinio lauko poveikio perfiltravus per 1 mikrono filtrą taip pat buvo paimti geležies dalelių mėginiai, kurie buvo tiriami mikroskopu. Cheminių reakcijų aktyvinimas akustinėmis bangomis yra susijęs su akustinės kavitacijos reiškiniu, kurio metu susidaro submikroskopinio dydžio oro burbuliukai vandenyje esančių iki milimetro skersmens, kurie pradeda pulsuoti, kai yra akustinis dažnis, ir susijungia teigiamo slėgio fazėje.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Esant mažesniai negu 200 Hz pulsuojančio srauto dažniui, prasideda trivalentės geležies junginių (Fe^{3+}) redukcija. Todėl, galime daryti prielaidą, kad pulsuojančio srauto ežektoriuje vyksta akustinės kavitacijos reakcija, kuri taip pat mažina deguonies kiekį vandenyje.
2. Eksperimentiškai nustatyta, kad didinant paduodamo srauto greitį didėja ir sukuriama akustinio lauko dažnis esant pastoviam pulsuojančio srauto ežektoriaus oro kameros tūriui.
3. Eksperimentiškai nustatyta, kad vandenyje esantys dvivaletės (Fe^{2+}) geležies junginiai efektyviausiai oksiduojasi paveikti akustinėmis bangomis kurių dažnis nuo 300 Hz iki 470 Hz. Taip pat buvo nustatyta, kad didinant dažnį iki 740 Hz, dvivaletės (Fe^{2+}) geležies junginių oksidavimosi efektyvumas mažėja iki 80 %.

Bendrosios išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą, nustatyta, kad yra atlikta daug tyrimų, kuriuose ežektoriai naudojami oro vandens srautams maišyti. Tačiau tyrimų, kuriuose būtų analizuojamas ežektorių pritaikymas bereagentiniam geležies šalinimui iš vandens, neaptikta.
2. Darbe atlikti analitiniai tyrimai parodė, kad gauta Lithilo lygtis analogiška plokščios akustinės bangos lygčiai, pagal kurią skaičiuojamasis akustinis laukas siekia nuo 142,791 dB iki 153,515 dB. Gauti rezultatai tenkina greitosios koaguliacijos reikalavimus, nes gautos reikšmės yra didesnės už 100 dB.
3. Skaitiniai tyrimai parodė, kad ežektuojamo srauto slėgio ir tankio didžiausios pulsacijos vyksta maišantis orui su vandeniu. Tai sukuria išeinančio srauto slėgį nuo 0,0718 MPa iki 0,512 MPa, ir tankį nuo $0,66 \text{ kg/m}^3$ iki $4,64 \text{ kg/m}^3$. Slėgio ir tankio pulsacija generuoja akustinį lauką. Jo veikiami netirpūs geležies junginiai sąveikauja tarpusavyje, sukimba, sustambėja ir pasunkėja. Tada geležis, veikiamą gravitacinių jėgų, nusėda.
4. Pasiūlyta ir aprobuota naujos konstrukcijos ežektoriaus eksperimentinio tyrimo ir divalentės geležies virsmo į trivalentę metodika,

įvertinanti akustinio lauko parametrų įtaką koaguliacijos procesui. Nustatyta, kad sukeliamas akustinio lauko pulsacijos dažnis didėja sumažinus pulsuojančio srauto ežektoriaus oro kameros tūrį, t. y. mažinant kiaurymių atstumą iki žioties, esant vienodam kameros skersmeniui. Tokiu būdu galima reguliuoti akustines bangas, kuriomis paveikti vandenyje esantys divalentės (Fe^{2+}) geležies junginiai oksiduojasi, kai akustinių bangų dažnis yra virš 300 Hz. Atitinkamai, akustinių bangų dažniui esant žemiau 200 Hz, vyksta trivalentės geležies junginių (Fe^{3+}) redukcija.

5. Eksperimentiškai nustatyta, kad didėjant paduodamo srauto greičiui didėja sukuriama akustinio lauko dažnis esant pastoviam pulsuojančio srauto ežektoriaus oro kameros tūriui. Taip pat buvo nustatyta, kad sukuriamą pulsaciją efektyviausiai veikia vandenyje esančią divalentę geležį (Fe^{2+}) kai oro kameros tūris yra 429,41 mm³.

Literatūra ir šaltiniai

- Akita, K., Yoshida, F. 1974. Bubble Size, Interfacial Area, and Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 13, 84–91. <https://doi.org/10.1021/i260049a016>
- Albrektienė, R., Rimeika, M. 2017. Efficiency of Removal of Iron, Manganese, Ammonium and Organic Matter from Groundwater, in: *Proceedings of 10th International Conference "Environmental Engineering."* Presented at the Environmental Engineering, VGTU Technika, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.067>
- Albrektienė, R., Rimeika, M., Tamulaitienė, B., Voišnienė, V. 2017. Technology for treatment of groundwater simultaneously containing iron, manganese, ammonium and organic matter. *Journal of Water Supply Research and Technology* 66, 665–672. <https://doi.org/10.2166/aqua.2017.017>
- Alibeigi, S., Vaezi, M. R. 2008. Phase Transformation of Iron Oxide Nanoparticles by Varying the Molar Ratio of $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$. *Chemical Engineering & Technology* 31, 1591–1596. <https://doi.org/10.1002/ceat.200800093>
- Ammari, H., Zhang, H. 2017. Effective Medium Theory for Acoustic Waves in Bubbly Fluids near Minnaert Resonant Frequency. *SIAM Journal on Mathematical Analysis* 49, 3252–3276. <https://doi.org/10.1137/16M1078574>
- Besagni, G., Brazzale, P., Fiocca, A., Inzoli, F. 2016a. Estimation of bubble size distributions and shapes in two-phase bubble column using image analysis and optical

- probes. *Flow Measurement and Instrumentation* 52, 190–207. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.10.008>
- Besagni, G., Gallazzini, L., Inzoli, F. 2018. Effect of gas sparger design on bubble column hydrodynamics using pure and binary liquid phases. *Chemical Engineering Science* 176, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.10.036>
- Besagni, G., Guédon, G. R., Inzoli, F. 2016b. Annular Gap Bubble Column: Experimental Investigation and Computational Fluid Dynamics Modeling. *Journal of Fluids Engineering* 138, 011302. <https://doi.org/10.1115/1.4031002>
- Besagni, Giorgio, Inzoli, F., De Guido, G., Pellegrini, L. A. 2017. The dual effect of viscosity on bubble column hydrodynamics. *Chemical Engineering Science* 158, 509–538. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.003>
- Besagni, G., Inzoli, F., De Guido, G., Pellegrini, L. A. 2017. Gas holdup and flow regime transition in spider-sparger bubble column: effect of liquid phase properties. *Journal of Physics: Conference Series* 796, 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/796/1/012041>
- Besagni, G., Inzoli, F., De Guido, G., Pellegrini, L. A. 2016c. Experimental investigation on the influence of ethanol on bubble column hydrodynamics. *Chemical Engineering Research and Design* 112, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.06.009>
- Billant P., Chomaz J. M., Huerre P. 1998. Experimental study of vortex breakdown in swirling jets. *Journal of Fluid Mechanics* 376, pp. 183–219.
- Cheyne, S. A., Stebbings, C. T., Roy, R. A. 1995. Phase velocity measurements in bubbly liquids using a fiber optic laser interferometer. *The Journal of the Acoustical Society of America* 97, 1621–1624. <https://doi.org/10.1121/1.412101>
- Debnath, P., Pandey, K. M. 2020. Numerical analysis of detonation combustion wave in pulse detonation combustor with modified ejector with gaseous and liquid fuel mixture. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09842-1>
- Diliūnas J., Jurevičius A. 1998. *Geležis Lietuvos gėlame požeminiame vandenyje*. Vilnius. 76 p.
- Doggaz, A., Attour, A., Le Page Mostefa, M., Côme, K., Tlili, M., Lapicque, F. 2019. Removal of heavy metals by electrocoagulation from hydrogenocarbonate-containing waters: Compared cases of divalent iron and zinc cations. *Journal of Water Process Engineering* 29, 100796. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100796>
- Domenico, S. N. 1982. Acoustic wave propagation in air-bubble curtains in water. Part I: History and theory. *Geophysics* 47, 345–353. <https://doi.org/10.1190/1.1441340>
- Guan, X., Yang, N. 2017. Bubble properties measurement in bubble columns: From homogeneous to heterogeneous regime. *Chemical Engineering Research and Design* 127, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.09.017>
- Islam, T.; Rakibul Hassan, S. M. 2013. Experimental and numerical investigation of flow over a cylinder at Reynolds number 10^5 . *Journal of Modern Science and Technology* 1, 52–60.

- Jha, A., Raj Mohan, B., Chakraborty, S., Meikap, B. C. 2008. Studies on gas holdup in a bubble column using porous spargers with additives. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 3, 417–424. <https://doi.org/10.1002/apj.137>
- Joshi, J. B., Nandakumar, K., Evans, G. M., Pareek, V. K., Gumulya, M. M., Sathe, M. J., Khanwale, M. A. 2017. Bubble generated turbulence and direct numerical simulations. *Chemical Engineering Science* 157, 26–75. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.03.041>
- Faler J. H., Leibovich S. 1977. Disrupted states of vortex flow and breakdown, *Physics of Fluids* 22, 1385.
- Kafesaki, M., Penciu, R. S., Economou, E. N. 2000. Air Bubbles in Water: A Strongly Multiple Scattering Medium for Acoustic Waves. *Physical Review Letters* 84, 6050–6053. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.6050>
- Kantarci, N., Borak, F., Ulgen, K. O. 2005. Bubble column reactors. *Process Biochemistry* 40, 2263–2283. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.10.004>
- Kazakis, N. A., Mouza, A. A., Paras, S. V. 2008. Experimental study of bubble formation at metal porous spargers: Effect of liquid properties and sparger characteristics on the initial bubble size distribution. *Chemical Engineering Journal* 137, 265–281. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.04.040>
- Klimas, A., Gregorauskas, M. 2002. Groundwater abstraction and contamination in Lithuania as geoindicators of environmental change. *Environmental Geology* 42, 767–772. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0554-7>
- Kitaeva, N. K.; Skobeev, D. A.; Merkov, S. M.; Pestov, S. M. 2019. Iron Removal from the Groundwater by Aeration. *Russian Journal of General* 89, 1246-1252. <https://link.springer.com/article/10.1134/S1070363219060215>
- Klimas, A. 2006. *Vandens kokybė Lietuvos vandenvietėse. Pokyčių studija*. Vilnius. 487 p.
- Krupińska, I. 2020. Impact of the Oxidant Type on the Efficiency of the Oxidation and Removal of Iron Compounds from Groundwater Containing Humic Substances. *Molecules* 25, 3380. <https://doi.org/10.3390/molecules25153380>
- Kulkarni, A. V., Badgandi, S. V., Joshi, J. B. 2009. Design of ring and spider type spargers for bubble column reactor: Experimental measurements and CFD simulation of flow and weeping. *Chemical Engineering Research and Design* 87, 1612–1630. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.06.003>
- Kulkarni, A. V., Joshi, J. B. 2011. Design and selection of sparger for bubble column reactor. Part I: Performance of different spargers. *Chemical Engineering Research and Design* S0263876211000128. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.01.004>
- Khadse, G. K.; Patni, P. M.; Labhasetwar. 2015. Removal of iron and manganese from drinking water supply,. *Sustainable Water Resources Management*, 1: 157-165. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-015-0017-4>
- Kulkarni, A. V., Roy, S. S., Joshi, J. B. 2007. Pressure and flow distribution in pipe and ring spargers: Experimental measurements and CFD simulation. *Chemical Engineering Journal* 133, 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.03.011>

- Lucas, D., Rzehak, R., Krepper, E., Ziegenhein, Th., Liao, Y., Kriebitzsch, S., Apanasevich, P. 2016. A strategy for the qualification of multi-fluid approaches for nuclear reactor safety. *Nuclear Engineering and Design* 299, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.07.007>
- Lighthill M. J. 1952. *Proceedings of the Royal Society A* 222, 1–32
- Leong, T.; Ashokkumar, M.; Kentish, S. 2011. The Fundamentals of power ultrasound – a review. *Acoustics Australia*, 39(2): 54–63. <https://minerva-access.unimelb.edu.au/handle/11343/123494>
- Lapienienė, A.; Šležas, R. 2001. Tūtos formos įtaka užsuktos srovės struktūrai. *Energetika*, 3: 24–32
- Mazzei, A. L. 1997. Mazzei, Patentas: US. 5863128 A
- Maceiras, R., Álvarez, E., Cancela, M. A. 2010. Experimental interfacial area measurements in a bubble column. *Chemical Engineering Journal* 163, 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.011>
- Mahmoud, M. E., Nabil, G. M., Zaki, M. M., Saleh, M. M. 2019. Starch functionalization of iron oxide by-product from steel industry as a sustainable low cost nanocomposite for removal of divalent toxic metal ions from water. *International Journal of Biological Macromolecules* 137, 455–468. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.170>
- Matuzevičius, A. 1998. *Nuotekų valymas aktyviųjų dumblių: paskaitų tekstas*. Vilnius: Technika. 80 p.
- Montoya, G., Lucas, D., Baglietto, E., Liao, Y. 2016. A review on mechanisms and models for the churn-turbulent flow regime. *Chemical Engineering Science* 141, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.011>
- Mažeikienė, A. 2001. Biologinio geležies ir mangano šalinimo iš požeminio vandens principai, technologijos, jų taikymo Lietuvoje galimybės. *Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities*, Vilnius: Technika, p. 75-81.
- Mouza, A. A. 2018. Design of bubble columns equipped with porous sparger. *Materials Today: Proceedings* 5, 27572–27581. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.09.077>
- Mudde, R. F., Harteveld, W. K., van den Akker, H. E. A. 2009. Uniform Flow in Bubble Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Res.* 48, 148–158. <https://doi.org/10.1021/ie8000748>
- Munter, R., Overbeck, P., Sutt, J. 2008. Which is the Best Oxidant for Complexed Iron Removal from Groundwater: The Kogalym Case. *Ozone: Science & Engineering* 30, 73–80. <https://doi.org/10.1080/01919510701812956>
- Oliva, J., De Pablo, J., Cortina, J.-L., Cama, J., Ayora, C. 2010. The use of Apatite IITM to remove divalent metal ions zinc(II), lead(II), manganese(II) and iron(II) from water in passive treatment systems: Column experiments. *Journal of Hazardous Materials* 184, 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.045>

- Pourtousi, M., Ganesan, P., Sandaran, S. C., Sahu, J. N. 2016. Effect of ring sparger diameters on hydrodynamics in bubble column: A numerical investigation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 69, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.10.006>
- Розенберга, Л. Д. 1967. Физика и техника мощного ультразвука, Наука, Москва, 1(3): 70–166.
- Rajput, S., Pittman, C. U., Mohan, D. 2016. Magnetic magnetite (Fe_3O_4) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb^{2+}) and chromium (Cr^{6+}) removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science* 468, 334–346. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.12.008>
- Roache, P. J. 1998. *Fundamentals of computational fluid dynamics*. Hermosa Publishers, New York.
- Ruffa, A. A. 1992. Acoustic wave propagation through periodic bubbly liquids. *The Journal of the Acoustical Society of America* 91, 1–11. <https://doi.org/10.1121/1.402755>
- Şal, S., Gül, Ö.F., Özdemir, M. 2013. The effect of sparger geometry on gas holdup and regime transition points in a bubble column equipped with perforated plate spargers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 70, 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.03.012>
- Shah, Y. T., Kelkar, B. G., Godbole, S. P., Deckwer, W.-D. 1982. Design parameters estimations for bubble column reactors. *AIChE Journal* 28, 353–379. <https://doi.org/10.1002/aic.690280302>
- Vekteris, V., Zaremba, R., Striška, V. 2008. Increasing the Effectiveness of Vibroacoustic Cyclone, *Proceedings of 13th International Conference. Mechanika* p. 525–528.
- Vekteris, V.; Striška, V.; Valiukonis, S. 2008. Ežektorius. Patentas, Vilnius: Lietuvos respublikos valstybinis patentų biuras. Nr. LT 5527 B.
- Vikulin, A.V. 2009. *Physics of the Earth and Geodynamics*, KamGU, Petropavlovsk-Kamchatsky, 463.
- Vreeburg, I. J. H. G., Boxall, J. B. 2007. Discolouration in potable water distribution systems. A review. *Water Research* 41, 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.09.028>
- Yang, G., Zhang, H., Luo, J., Wang, T. 2018. Drag force of bubble swarms and numerical simulations of a bubble column with a CFD-PBM coupled model. *Chemical Engineering Science* 192, 714–724. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.07.012>
- Zahradník, J., Fialová, M., Růžička, M., Drahoš, J., Kaštánek, F., Thomas, N. H. 1997. Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors. *Chemical Engineering Science* 52, 3811–3826. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00226-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00226-1)
- Šakmanas, A. A. 2008. *Slėgtuvai*. Vilnius 112 p.
- Лямаев, Б. Ф. 1988. *Гидроструиные насосы и установки*. Ленингр. 275 с.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Chernov, N. N.; Styra, A.; Golosov, P. S. 2013. Исследование метода ультразвуковой отчистки питьевой воды от примесей твердых частиц. *Izvestiya SFedU*. 9(146): 203–208. ISSN 1999-9429.

Mykolaitis, E.; Styra, A.; Vekteris, V. 2013. Skystyje esančių kietųjų dalelių sąveikos akustiniame lauke tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba = Mechanics, material science, industrial engineering and management*, Vilnius: Technika, 5(6): 655–658. ISSN 2029-2341.

Vekteris, V.; Styra, A.; Mokšin, V.; Grinbergienė, I.; Jurevičius, M.; Turla, V.; Mester, G. 2018. Numerical simulation of a pulsating flow generated in an ejector. *Transactions of FAMENA*, 42 (2): 97–107. ISSN 1333-1124 (print), 1849-1391 (online). (*Clarivate Analytics Web of Science*).

Vekteris, V.; Styra, A.; Mokšin, V. 2017. Efficiency investigation of pulsating flow ejector used to remove iron from drinking water. *Journal of environmental protection and ecology*, 18(3): 1078–1087. ISSN 1311-5065 (print). (*Clarivate Analytics Web of Science*).

Vekteris, V.; Styra, A.; Striška, V. 2014. Investigation of pulsating flow's ejectors. *Machine design*. Novi Sad: Faculty of Technical Sciences (University of Novi Sad). 6(2): 45–48. ISSN 1821-1259.

Vekteris, V.; Styra, A.; Striška, V. 2011. Čiurkšlinio siurblio pulsuojančio spiralinio sukūrio formavimas ir tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba*. Vilnius: Technika, 3(6): p. 53–55. ISSN 2029-2341.

Vilkišius, R.; Styra, A.; Vekteris, V. 2012. Akustinio lauko įtaka dalelių sukibimui skystyje. *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba = Mechanics, material science, industrial engineering and management*, Vilnius: Technika, 4(6): 599–603. ISSN 2029-2341.

Straipsniai kituose leidiniuose

Styra, A.; Vekteris, V.; Striška, V. 2012. Investigation of the solubility of oxygen in water-jet ejectors. *The seventh international symposium about machine and industrial design in mechanical engineering*, Balatonfüred, Hungary 24–26 May 2012. Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, p. 445–448. ISBN 9788678923999. (*Clarivate Analytics Proceedings*)

Vekteris, V.; Styra, A.; Striška, V.; Mokšin, V. 2011. Investigation of the efficiency of water-jet ejectors. *Proceedings of 15th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, Prague, Czech Republic 12–18 September 2011. Zenica (BH): University of Zenica, 15(1): p. 361–364. ISSN 1840-4944.

Patentas, įregistruotas Lietuvoje

Vekteris, V.; Styra, A.; Striška, V.; Kilikevičius, A. 2014. Pulsuojančio srauto ežektorius. *Patentas*, Vilnius: Lietuvos respublikos valstybinis patentų biuras. LT 6011 B.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

The supply of groundwater with higher concentrations of iron compounds causes a number of problems for consumers: the soluble iron compounds interact with oxygen and turns sparingly soluble brown iron hydroxide, the taste of the water deteriorates, and it becomes brownish and cloudy. Accumulating in these derivatives and this can become an economic problem (Vreeburg *et al.* 2007). Such problems are encountered not only in Lithuania and Europe, but also all over the world.

The removal of iron from groundwater is based on the oxidation of bivalent compounds to trivalent insoluble water compounds and their retention. Air oxygen is usually used for oxidation (Albrektienė *et al.* 2017, Krupińska 2020, Munter *et al.* 2008) or other reagents (potassium permanganate, active chlorine-containing compounds, manganese dioxide, etc.), which promote non-organic production and increase the cost of the treatment plant produced. Also, the use of these reagents, strong oxidants in the preparation of drinking water, can lead to reaction products that are harmful to human health (carcinogenic compounds, chlorine organic compounds, manganates, etc.) (Albrektienė *et al.* 2017).

Removal of iron compounds from groundwater is based on oxidation of divalent compounds to sparingly soluble compounds and their retention. Oxygen in the air is most commonly used for oxidation (Albrektienė *et al.* 2017, Krupińska *et al.* 2020, Munter *et al.* 2008) or other reagents (potassium permanganate, active chlorine-containing compounds,

manganese dioxide and etc.), thus encouraged non-organic production and increases manufacture cost of the treatment plant. Also, the use of these reagents, strong oxidizers in the preparation of drinking water, can cause reaction products harmful to human health (carcinogenic compounds, organochlorine compounds, manganates, etc.) (Albrektienė *et al.* 2017). In order to ensure that the concentration of total iron compounds in drinking water does not exceed the current requirements for drinking water safety and quality according to the European Union Council Directive 98/83 / EC and Lithuanian Hygiene Standard HN 24: 2017, need to search more efficient, ecological but inexpensive treatment plants.

Removal of iron compounds from water is difficult because it requires complex equipment. Many high-efficiency iron scrubbers are used, the most common of which are air compressors and reagents. These devices operation is complicated, therefore their application is limited. Such a device have main disadvantages: excessive noise and after filter regeneration reagent disposal problem. It encouraged to improve hydrodynamic non-reagent iron removal from water technology, which the main element is the ejector.

In order to optimizing the mechanical design of the ejector, in can be achieved better conditions for hydrodynamic processes, which would simplify the regenerative removal of iron from water.

Relevance of the thesis

Only groundwater is centrally supplied to the Lithuanian population (Klimas *et al.* 2006), but the iron concentration in 87% of fresh groundwater resources exceeds the 0.2 mg / l limit allowed by the Lithuanian drinking water hygiene standards HN 24: 2017.

Currently, the most advanced way to remove these impurities from water is ejector hydrodynamic non-reagent technologies, in which the most important role is to improve the air solubility of oxygen in water, thus activating iron oxidation and coagulation processes. Lithuanian and foreign scientists (Mažeikienė *et al.* 2001, Khadse *et al.* 2005, Albrektienė *et al.* 2017, Kitaeva *et al.* 2019) experimentally investigated the possibilities of purifying water from excess iron. However, in the course of hydrodynamic non-reagent treatment, such technological parameters as the frequency, intensity, etc. of the acoustic field generated in the liquid have not been determined and optimized. Removal of iron compounds dependence of water on the above factors not fully researched and used what is relevant at the present time.

The object of research

The object of research is a newly developed pulsating flow ejector of optimal mechanical construction.

Aim of the thesis

In view of the oxygen in the air solubility in water and theories of iron coagulation processes numerical modeling and the results of experimental research to create new mechanical structures pulsating flow ejector, capable of improve non-reagent iron removal from water technology.

Tasks of the thesis

The following tasks were formulated to achieve the research target:

1. Theoretical analysis of ejector construction characteristics and involved into ejection flow hydrodynamic processes.
2. To investigate the characteristics of the hydrodynamic parameters of the pulsating flow.
3. Create a pulsating flow ejector prototype, based on the acoustic field during mixing of the ejected flow with the working fluid, when their flow rate changes.
4. To experimentally investigate the influence of the hydrodynamic parameters of the developed pulsating flow ejector on the solubility of oxygen in water and coagulation of iron.

Research methodology

Numericals based on computational fluid dynamics and experimental research methods are used in the work. Numerical studies were performed using SolidWorks Flow Simulation software. Measurements of the acoustic field parameters emitted by the pulsating flow were performed. Experimental research of the hydrodynamic processes of the developed pulsating flow ejector were performed using the developed research stand.

Scientific novelty of the thesis

The novelty of the work consists of the results of complex theoretical and experimental research of pulsating flow in the developed ejector, applying new structural solutions of acoustic field formation, modeling of ongoing hydrodynamic processes and application of the created new pulsating flow ejector to remove iron compounds from water by simplifying technology.

Practical value of the research findings

The research of the newly developed pulsating flow ejector will make it possible to determine the optimal hydrodynamic parameters that will activate the solubility of oxygen in the air in water and the coagulation of iron compounds, which accordingly simplifies the beregent removal of iron from water. Structural solutions improve the conditions for the oxidation of divalent compounds to sparingly soluble iron compounds in water. By applying the developed pulsating flow ejector, it will be possible to remove iron from the water more efficiently and this will prevent damage to human health.

Defended statements

1. The developed device is based on the formation of a pulsating flow by a mixing medium of two media. This flow creates an acoustic field that increases the efficiency of a hydrodynamic non-reagent water treatment plant when their flow rate is variable.

2. The application of the newly developed pulsed flow device facilitates the mixing of the two media, thus increasing the iron removal efficiency by $> 10\%$.

Approval of the research findings

Nine scientific articles have been published on the topic of the thesis: two in scientific journals which are included in the Clarivate Analytics Web of Science database and have ISI IF (Vekteris *et al.* 2018; Vekteris *et al.* 2017); one in international conference proceedings, referenced in the Clarivate Analytics Web of Science Proceedings (Styra *et al.* 2012); six referred in other international databases (Vekteris *et al.* 2014; Chernov *et al.* 2013; Mykolaitis *et al.* 2013; Vilkišius *et al.* 2013).

The results of the thesis were presented in six international scientific conferences in Lithuania and other countries:

- Young Scientists Conference “Science the Future of Lithuania”, 2011, 2012, 2013 (Vilnius);
- International Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” 2011 (Prague, Czech Republic);
- International Conference “The Seventh International Symposium on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering” 2012 (Balatonfured, Hungary).
- International Conference “The 13th International Conference Mechatronic Systems and Materials”, 2017 m. Vilnius, Lithuania.
- The Republic of Lithuania patent no. LT2013 059 to the invention for a “Pulse Flow Ejector” was obtained. Authors: Vladas Vekteris, Andrius Styra, Vytautas Striška, Artūras Kilikevičius.

Structure of the dissertation

Dissertation is comprised of introduction and three chapters, general conclusions, review list, list of autor's publications on dissertation subject, summary in English.

Work volume consists of 97 pages, without of additions. 74 numbered equations are used, 49 figures and 1 table. At writing of dissertation, 61 reviews were used.

1. Analysis of ejectors research

Ejector is a device, where the kinetic energy of the working flow is transmitted to the ejected flow in the state of direct contact. These devices are divided according to the aggregate state of the working and ejection flow. Ejectors for aeration are classified to the group units with different working and ejection flow capacities. Increase of ejected flow pressure proceeds without the influence of mechanical energy, making it one of the main guarantors of quality and reliability of main and principled ejector devices.

Fluid flow regime is turbulent. In this mode, due to the transverse turbulent pulsations, the liquid particles flow out (disperse) from the flow to the surrounding air and transmit motion pulses to the air particles by forcing them move along the flow. The air in the border layer is turbulized, the air particles penetrate into the stream, gain momentum and, at the same time, stop the current. This air trapping process, which occurs in the boundary layer, is broken at the current cut-off point. Further, in the stabilizing part of the

chamber, because of the turbulent diffusion fields of velocities and concentrations evens without changing the ratio of liquid to air, resulting in a two-phase flow. Static pressure in the intake chamber remains almost constant and increases in the stabilization section.

There are a wide variety of structural ejector variants in the world, but the basic principles, necessary for the ejector to work according to its purpose (to eject the air and mix it with the working fluid flow) remain. According to their design features, the ejectors can be divided into adjustable and non-adjustable with different spray openings. Adjustable ejectors differ from the non-adjustable type as they have the ability to change the size of the aperture of workflow spray or the cross-sectional area of the mixing chamber. In addition to all the differences, inherent to ejectors, the main design elements remain, emphasizing the uniqueness of the following devices: workflow spray, mixing chamber, diffuser, and ejection flow union. The workflow spray aperture is usually executed on the central axis of the ejector, but more sophisticated constructions may be used when the spray aperture is arranged in the form of a ring around the inner part of the mixing chamber wall. The purpose of the proposed device is to increase the efficiency of the pulsating ejector, ensuring the linear dependence of the flow of the ejected medium on the flow of the working fluid flow.

The ejector belongs to the field of liquid oxygen saturation equipment and can be used in water treatment systems, where the water to be cleaned is required to be oxygenated just before the decontamination process, it can also be used in other industries, such as: biotechnology and chemical industries where liquefaction of gas is required when their flow is variable. The formation of a pulsating flow in a closed current is a complex hydrodynamic phenomenon that has been studied for many years. However, its universal theoretical model has not yet been created. Benjamin's joint state theory (Benjamin *et al.* 1962), based on a wave model and experimentally confirmed by a twisted flow in a channel was one of the first attempts to describe the formation of a recirculation zone. It states that the formation of a recirculation zone is a transition state between a regular symmetric flow of stream and a highly turbulent flow with no symmetry. However, this theory has not been confirmed in free flows. There are a number of other theories attempting to determine the criteria for forming a recirculation zone (Billant *et al.* 1998). The main drawback of these theories is that the findings obtained are valid only under the conditions of a particular experiment or digital model, but they cannot be evaluated as universal theoretical models of circulatory zone formation.

The acoustic technology generation schemes are constantly being developed, work is underway to improve this method and its use. The question is about the use of acoustic vibrations in water. The theoretical side is although poorly researched. Due to its mechanism of action, it is very difficult to investigate the impact of acoustic fields on various media, as different processes occur simultaneously: cavitation, shock waves, microflows, luminescence, which may have a mutual impact. Therefore, there are difficulties in describing experimental results. The use of acoustics to enhance the oxidation process in water, thereby precipitating major impurities, further extends the scope of use of this physical method (Vikulin 2009).

2. Theoretical investigation of ejector generation of pulsating flow

Three modifications of the ejector (Figure S2.1) were used for the research. In the first modification, the cone is inside the plate (Figure S2.1, a). The cone is on the outside of the plate of the second modification (b). In the third modification, the cone is inside the plate, and, next to it, there is another plate with a drilled hole in the center of the plate (Fig. S2.1, c). All of these modifications are similar, only the internal diameter of the diffuser and the distance of the holes from the edge of the diffuser are changed during the test. Two publications were published on the topic of the chapter.

In general, the viscous fluid movement in closed systems is modeled by the equation of motion, the law of mass preservation, and the energy conservation equation.

The equation of motion is recorded as follows:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right] = -\nabla p - \rho \nabla \Phi + \mu \nabla^2 v + (\mu + \mu') \nabla (\nabla \cdot v), \quad (S2.1)$$

where $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ is operator; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ is Laplace Operator; μ' is the so-called secondary viscosity coefficient. Viscosity coefficients are associated with expression. $3\mu' + 2\mu = 0$. Φ is volume unit potential; p is pressure; ρ is density; v is velocity.

The frequency dependence of the sound pressure level is shown in Figure S2.2.

The dependence of sound pressure on frequency is shown in Figure S2.2; pressure limit value is 168.751 dB at frequency 5.272 kHz.

In the Lighthill formula (S2.2) the flow volume can be derived from dimensional theory (Lighthill *et al.* 1952):

$$L_W = 10 \lg(k_0 \frac{\rho_0^2 v_0^8 d^2}{\rho_\infty c_\infty^5} / W_0), \quad (S2.2)$$

where v_0 is the flow rate; ρ_0 or ρ_∞ is the density of the outlet from the shell and the density of the environmental medium; k_0 is the coefficient ranges from $3 \cdot 10^{-5}$ to $(1.5 - 2.5) \cdot 10^{-5}$; c_∞ is the speed of sound in water; $W_0 = 10^{-12}$ is the supporting sound power W ; d is the diameter of the outlet shell; L_w is the sound power level dB.

Calculations have shown that the majority of the acoustic energy in the flow emits by the first ten calibers, i.e., $x = (0-10) d$. The acoustic power is emitted by each unit of flow caliber, i.e., $\Delta x / d = 1$ is constant throughout the flow length and decreases to the main length $dW / dx \approx x^{-6}$. It can be determined that about 65% of the total acoustic power is emitted at the beginning of the flow.

By adding data to equation (S2.2), we get an average sound pressure level of 100.19 dB, which is 10^{-2} W/m^2 , that satisfies the requirements of coagulation.

Pulse Flow Modeling. The pulsating flow ejector is shown in Figure S2.3.

The research of pulse flow created ejector was conducted using special software SolidWorks 2011 SP2.0, Flow Simulation 2011 2.0. Build 1525. Flow simulation uses Favre's averaged Navje Stokes equations, which takes into account the influence of turbulent flow time averages on flow parameters. Other large-scale temporal phenomena are directly considered. During this procedure, the additional members known as Reinolds stresses appear in equations; they require additional information. To complete this system of equations, the equations of transport during simulations of the flow are used to calculate the turbulent kinetic force and its dissipation coefficient, the so-called k- ϵ model.

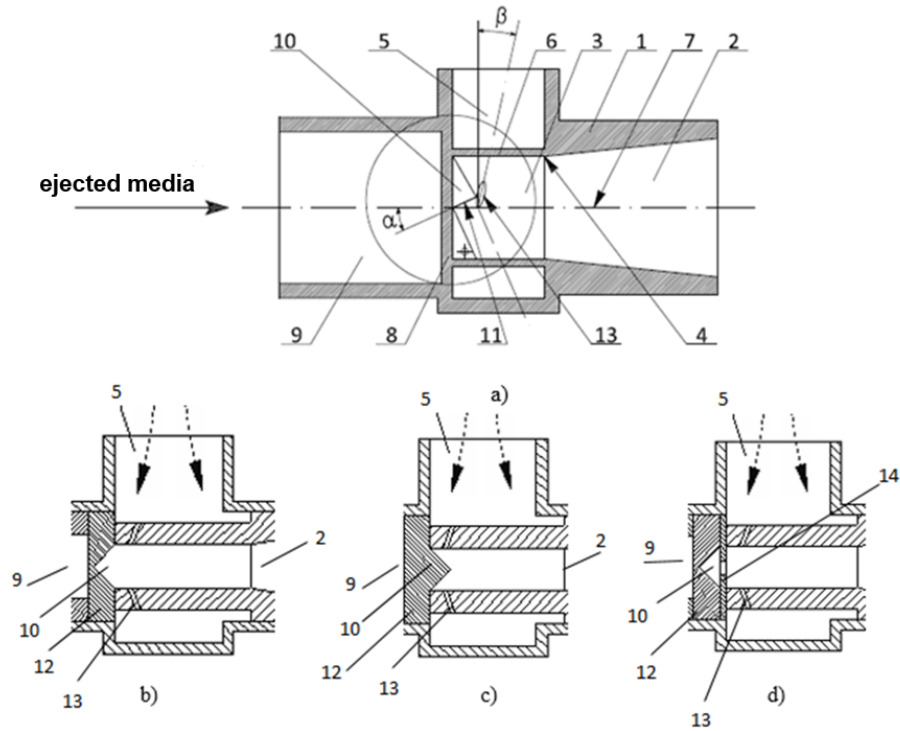


Fig. S2.1. Pulsed flow ejector with different position of the conical part: a) diagram; b) when is inside the plate; c) when is on the outside of the plate; d) when is inside the plate and there is another plate next to it with a hole drilled in the center: 1 – housing; 2 – diffuser; 3 – mouth; 4 – conical part; 5 – ejected medium cavity; 6 – wall; 7 – central axis; 8 – formed bottom; 9 – cavity of ejected medium; 10 – inclined; 11 – plane; 12 – plate; 13 – holes; 14 – additional plate with hole in center

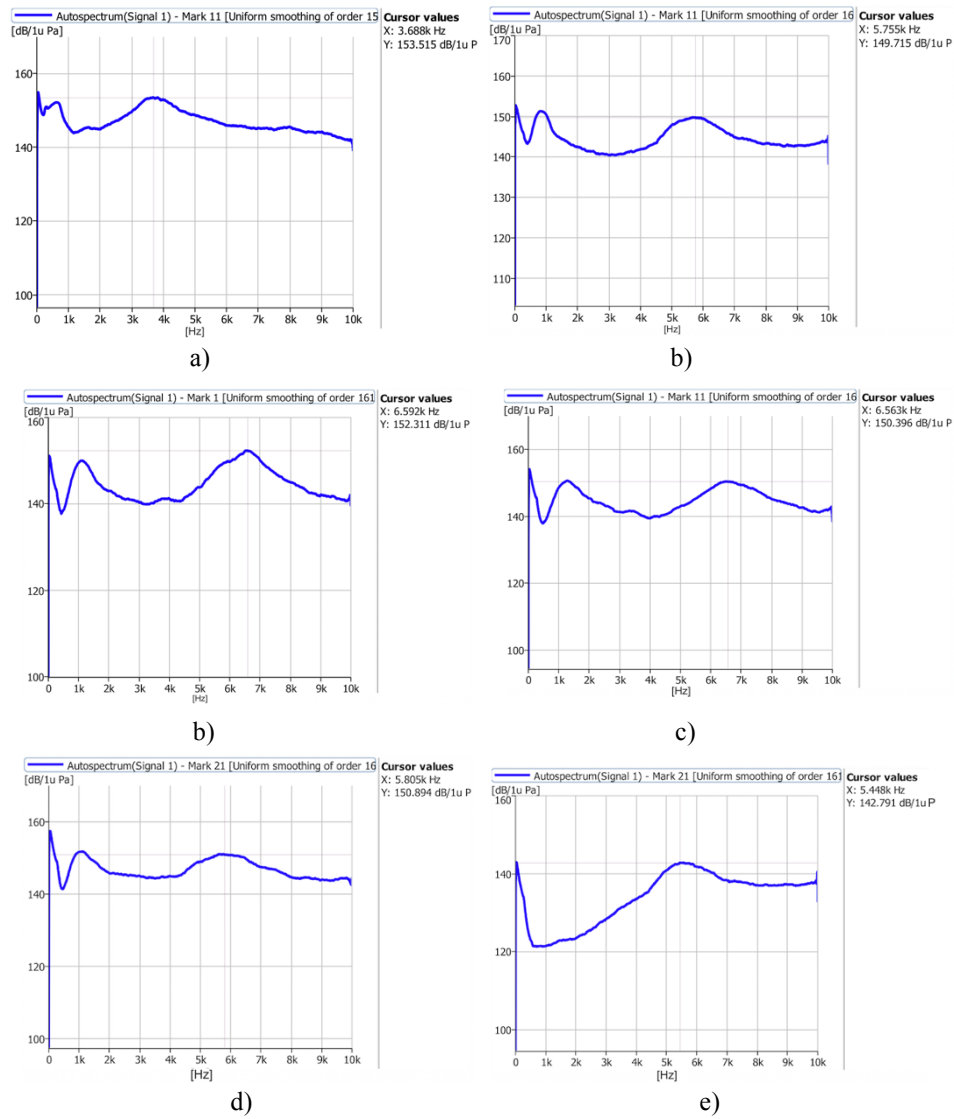


Fig. S2.2. The Sound pressure level versus frequency: a) at 3688 Hz; b) at 5755 Hz; c) at 6952 Hz; d) at 6563 Hz; e) at 5805 Hz; f) at 5448 Hz

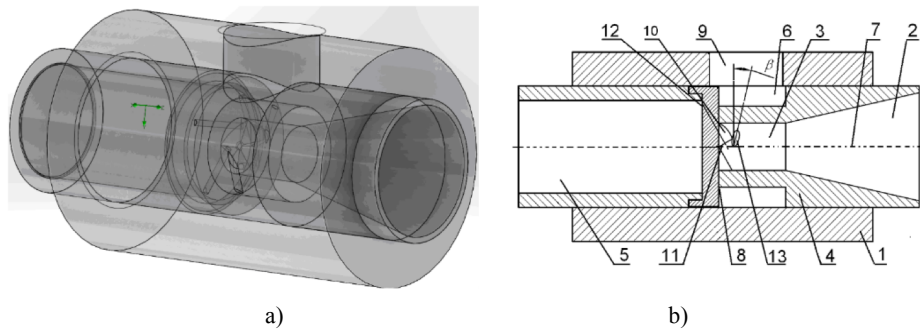


Fig. S2.3. The object: a) the pulsed flow ejector space view; b) the pulsed flow ejector:
 1 – housing; 2 – diffuser; 3 – mouths; 4 – whip tapering part; 5 – cavity of ejected medium;
 6 – enclosure; 7 – axis; 8 – mouth bottom; 9 – Working liquid medium cavity;
 10 – irregular triangular pyramid slope surface; 11 – a plane; 12 – hole;
 13 – formed in a direction tangential to the hole

Flow simulation uses a single equation system to describe both laminar and turbulent flows. In addition, the transition from laminar to turbulent state is possible, and / or vice versa. Flow simulation uses simplified 13 equations for mass, movement, and energy conservation.

Modeling results are shown in Figures S2.4–S2.7.

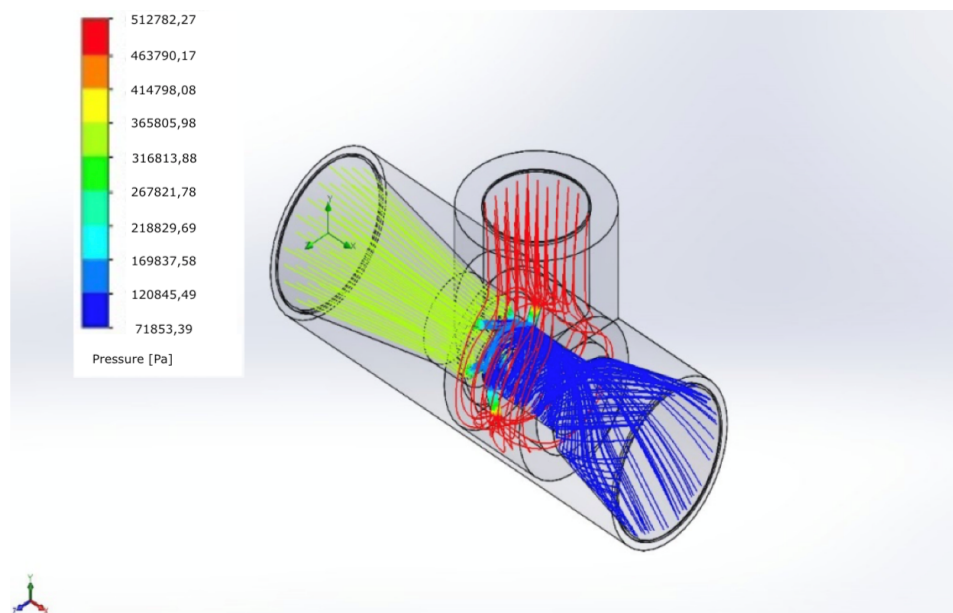


Fig. S2.4. Pressure distribution in the flow of the investigated system

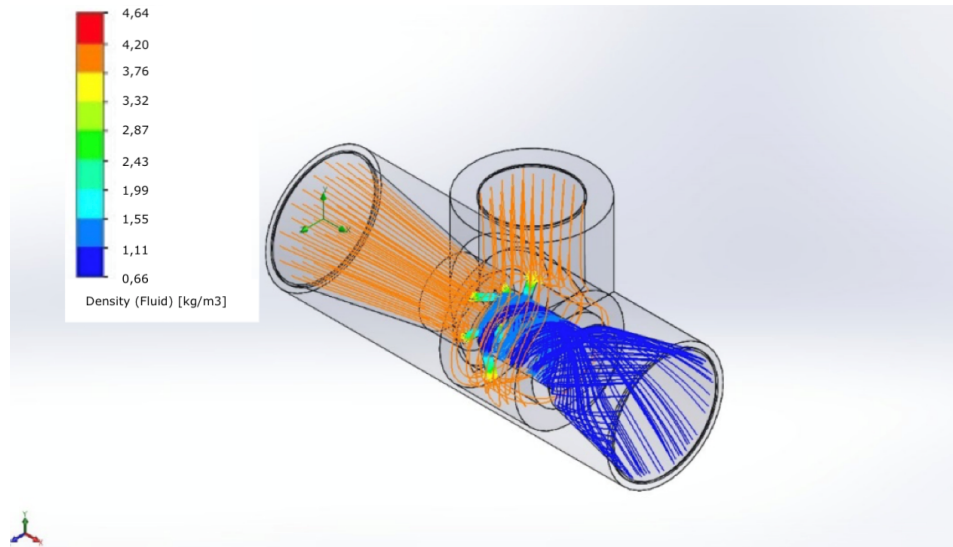


Fig. S2.5. Variation of flow density of the investigated system

As we can see, the flow pressure when mixing air with water (Figure S2.4) varies from 0.512 MPa to the outlet flow pressure of 0.0718 MPa and the flow density (Figure S2.5) from 4.64 kg / m^3 to 0.66 kg / m^3 and flow speed varies from 65.56 m / s to 590 m / s (Figure S2.7).

After inserting modelling results into equation 15, we get that flow generates an acoustic field greater than 100 dB, meeting requirements of coagulation.

3. Experimental research of ejectors and flow's

A bench for the first test was created and shown in Figure 3.3 b. It consists of a tank (1), which is filled with tap water. The working fluid is supplied to the ejector (5) from the tank by pump (3). The working fluid pressure is measured with a manometer (4). Flowmeter (5) measures the working fluid flow. Water is supplied through the valve (6). A hydrophone (Bruel & Kjaer) (7) was used to measure the acoustic wave parameters and the data was stored in a data drive (8) and processed by a computer (9).

Working medium: water, pump operating pressure up to 25 atmospheres, pump power was 2.2 kW, flow measurement by flowmeter (visual reading range), accuracy 0.001 m^3 , pressure measurement by pressure gauge (visual reading), second accuracy class, fluid flow adjustable by: valve, Bruel & Kjaer hydrophone for measurement of acoustic field (measurement error $\pm 2 \text{ dB}$).

The following parameters were used during the experimental studies: water pressure $P = 0.8 \text{ MPa}$, water flow $Q = 0.24 \text{ l/s}$, and water temperature $t = 18^\circ \text{ C}$.

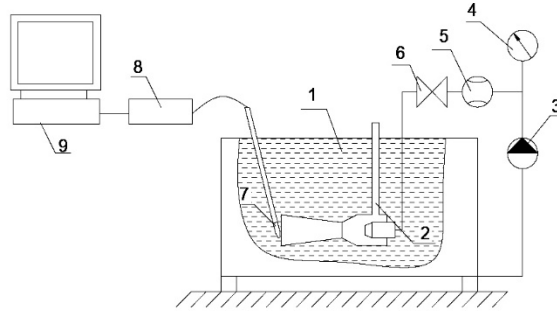


Fig. S3.1. The experimental test bench for acoustic field generating ejectors: a) main view; b) scheme: 1 – tank, 2 – ejector; 3 – water pump; 4 – manometer; 5 – flowmeter; 6 – adjustable valve; 7 – hydrophone (Bruel & Kjaer); 8 – data collection; 9 – PC

The experiment is performed in the following order:

The water pump is switched on, the water pressure $P = 0.6$ MPa is set according to the pressure gauge readings. The acoustic wave generated in the ejector is measured by submerged hydrophone, as shown in the experimental bench scheme (Figure S3.1). Water pressure is set to $P = 0.7$ MPa. The hydrophone is again immersed in the water and the resulting acoustic wave is measured. Water pressure is set to $P = 0.8$ MPa. The hydrophone is again immersed in the water and the resulting acoustic wave is measured. Water pressure is set $P = 0.9$ MPa. The hydrophone is again immersed in the water and the resulting acoustic wave is measured. Water pressure is set $P = 1$ MPa. The hydrophone is again immersed in the water and the resulting acoustic wave is measured. In this way, the test is repeated for all newly created ejector designs. Some constructions have been selected from them with the largest acoustic waveform readings.

Analysis of the results obtained (Figure 3.2 a, b, c, d).

According to the shown in the figure graph of the sound level dependence on frequency, where:

$$\begin{aligned} L &= 10 \lg(I / I_0) \text{ or } I = I_0 \cdot 10^{0.1L}; \\ I_0 &= 10^{-16} \text{ W/cm}^2; \\ I &= 10^{-16} \cdot 10^{0.1 \cdot 168.751}, \end{aligned} \quad (\text{S3.1})$$

where: I_0 is sound intensity at hearing threshold, L is sound intensity level, dB.

For acoustic coagulation, the sound intensity must be at least 1 W/cm^2 or 10^{-4} W/m^2 . Thus, after calculating the sound intensity by all five variants, we can observe that acoustic coagulation occurs in all variants.

A bench for the second test was created and shown in Fig. S3.8 b. It consists of a tank (1), which is filled with tap water. The working fluid is supplied to the ejector (5) from the tank by pump (3). The working fluid pressure is measured with a manometer (4). Flowmeter (5) measures the working fluid flow. Water is supplied through the valve

(6). A hydrophone (Bruel & Kjaer) (7) was used to measure the acoustic wave parameters and the data was stored in a data drive (8) and processed by a computer (9).

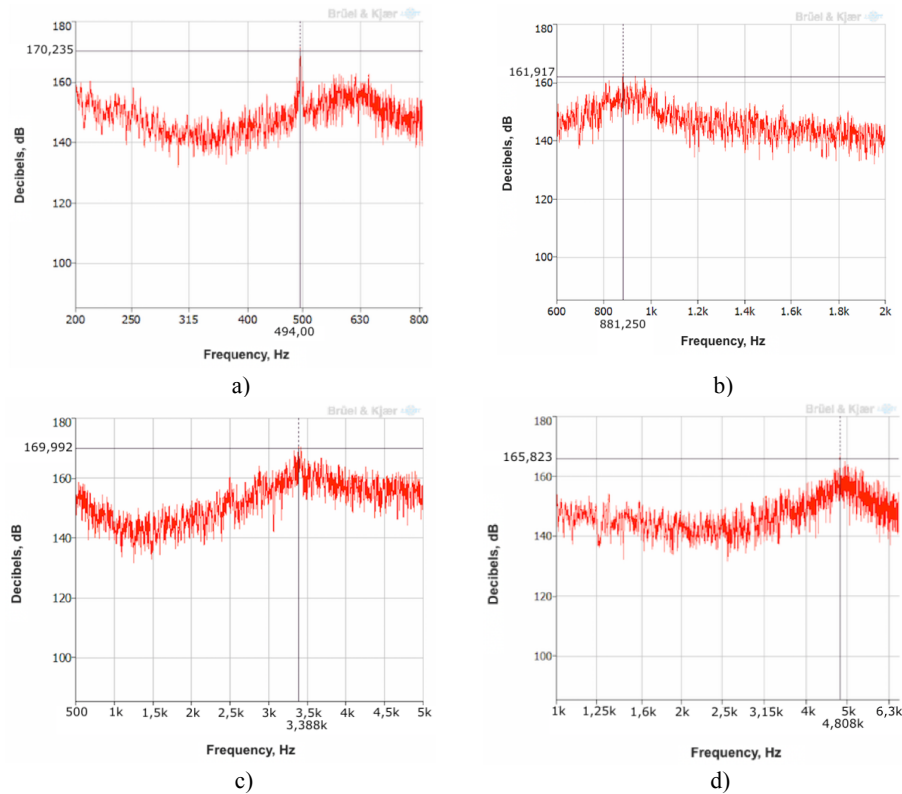


Fig. S3.2. The sound level versus frequency a) sound level value at 494 Hz; b) sound level value at 881 Hz; c) sound level value at 3388 Hz; d) sound level value at 4808 Hz

Working medium: water, pump operating pressure up to 25 atmospheres, pump power was 2.2 kW, flow measurement by flowmeter (visual reading range), accuracy 0.001 m³, pressure measurement by pressure gauge (visual reading), second accuracy class, fluid flow is adjusted by valve, Bruel & Kjaer hydrophone was used for measurement of acoustic field (measurement error ± 2 dB).

The following parameters were used during the experimental research: water pressure $P = 0.8$ MPa, water flow $Q = 0.24$ l/s; water temperature $t = 18$ °C.

General conclusions

1. After analyzing the scientific literature, was established that a lot of research has been done, in which ejectors are used to mix air water streams. However, are that research ejector application for non-reagent iron removal from water, not detected.

2. Analytical studies performed in the work showed, that solved Lighthill's equation analogous to the flat acoustic wave equations, under which deduced field seeks from 142.791 dB until 153.515 dB. These results satisfy the requirements of fast coagulation, because values obtained higher than 100 dB.
3. Numerical research have shown that the pressure of the ejected flow pressure and density maximum pulsations involve by mixing air with water. This creates an outflow pressure from 0.0718 MPa to 0.512 MPa, and density from 0.66 kg/m to 4.64 kg/m. Pressure and density pulsation generates an acoustic field. This exposed insoluble iron interacts between, adhesion, become larger and severe. Then the iron is exposed by gravitational forces, settles.
4. The proposed and approved a new structure ejector experimental research and the conversion of divalent iron to the trivalent methodology, evaluating the influence of acoustic field parameters influence on the coagulation process. Acoustic field pulsation was found to be caused of frequency increases with decreasing pulsing the volume of the air chamber of the flow ejector it's reducing the distance of the holes to the wall at the same chamber diameter. In this way, acoustic waves can be regulated, which affect the water divalent (Fe^{2+}) iron compounds oxidizes, when the frequency of the acoustic waves is above 300 Hz. Accordingly, the frequency of the acoustic waves is below 200 Hz involve reduction of trivalent iron compounds (Fe^{3+}).
5. Experimentally determined, that after increases flow rate generated acoustic field frequency are increasing pulsating flow at constant pulsating flow ejector air chamber volume. It was also found that the generated pulsation works most effectively divalent iron (Fe^{2+}) in water when the volume of the air chamber are 429.41 mm³.

Priedai

A priedas. Patentas LT2013059. Pulsuojančio srauto ežektorius

B priedas. Papildoma informacija modeliavimui (pateikta CD)

C priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija (pateikta CD)

D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos (pateikta CD)

Andrius STYRA

PULSUOJANČIO SRAUTO EŽEKTORIAUS TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (T 009)

INVESTIGATION OF PULSATING FLOW'S EJECTOR

Doctoral Dissertation

Technological Sciences
Mechanical Engineering (T 009)

2020.10.08. 10,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
A. Mickevičiaus g. 5, 08119 Vilnius