

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS

IEVGENIIA GOLINKA

**MIKRODALELIŲ ATSKYRIMO METODŲ IR PRIEMONIŲ
TYRIMAI IR TAIKYMAI BIOLOGINĖSE TERPĖSE**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

2018, Kaunas

Disertacija rengta 2014–2018 m. Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute.

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Vytautas OSTAŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Redagavo:

Gražina Rukšaitė (Leidykla „Technologija“)

Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. habil. dr. Arvydas PALEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T) – **pirmininkas**;

Dr. Rolanas DAUKŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

Prof. dr. Evguenia KOROBKO (A. V. Lykovo Šilumos ir masės mainų institutas, Baltarusija, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

Prof. dr. Edgaras STANKEVIČIUS (Lietuvos sveikatos mokslų universitetas, biomedicinos mokslai, medicina – 06B).

Disertacija bus ginama viešame mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2018 m. rugpjūčio mėn. 30 d. 10 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2018 m. liepos 30 d.

Su disertacija galima susipažinti internete (<http://ktu.edu>), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas) ir Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, Akademija, Kauno raj.) bibliotekose.

IVADAS

Temos aktualumas

Mikrodalelių atskyrimas yra svarbus identifikuojant ir analizuojant konkrečias daleles pramoniniuose, biocheminiuose ir klinikiniuose tyrimuose. Siekiant tikslo, iki šiol plačiausiai naudojami dalelių atskyrimo metodai mikrokanaluose, jie skirstomi į aktyviusius ir pasyviuosius. Aktyvūs metodai naudoja išorines jėgas, tokias kaip elektrinis arba magnetinis laukas, akustinė banga ir optinė sąveika naudojant dalelių dielektrines, magnetines ar optines savybes. Pasyvieji metodai siejami su tokiomis dalelių savybėmis, kaip, pvz., dydis, tankis, ir pirmiausia – leistinomis ląstelių membranų deformacijomis. Pasyvieji metodai yra ne tokie selektyvūs, kaip aktyvieji. Tačiau intensyvėjanti technologijų plėtra vis labiau reikalauja didesnio mikrodalelių kiekio apdorojimo metodų. Akivaizdu, kad reikia pigių ir energiją tausojančių mikrodalelių atskyrimo technologijų ir įrenginių, kuriuos lengva transportuoti ir greitai pasirengti dirbti ekstremaliomis sąlygomis (pvz., autoįvykis, chirurginė intervencija). Šio darbo tikslas yra ištirti ir kurti tokias priemones.

Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Šio tyrimo tikslas – išanalizuoti ir sukurti akustinius ir ultragarsinius mikrodalelių atskyrimo skystyje ir ore metodus bei priemones. Siekiant šio tikslo buvo keliami šie uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros apie mikrodalelių atskyrimą apžvalgą, suformuoti disertacijos tikslus ir uždavinius.
2. Sukurti skaitmeninius matematinius modelius, skirtus atskirti, valdyti ir levituoti mikrodaleles garso bangomis skystyje ir ore.
3. Sukurti skaitmeninius matematinius mikrodalelių atskyrimo ultragarso bangomis skystyje modelius.
4. Validuoti eksperimentiškai mikrodalelių atskyrimo garsinėmis bei ultragarsinėmis akustinėmis bangomis skystyje arba levitavimo ore matematinių modelių adekvatumą.
5. Sukurti mikrodalelių atskyrimo, valdymo ir levitacijos garso bangomis skystyje ir ore priemones.
6. Sukurti mikrodalelių atskyrimo ultragarso bangomis skystyje priemones.
7. Sukurti mikrodalelių atskyrimo ultragarso bangomis skystyje prototipą.

Tyrimo objektas

Pjezoelektrinių garso ir ultragarso dažnio akustinių virpesių aktuatorių mikrodalelėms atskirti sukūrimas ir taikymas.

Tyrimo metodai

Šioje disertacijoje pateikti teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai. Kompiuterinės programinės įrangos „COMSOL Multiphysics“ skaitinių modelių aplinkoje buvo taikytas baigtinių elementų metodas virpesių teorijos, skysčių mechanikos ir akustinių bangų fizikos uždaviniams spręsti. Eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo naudotos holografinės interferencijos principu veikianti sistema PRISM, 3D skenavimo vibrometras PSV-500-3D-HV („Polytec GmbH“, Vokietija). Sudarytiems BE modeliams verifikuoti pagaminti eksperimentiniai stendai. Matavimai fiksuoti osciloskopu 3425 USB. Funkcinis generatorius AGILENT 33220A buvo panaudotas harmoninio žadinimo signalui valdyti. Daugiafizikiniams matematiniams modeliams pagrįsti buvo atlikti eksperimentai su skirtingais garso ir ultragarso dažnio akustinio sužadinimo įrenginiais mikrodalelėms atskirti, valdyti ir levituoti.

Mokslinis naujumas

1. Sukurti daugiafizikiniai skaičiavimo modeliai, kuriuose naudojami garsinio ir ultragarsinio dažnio akustiniai mikrodalelių atskyrimo metodai. Sukurti daugiapakopio skaičiavimo modeliai įvertina skysčio ir indo konstrukcijos dinaminę sąveiką esant garsinio ir ultragarsinio dažnio akustinio sužadinimo poveikiui.
2. Atlikus skaitmeninę analizę, nustatyti akustinio poveikio skirtingų tipų skysčiams su mikrodalelėmis ypatumai. Gautos ryšių tarp akustinės ir vibracinės dalelių atskyrimo skysčiuose ir ore priklausomybės leidžia kurti mikrodalelių atskyrimo įrenginius.

Praktinė vertė

1. Sukurti daugiafizikiniai mikrodalelių atskyrimo matematiniai modeliai. Šie modeliai panaudoti realiems akustinio sužadinimo įrenginiams sukurti. Taikyti skirtingose eksperimentinėse konfigūracijose yra įmanoma keičiant modelio parametrus, pritaikant tą patį akustinio sužadinimo metodą.
2. Sukurti, suprojektuoti ir pagaminti mikrodalelių atskyrimo įrenginių prototipai, kurių vienas yra užpatentuotas. Šie įrenginiai yra taikomi mikrodalelėms atskirti didesniuose suspensijos tūriuose.

Ginti teikiama

1. Mikrodalelių atskyrimo garsinio dažnio akustinių bangų sužadinimu skaitmeninis modelis ir eksperimentinių tyrimų rezultatai;
2. Mikrodalelių atskyrimo ultragarsinio dažnio akustinių bangų sužadinimu skaitmeninis modelis ir eksperimentinių tyrimų rezultatai;
3. Mikrodalelių valdymas ir levitacija ore, naudojant garsinio dažnio akustinių bangų sužadinimą ir eksperimentinių tyrimų rezultatai;

4. Mikrodalelių atskyrimo garsinio ir ultragarsinio dažnių akustinių bangų veikiamame skystyje valdymo ir levitacijos ore įranga;
5. Mikrodalelių atskyrimo ultragarsinio dažnio akustinėmis bangomis įrenginio prototipas.

Publikacijos ir tyrimo rezultatų pritaikymas

Disertacijos rezultatai buvo paskelbti mokslinėse publikacijose: 3 žurnaluose, išvardytuose „Web of Science Journal List“ žurnalų sąrašė, 2 – „ISI proceedings“, 9 – konferencijų darbuose, 1 patentu. Rezultatai buvo pristatyti konferencijose.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas, autoriaus leidinių sąrašas. Bendra disertacijos apimtis yra 100 puslapių, skaičiai ir lentelės.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Biologinių mikrodalelių atskyrimas yra svarbus šiuolaikinėse biomedicininėse technologijose. Šiuo metu eritrocitų atskyrimas kraujyje yra pagrįstas išcentrinio nusodinimo, magnetinėmis, plazma forezinėmis ar dializės technologijomis, reikalauja brangios medicinos įrangos ir turi dalelių kiekio apribojimus. Išcentrinio nusodinimo įrenginys (1 pav.) sudarytas iš skirtingų dalių ir greitaeigio rotoriaus [1], kuriame, pvz., veikia didžiausios išcentrinės jėgos 112 g, kai eritrocitai nusėdę esant 1000 aps./min. rotorijoje, kurio didžiausias mėginio spindulys yra lygus 10 cm. Vienu metu iki 12 skirtingų mėginių galima analizuoti esant pastoviam arba kintamam išcentriniam pagreičiui iki 2300 g. Pagal [2], magnetinio atskyrimo metu mikrokanale 1 mL kraujo dalelių atskyrimas atliekamas 5 Hz dažniu. Kai magnetinis ratas yra sukamas, dalelės teka į šulinius ir reketą per stulpelius pagal jų dydį ir magnetines savybes. Publikacija [3] skirta šešių pakopų kaskados paramagnetinės magnetoforezės atskyrimo sistemos, skirtos kraujo dalelėms atskirti, remiantis jų būdingomis magnetinėmis savybėmis, tyrimui. Ši sistema gali atskirti kraujo daleles pagal jų rūšis naudojant magnetoforezines jėgas, sukurtas dėl didelio magnetinio lauko gradiento be magnetinio arba fluorescencinio žymėjimo. Kaskadiniu būdu sujungus šešis atskyrimo etapus, raudonųjų kraujo kūnelių lygis išoriniame kanale mažinamas etapas po etapo ir po šešių atskyrimo etapų pašalinamas iš srauto per du išorinius kanalus.

Galimybė manipuluoti mikrodalelėmis skysčiuose žemo dažnio virpesiais tiriami darbe [4], norint jas panaudoti mikroskysčių arba „laboratorija luste“ sistemose, naudojant žemo dažnio sužadinimo ir matavimo įrenginius. Tyrimai parodė, kad didesnio skersmens dalelės (nuo 42 μm) formuoja reguliarias koncentrinio žiedo formos struktūras esant kieto kūno ir skysčio sąlyčiui. Šių žiedų

išsidėstymas atitinka virpančio lašelio paviršiaus bangų antimazgų (pūpsnių) išsidėstymą, o mažesnės dalelės (10–30 μm) nesikaupia į žiedus, bet sukuriuoja kartu su skysčiu. Tai rodo, kad dominuojantys mechanizmai yra jautrūs dalelių dydžiui.

Mikrofluidinio filtravimo sistemose filtrų užteršimas yra viena iš pagrindinių veiksmingo ir nenutrūkstamo veikimo kliūčių [5]. Skysčio srautą paveikus žemo dažnio virpesiais, galima išlaisvinti sumaišytas nepageidaujamas polistireno daleles, įstrigusias tarp didesnių filtruojamų polistireno dalelių ir trukdančių nepertraukiamam nufiltruoto skysčio srautui tekėti. Šis mikrofluidinio filtravimo metodas buvo naudojamas vėžinėms ląstelėms išskirti iš kraujo ir parodė, kad skysčio virpesiai apsaugo filtrų užteršimą vėžio ląstelėmis ir todėl užtikrina nuolatinį mikrofluido tekėjimą.

Darbe [6] pateikti mikrodalelių ir ląstelių prisotinimo, valdomo kaupimo ir manipuliavimo mikrodalelėmis ir ląstelėmis ultragarsiniu aktuatoriumi, integruotu į mikrofluidinį lustą, suderinamą su didelės skiriamosios gebos optiniu mikroskopu, tyrimo rezultatai. Įrenginio korpusas yra suprojektuotas kaip dvigubo dažnio rezonuojantis indas, integruotas į skysčio kanalą. Akustinės spinduliuotės jėga pagrįsta suspaudimo poveikiu, aprašytu [7], geresniam dalelių atskyrimo efektyvumui, kuris apibrėžiamas kaip kanale sukauptų dalelių frakcija. Tokia technologija leidžia spręsti embolizacijos problemą atskiriant eritrocitus nuo lipidų dalelių. Kadangi dalelės yra raudonieji kraujo kūneliai ir lipidų dalelės plazmoje, eritrocitai kaupiasi slėgio mazge (kanalo centre), o lipidų dalelės kaupiasi slėgio antimazguose (pūpsniuose) – šalia šoninių sienelių. Kanalo pabaigoje raudonieji kraujo kūneliai praeina per centrinę išleidimo angą (23, pav., b), o lipidų dalelės išeina per šonines išvestis.

Garsas gali sukelti įvairių dydžių ir medžiagų objektus per orą, vandenį ir audinius. Tai leidžia manipuluoti ląstelėmis, skysčiais, junginiais arba gyvomis medžiagomis, jų neliečiant ir neužteršiant. Mikrodalelių perkėlimui, sukimui ir manipuliavimui yra skirta publikacija [8].

Motyvacija tyrimams atlikti

Buvo parodyta, kad iki šiol nėra greitų ir ekonomiškų mikrodalelių atskyrimo metodų, skirtų didesniems skysčio tūriams apdoroti. Ypač tai svarbu tais atvejais, kai išsiliejęs kraujas nuteka įvairių nelaimingų atsitikimų ar chirurginių intervencijų metu. Šios temos tyrimų apžvalga rodo, kad ultragarso metodai dažniausiai naudojami mikrodalelėms atskirti mikrokanaluose, todėl kraujo mėginius galima paruošti tik laboratoriniams tyrimams. Didelis kraujo tūris valomas naudojant brangią stacionarią įrangą, kurios neįmanoma transportuoti. Atsižvelgiant į tai, kad per kelias valandas tokio kraujo tinkamumas toliau naudoti yra apribotas, siūlomi metodai ir įranga yra savalaikiai ir labai svarbūs. Šio darbo tikslas – sukurti priemones, kurios būtų naudojamos šiam atotrūkiui įveikti.

2. TEORINIAI MIKRODALELIŲ ATSKYRIMO SKYSTYJE IR VALDYMO / LEVITACIJOS ORE TYRIMAI

Remiantis literatūros šaltinių apžvalgos išvadomis ir suformuluotais tikslais, prieš pradėdant tolesnius žingsnius, teoriškai turi būti išnagrinėtos mikrodalelių atskyrimo didesniuose tūriuose galimybės.

Mikrodalelių atskyrimo proceso modeliavimas

Šiam tikslui panaudota „Comsol Multiphysics“ programinės įrangos platforma („Comsol, Inc.“, Burlingtonas, Masačusetas, JAV), skirta garsiniu ir ultragarsiniu dažniu sklindančio akustinio slėgio poveikiui modeliuoti. Veiksniai, veikiantys daleles akustiniame lauke, leidžiantys jas atskirti arba sutelkti, yra susiję su:

- 1) Spinduliavimo galia – dėl svarbiausių jėgų, turinčių įtakos kūnui akustiniame lauke. Veikianti jėga sukelia dalelių judėjimą akustinės stovinčios bangos lauke;
- 2) Stokso (Stokes) stiprumu, judinančiu daleles akustinės stovinčios bangos lauke [38], kuri veikia dalelę pasipriešinimo ar trinties jėga;
- 3) Bjerknės [9] stiprumu. Kai dalelės pasiekia slėgio mazgą, jos yra paveikiamos tarpusavio sąveikos jėga, vadinama Bjerknės jėga. Tarpusavio sąveikos stiprumas yra dalelės patiriama spinduliuotės jėga, kylanti dėl akustinės bangos atspindžio nuo kitos dalelės;
- 4) Gravitacijos stiprumu. Bet kokia dalelė žemės gravitaciniame lauke veikiama gravitacijos arba žemės traukos, dėl kurios dalelė nusistovi, jei ji yra stacionaraus būvio, arba nukrypsta nuo tiesios trajektorijos iki artimiausio slėgio mazgo;
- 5) Bernulio stiprumu [10]. Kai dalelės yra akustinio slėgio mazgo srityje skysčio, kuris juda greičiu v , Bernulio traukos jėga atsiranda dėl sumažėjusio slėgio tarp dalelių.

Akustinės spinduliuotės jėga yra svarbi netiesinė jėga, kuria veikiamos dalelės akustiniame lauke. Akustinės spinduliuotės jėgos vektorius F_{rad} į dalelę gali būti apskaičiuotas kaip laike suvidurkinta antrojo laipsnio jėga, veikianti fiksuotą paviršių $\partial\Omega$ nedidelio klampumo dalelę supančio skysčio tūryje. Nedidelio klampumo skysčio atveju vektorius F_{rad} yra vidutinės trukmės netiesinio akustinio slėgio lauko antros eilės $\langle \rho_2 \rangle$ ir momentinio srauto tenzoriaus $\rho_0 \langle v_1 v_1 \rangle$ [11] suma:

$$\begin{aligned}
 F_{rad} &= - \int_{\partial\Omega} d\mathbf{r} \left\{ \langle p_2 \rangle \mathbf{n} + \rho_0 \langle (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_1) \mathbf{v}_1 \rangle \right\} \\
 &= - \int_{\partial\Omega} d\mathbf{r} \left\{ \left[\frac{\kappa_0}{2} \langle p_1^2 \rangle - \frac{\rho_0}{2} \langle v_1^2 \rangle \right] \mathbf{n} + \rho_0 \langle (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_1) \mathbf{v}_1 \rangle \right\}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

čia: ρ_0 – skysčio tankis, v_1 – pirmos eilės akustinio greičio laukas, $\langle p_1 \rangle$ – pirmos eilės tiesinio slėgio laukas, κ_0 – skysčio spūdumo koeficientas, $\mathbf{n}$ – normalinis vektorius.

Spinduliavimo jėga, veikianti mažą dalelę, patalpintą į stovinčią bangą, yra potencialios funkcijos gradiento jėga U_{rad} [12]:

$$F_{rad} = -\nabla U_{rad}, \quad (2)$$

$$U_{rad} = V_p \left[f_1 \frac{1}{2\rho_0 c^2} \langle p^2 \rangle - f_2 \frac{3}{4} \rho_0 \langle v_1^2 \rangle \right], \quad (3)$$

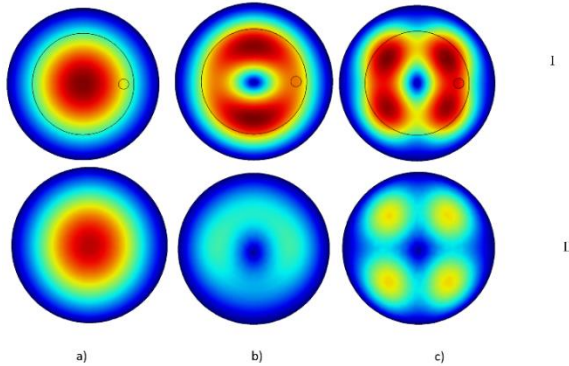
$$f_1 = 1 - \frac{K}{K_p}, \quad f_2 = \frac{2(\rho_p - \rho_0)}{2\rho_p + \rho_0}, \quad (4)$$

čia: ρ_p – dalelės tankis, c – garso greitis, f_1 yra realiai įvertintas ir priklauso tik nuo suspaudimo laipsnio tarp dalelės ir skysčio.

Dipolio sklaidos koeficientas f_2 yra susijęs su dalelės judesiu ir priklauso nuo skysčio klampumo, K – skysčio (kraujo) tūrio modulis, K_p – dalelės (eritrocito) tūrio modulis, V_p – dalelės tūris.

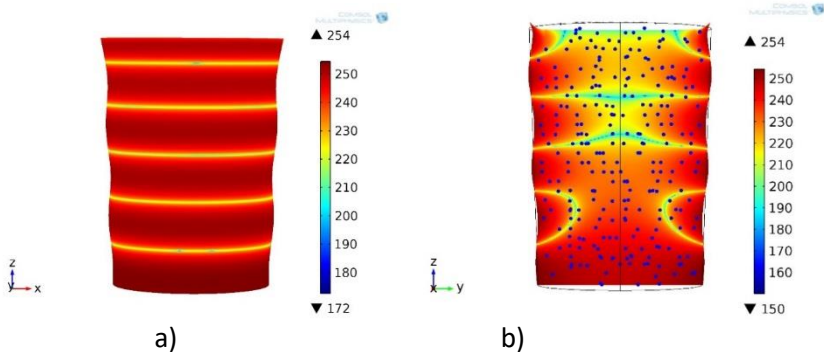
Mikrodalelių manipuliavimas skysčiuose garso dažnio akustinėmis bangomis

Šiam tikslui buvo pasirinktas kūgio formos plastiko indas su pritvirtintu dugne disko formos pjezo davikliu. Akustinėms bangoms sužadinti buvo pasirinktas disko formos pjezo daviklis-bimorfas, sudarytas iš pjezo elemento ir bronzinio disko. Atlikus pjezo daviklio-bimorfo sąveikoje su skysčiu modeliavimą, buvo gauti šie rezultatai (1 pav.).



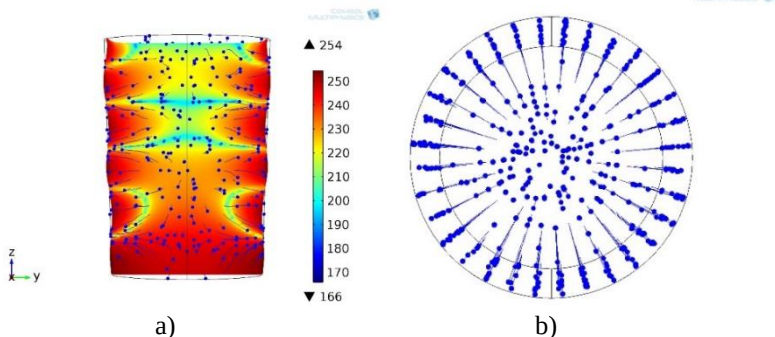
1 pav. Pjezo daviklio-bimorfo modeliavimo sąveikoje su skysčiu rezultatai: I eilutėje parodytos virpesių formos iš pjezo daviklio pusės; II eilutėje parodytos virpesių formos iš skysčio pusės: a – pirmoji forma esant 1,4 kHz, b – antroji 9,5 kHz ir c – trečioji, esant 13,8 kHz žadinimo dažniui

Kadangi cilindro formos plastiko indo apačioje sumontuotas disko formos pjezo daviklis-bimorfas yra kietai įtvirtintas, tai jis taip pat sužadina šio indo sienelės, kaip parodyta 2 pav.



2 pav. Virpantis indo korpusas ir akustinio slėgio lygis (dB) jo (a) ir virpančio indo sienelės ašinis pjūvis yz plokštumoje ir akustinio slėgio lygis (dB) su tolygiai pasiskirsčiusiomis mikrodalelėmis pradinio laiko momentu $t = 0s$, sužadinus disko formos pjezo daviklį-bimorfą 13,8 kHz dažniu

Žadinant 13,8 kHz dažniu, ant indo korpuso paviršiaus atsiranda penkios slėgio lygio juostos (2 pav., a). Akustinės bangos veikiamos mikrodalelės juda link mažo akustinio slėgio lygio zonos. Šis fizikinis reiškinys ir gali būti taikomas dalelėms atskirti naudojant garsinio dažnio mechaninius virpesius. Pradinio laiko momentu $t = 0s$ dalelės yra tolygiai pasiskirsčiusios skysčio tūryje (2 pav., b). Žemiau esančiame ašiniame indo pjūvyje esančio skysčio tūryje matomos akustinio slėgio pasiskirstymo zonos: trys viršutinės, kuriose yra žemas garso slėgio lygis, yra statmenos indo ašiai, o dvi apatinės – ne. 3 pav. pateiktos dalelių padėties akustinio slėgio lygyje ir jų judėjimo trajektorijos laiko momentu $t = 12s$. Kaip matome, dalelės „prilipo“ prie indo sienelės mažo akustinio slėgio lygio zonose, taip pat susitelkė trijose viršutinėse žemo slėgio zonose, statmenose indo ašiai. Dalelių judėjimas yra vertikalus netoli indo sienelių savosios formos antimazginių zonų, horizontalus mazginėse zonose ir įstrižas tarp jų. Todėl jėgos stumia hidrofiliškas (lengvesnes) daleles link mazgų. Akustinių bangų superpozicijos atveju galima stebėti, kad skystis rezonuoja, dėl to dalelės pasiskirsto visame jo tūryje. 3 pav., b, parodytos dalelių trajektorijos kitoje plokštumoje, iš indo viršaus, kuri atitinka xy plokštumą.

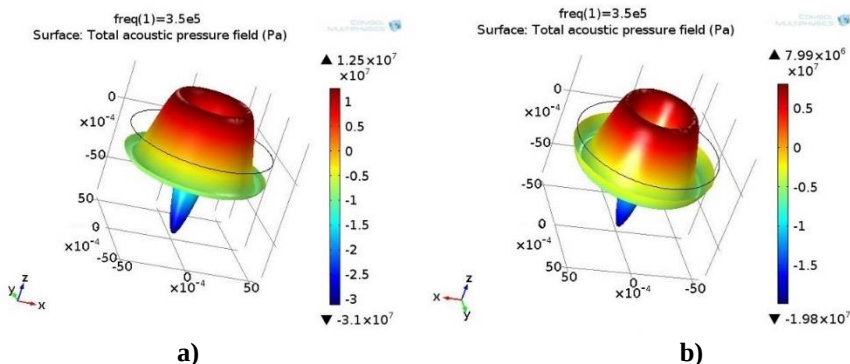


3 pav. Mikrodalelių judėjimo kryptys ir jų padėtys po 12s ašiniame indo pjūvyje (a) ir iš indo viršaus (b)

Kaip matome, mikrodalelės „dreifuoja“ link indo paviršiaus. Tai susiję su indo sienelės, kuri deformuojasi viena iš savųjų formų priklausomai nuo žadinimo dažnio, virpesiais. Bėganti akustinė banga sukelia skysčio su mikrodalelėmis srautą, ir šios dalelės tekėdamos nukrypsta link sienelės žemesnio slėgio mazginių pjūvių zonos.

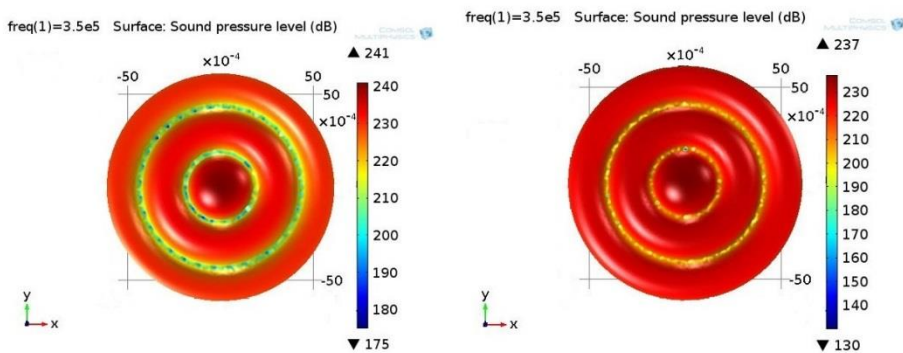
Mikrodalelių atskyrimas skystyje, naudojant ultragarsinio dažnio akustinį sužadinimą

Modeliuojant skysčio su mikrodalelėmis akustinio sužadinimo procesą, buvo naudojamas PZT tipo cilindro formos pjezo aktuatorius ($\varnothing 15 \times \varnothing 11 \times 27 \text{ mm}$). Akustinės stovinčiosios bangos slėgio laukas pavaizduotas 4 pav.



4 pav. Stovinčios akustinės bangos slėgio laukas (Pa) biologinėje (a) ir vandens (b) suspensijoje. Žadinimo dažnis – 350 kHz. Aukšto slėgio plotas yra pavaizduotas raudonoje, o žemo – mėlynoje slėgio zonoje. Aukšto ir žemo slėgio reikšmės pasiekia keletą kPa, tačiau yra priešingos krypties

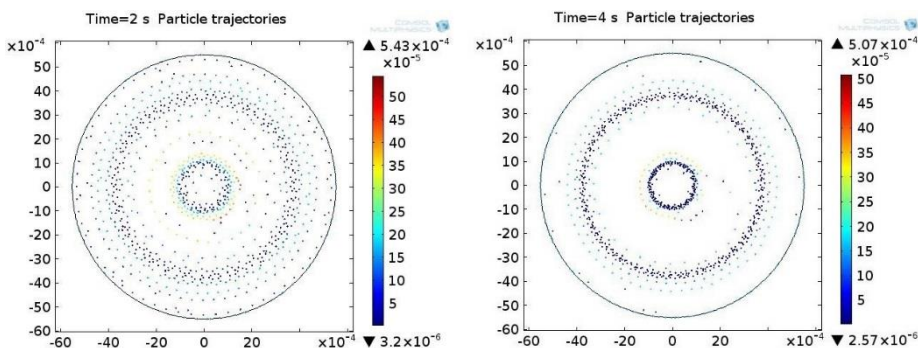
Akustinio slėgio lygis pavaizduotas 5 pav.



b)

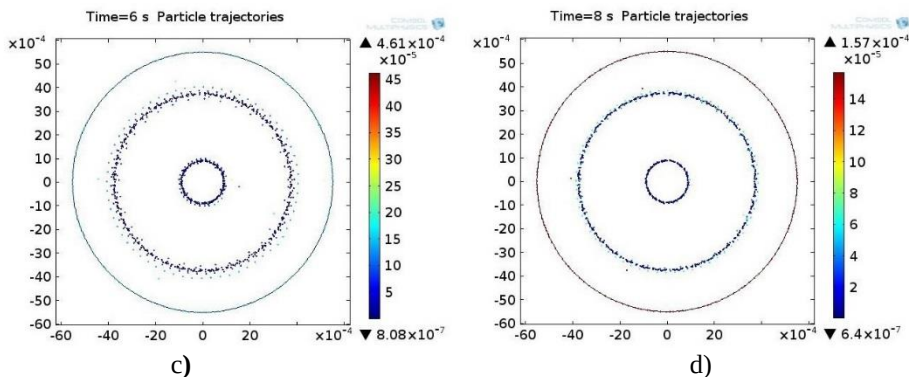
5 pav. Akustinio slėgio lygis (dB) biologinėje (a) ir vandens (b) suspensijoje. Žadinimo dažnis – 350 kHz

Akustinio slėgio laukas abiejuose skysčiuose yra analogiškas, matomos trys aukšto slėgio ir dvi žemo slėgio sritys, tačiau žemo slėgio sričių plotai skiriasi skirtingų skysčių atvejais: biologinės suspensijos atveju jos yra platesnės nei vandens suspensijos. Tai lemia skirtingos skysčių savybės (klampis). Mikrodalelių pasiskirstymas akustiniame lauke biologinėje suspensijoje skirtingais laiko momentais parodytas 6 pav.



a)

b)



6 pav. Mikrodalelių pasiskirstymas akustinio slėgio lauke biologinėje suspensijoje skirtingais laiko momentais t : a – 2s, b – 4s, c – 6s, d – 8s

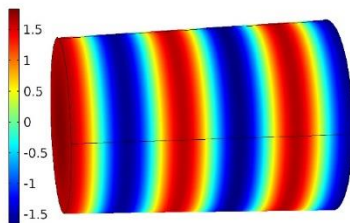
Nustatyta, kad tiek biologinių, tiek vandens suspensijos dalelių pasiskirstymas akustinio slėgio lauke yra toks pats, tačiau dalelių konvergencija į mažo slėgio lauką yra skirtinga. Kai skystis yra vanduo, dalelės susikaupia žemo akustinio slėgio lauke per 4s, o biologinės suspensijos atveju – du kartus lėčiau, t.y. 8s. Kitas skirtumas tarp tiriamų skysčių yra dalelių pasiskirstymas žemo akustinio slėgio laukuose. Biologinių suspensijų dalelių koncentracijos zonos proceso pabaigoje, t.y. kai skystis tampa stacionarus, yra platesnės, palyginti su vandens pagrindu suformuotų suspensijų. Galiausiai trečiasis skirtumas yra mažo akustinio slėgio zonų geometrinių matmenų nesutapimas: biologinės suspensijos kaip skysčio atveju zonos spindulys yra mažesnis 30 proc., palyginti su vandens suspensijos. Į tai reiktų atsižvelgti atskiriant įvairių klampių suspensijų mikrodaleles.

Vibroakustinis mikrodalelių valdymas ir levitavimas ore

Modeliuoti paimtas oro pripildytas organinio stiklo cilindras su dangteliu, kurio apačioje yra pjezo aktuatorius. Šis uždavinys buvo įgyvendintas COMSOL aplinkoje sujungiant deformuojamo kūno ir akustinio lauko fizikinius procesus skaitmeniniu baigtinių elementų metodu. Po modalinės analizės iš gautų rezultatų (7 pav., a) galima pastebėti, kad akustinis laukas turi tris aiškiai apibrėžtas didelio ir mažo slėgio zonas, kurios nuosekliai kartojasi.

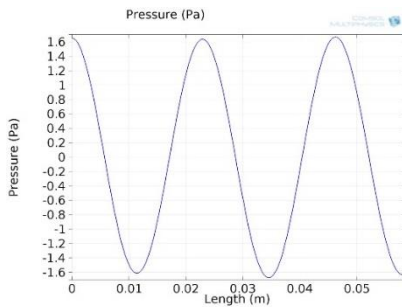
Šio slėgio kitimo pobūdis cilindre yra pavaizduotas 7 pav., b. Matome, kad turime dvi su puse akustinės bangos. Esant šiam slėgiui, priklausomai nuo cilindro, nulis atitinka cilindro apačią.

▲ 1.83



▼ -1.67

a)



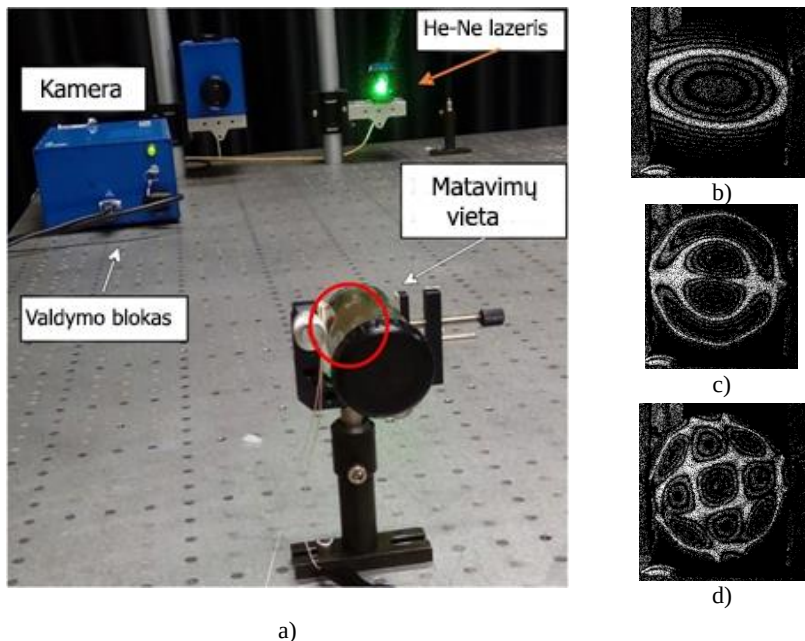
b)

7 pav. Akustinis slėgis (Pa) ant cilindro paviršiaus (a) ir akustinio slėgio priklausomybė išilgai cilindro sudaromosios (b), kai sužadavimo dažnis 14,8 kHz

3. EKSPERIMENTINIAI MIKRODALELIŲ ATSKYRIMO TYRIMAI

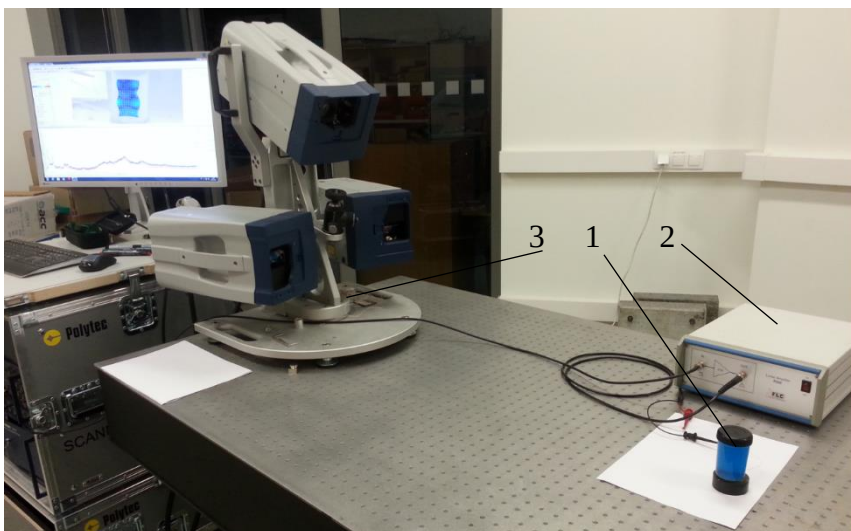
Mikrodalelių atskyrimas garso dažnio akustiniu sužadinimu

Disko formos pizoelektrinio akuatoriaus virpesių formos buvo registruojamos naudojant holografino stendo PRISM sistemą (8 pav.)



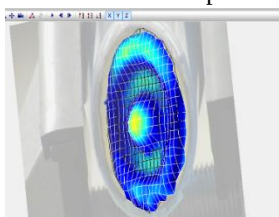
8 pav. Eksperimento metu naudojamas holografinės interferometrijos stendas PRISM disko formos pjezoelektrinio akuatoriaus virpesių formoms registruoti (a) ir pjezo daviklio-bimorfo holografinės virpesių modos: b – I moda esant 1,3 kHz, c – II esant 11,9 kHz, d – III esant 13,4 kHz

Rezultatai parodė, kad pirmoji pjezoelektrinio daviklio bimorfo virpesių moda susižadina, kai 1,3 kHz esant 200 mV įtampai, antroji – 11,9 kHz, o trečioji – 13,4 kHz. Siekiant įvertinti indo su dugne pritvirtintu disko formos pjezodavikliu-bimorfu ir užpildytu skysčiu virpesių modos buvo panaudotas 3D „Polytech“ skeneris (9 pav.).

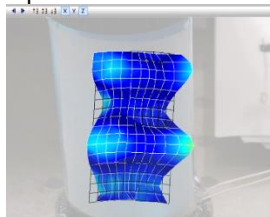


9 pav. Eksperimentinis mikrodalelių atskyrimo garsinio dažnio virpesiais standas: 1 – mikrodalelių atskyrimo įrenginys; 2 – stiprintuvas P200 („FLC Electronics“ AB, Švedija), 3 – 3D skenavimo vibrometras PSV-500-3D-HV („Polytec GmbH“, Vokietija)

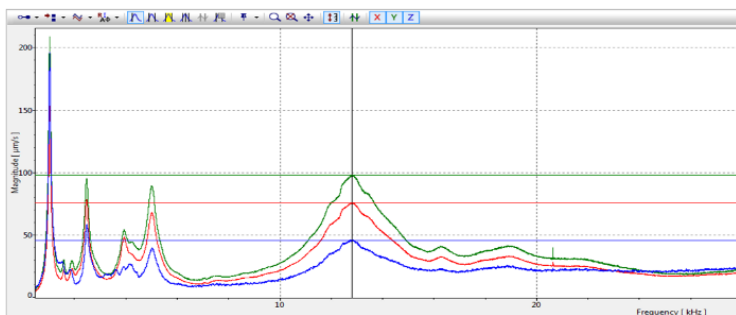
Skenavimo rezultatai pavaizduoti 10 pav.



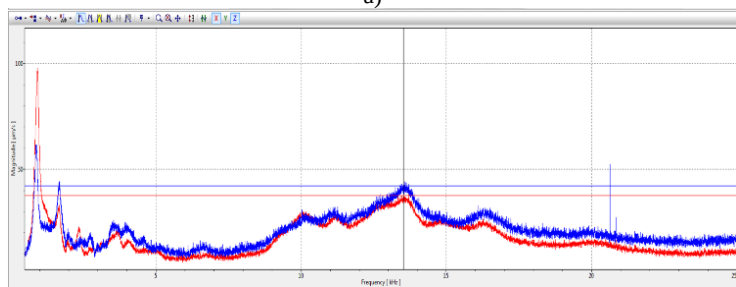
a)



b)



a)



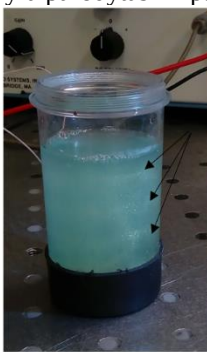
b)

10 pav. Disko formos pjezodaviklio-bimorfo (a) ir indo sienelės (b) ketvirtoji savųjų virpesių formos ir amplitudės dažnio charakteristikos esant 13,5 kHz akustiniam sužadinimui

Ekspirimentinis stendas yra parodytas 11 pav.



a)



b)



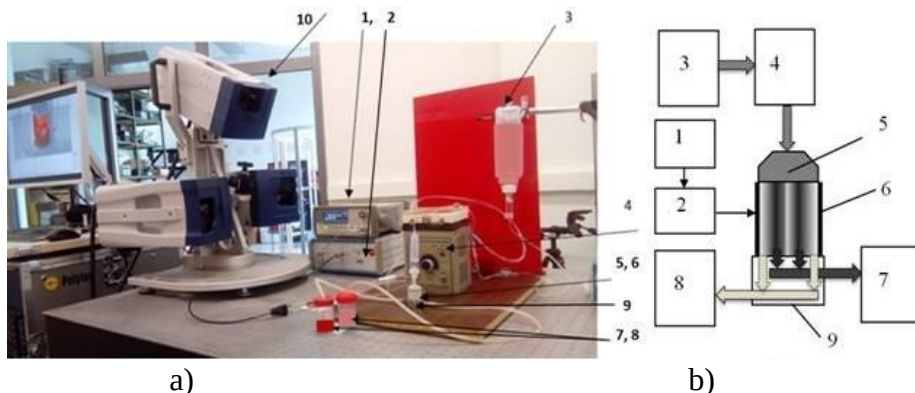
c)

11 pav. Ekspirimentinis mikrodalelių surinkimo garsinio dažnio virpesiais stendas (a) ir mikrodalelių koncentracijos žiedai (b, c), priklausomai nuo skysčio kiekio, esant 12,2 kHz dažniui

Eksperimento metu nustatyta, kad, praėjus 5–8 sekundėms nuo akustinio rezonatoriaus sukeliama sužadavimo signalo, mikrodalelės pradeda kauptis aplink indo virpesių formų mazgines zonas, taip susisluoksniuodamos indo sienelės pjūviuose, išsidėsčiusiuose vienodais atstumais.

Eksperimentinis ultragarsinio mikrodalelių surinkimo pagrindimas

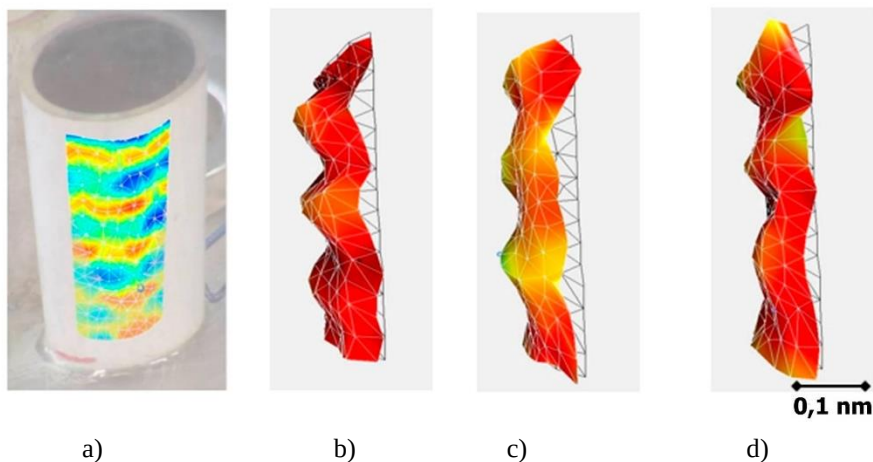
Sukurta eksperimentinė įranga su 3D „Polytec“ skenuojamuoju vibrometru parodyta 12 pav., a.



12 pav. Mikrodalelių atskyrimo ultragarsu eksperimentinio stendo nuotrauka (a) ir blokinė schema (b): ultragarso dažnio signalo generatorius („Agilent“ 33220A) – 1, įtampos stiprintuvas P200 („FLC Electronics“) – 2, indas su suspensija – 3, peristaltinis siurblys (modelis NP-1M) – 4, pjezoelektrinio akuatoriaus įėjimas – 5, pjezoelektrinis cilindro formos akuatorius – 6, mikrodalelių ir skysčio talpyklos – 7 ir 8, skysčio kolektorius – 9 ir 3D „Polytec“ skeneris-vibrometras – 10

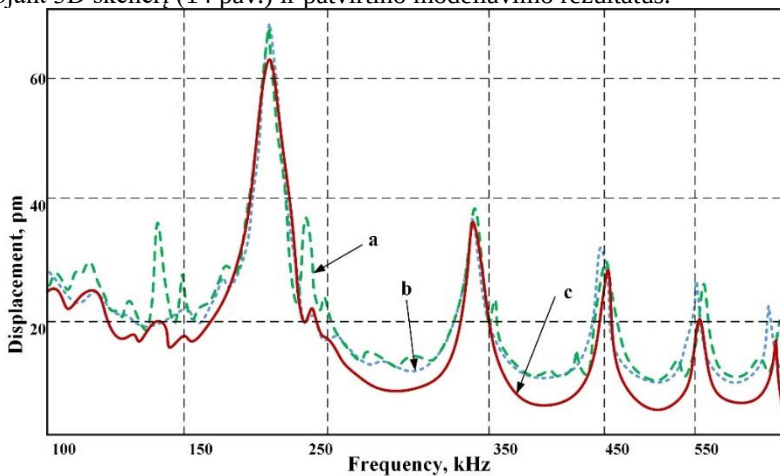
Akustinis poveikis skysčiui atliekamas naudojant vamzdžio formos pjezoelektrinį akuatorių; mikrodalelės skystyje atskirti naudojamas ultragarsas, kuriam veikiant mikrodalelės koncentruojasi akustinės stovinčios bangos mazginiuose žieduose. Atskirtos dalelės ir skystoji fazė per skysčio kolektorių 9 surenkamos induose 7 ir 8. Pjezoelektrinio vamzdžio formos akuatoriaus modas yra registruojamos naudojant 3D „Polytec“ skenavimo vibromatruoklį 10. Eksperimentinio stendo struktūrinė schema pateikta 12 pav., b. 13 pav., a, parodytas cilindrinio pjezoelektrinio akuatoriaus skenuotas segmentas ir matavimo taškų tinklėlis. Siekiant sumažinti gravitacijos įtaką mikrodalelių atskyrimo procesui, vamzdžio formos pjezoelektrinis akuatorius pastatytas vertikaliai. Eksperimentuojama buvo 100–650 kHz dažnių diapazonu. Matavimai atlikti esant tuščiam pjezoelektriniam akuatoriui (13 pav., b), su vandens suspensija (13 pav., c) ir su biologine suspensija-sintetiniu klampiu skysčiu (13

pav., d). Kaip matyti iš rezultatų, aktuatoriaus deformacijos be ir su skysčiais yra panašios.



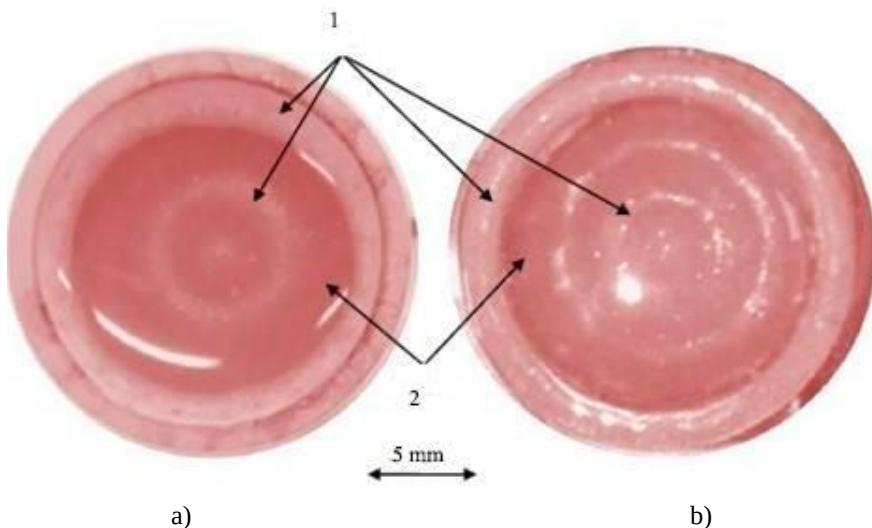
13 pav. Vamzdžio formos pjezoelektrinio aktuatoriaus nuotrauka ir jos paviršiaus segmentas (a), kuris yra 3D nuskenuotas, siekiant nustatyti virpesių (b, c, d) modas esant 345 kHz dažniui

Aktuatoriaus su skysčiu virpesių dažnio spektras buvo matuojamas naudojant 3D skenerį (14 pav.) ir patvirtino modeliavimo rezultatus.



14 pav. Nuskenuoto aktuatoriaus paviršiaus dažnio vidutinis spektras, gaunamas matavimais 3D skeneriu: a – be skysčio; b – su vandeniu; c – su biologine suspensija – klampiu skysčiu

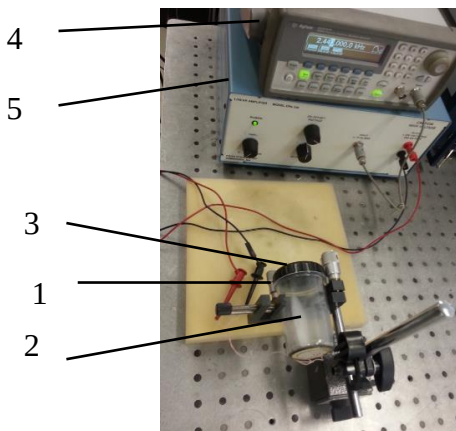
Esant 202 kHz dažniui, akuatoriaus deformacijų amplitudės yra didžiausios, tačiau eksperimentas parodė, kad, esant šiam dažniui, skysčio srauto nestabilumas sukelia suspensijos maišymą, o ne mikrodalelių atskyrimą, kas nebūdinga esant 345 kHz dažniui. Todėl mikrodalelėms atskirti buvo pasirinktas 345 kHz dažnis. Mikrodalelių atskyrimo procesas pjezocilindre stovinčia akustine banga pavaizduotas 15 pav., esant 202 kHz (a) ir 345 kHz (b) dažniams.



15 pav. Dalelių pasiskirstymas pjezocilindre, veikiant stovinčiai akustinei bangai: a – 202 kHz sužadavimo dažnis; b – 345 kHz sužadavimo dažnis; 1– mazginių ir 2– antmazginių žiedų sritys

Vibroakustinis mikrodalelių valdymas ir levitavimas ore

Akustinio mikrodalelių valdymo ir levitavimo ore koncepcija realizuojama naudojant virpančią cilindą, kurio virpesius sužadina disko formos pjezodaviklis-bimorfas, esantis cilindro dugne, tuo pačiu metu sukeliantis akustinę bangą, kuri atspindi nuo kitame cilindro gale esančio reflektoriaus (16 pav.).



16 pav. Eksperimentinis dalelių valdymo / sukėlimo stendas: 1 – cilindrinis rezonansinis bangolaidis; 2 – disko formos pjezoelektrinis akuatorius; 3 – mikrodalelės; 4 – signalų generatorius („Agilent“ 33220A); 5 – stiprintuvas EPA-104

Galiausiai sukuriuojančios akustinės stovinčiosios bangos eksperimento metu buvo matomas dėl cilindrinio indo sienelių savųjų formų vykstantis mikrodalelių judėjimas ir sutelkimas į vertikalius stulpelius. Mikrodalelės šiuose stulpeliuose telkiasi virpančios indo sienelės mazginiuose pjūviuose. Sukurių susidarymas iš abiejų stulpelių pusių yra mikrodalelių levitavimo priežastis (17 pav.).



a)



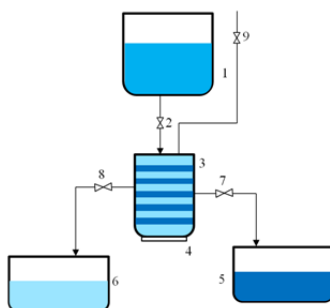
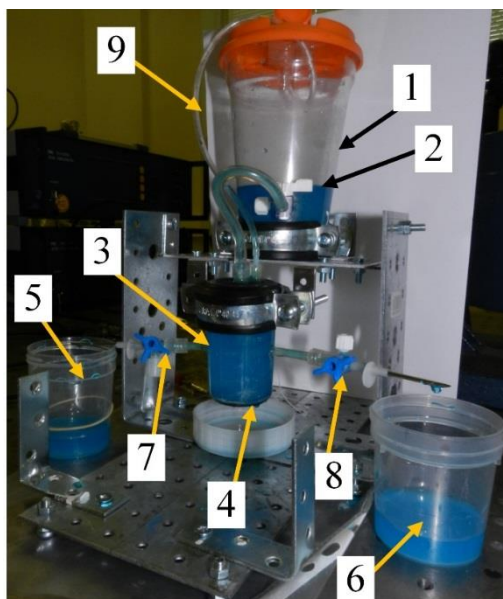
b)

17 pav. Mikrodalelių sukėlimas cilindrinio indo sienelių savųjų formų mazginiuose pjūviuose esant įvairiems sužadinimo dažniams: a – 2,44 kHz; b – 14,2 kHz

4. SUKURTŲ ĮRENGINIŲ PROTOTIPŲ APRAŠAI

Mikrodalelių atskyrimas naudojant garso dažnio akustinį sužadinimą

Siekiant pademonstruoti mikrodalelių atskyrimo galimybes, eksperimentas buvo atliekamas su skysčiu, lakštinio stiklo indu, kurio dugne buvo įtvirtintas pjezokeraminis disko formos bimorfas, o pats indas užpildytas 50/50 proc. vandens ir glicerino suspensijos su žėručio silikato 5–15 μm skersmens mikrodalelėmis, vandenyje tirpaus pigmento gauti kontrastingi rezultatai. Taip pat buvo sukurtas įrenginys, leidžiantis iš skysčio atskirti koncentruotas mikrodaleles. Eksperimentinio stendo schema parodyta 18 pav.



b)

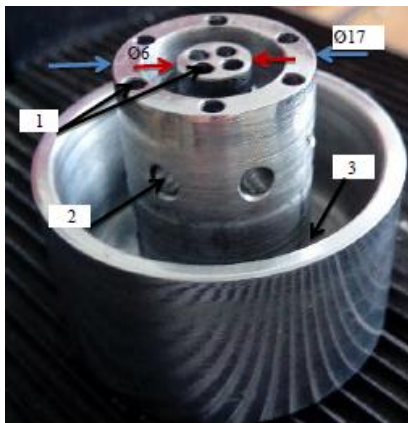
a)

18 pav. Mikrodalelių atskyrimo sistemos bendras vaizdas (a) ir funkcinė schema (b).

1 – skysčio su mikrodalelėmis talpykla; 2 – įleidimo vožtuvas; 3 – akustinio separatoriaus kamera su skysčiu; 4 – pjezoelektrinis disko formos bimorfas; 5 – prisotinta mikrodalelių suspensijos fazė; 6 – išvalyta skysčio fazė; 7 – mikrodalelių prisotintos suspensijos fazės išleidimo vožtuvas; 8 – išvalytos suspensijos fazės išleidimo vožtuvas; 9 – oras

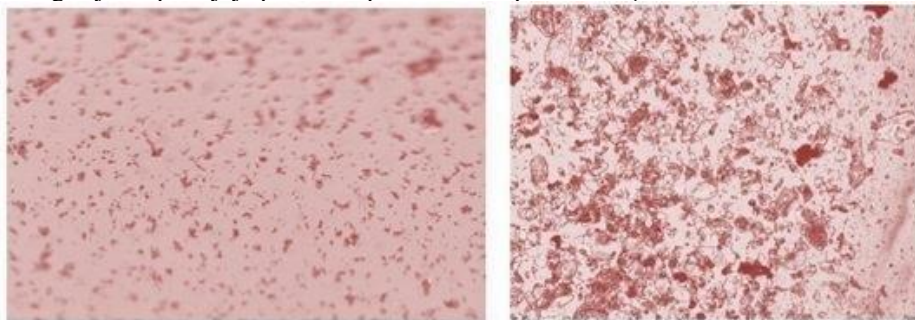
Mikrodalelių atskyrimas naudojant ultragarso dažnio akustinį sužadinimą

Mikrodalelėms iš biologinės suspensijos atskirti buvo suprojektuotas ir pagamintas specialus kolektorius (19 pav.). Šio kolektoriaus kanalai yra išdėstyti apskritimuose, jų skersmuo sutampa su akustinės stovinčios bangos mazginių žiedų, kuriuose kaupiasi mikrodalelės, skersmenimis.



19 pav. Pagaminto kolektoriaus nuotrauka: 1 – angos mikrodalelių fazei surinkti; 2 – suspensijos fazės surinkimo angos; 3 – suspensijos fazės tūris

Siekiant nustatyti mikrodalelių surinkimo efektyvumą, mikroskopu buvo ištirti du atskiri mėginiai. Rezultatai parodyti 20 pav. (a pavaizduotos mikrodalelės biologinėje suspensijoje prieš; b – po surinkimo procedūros).



a)

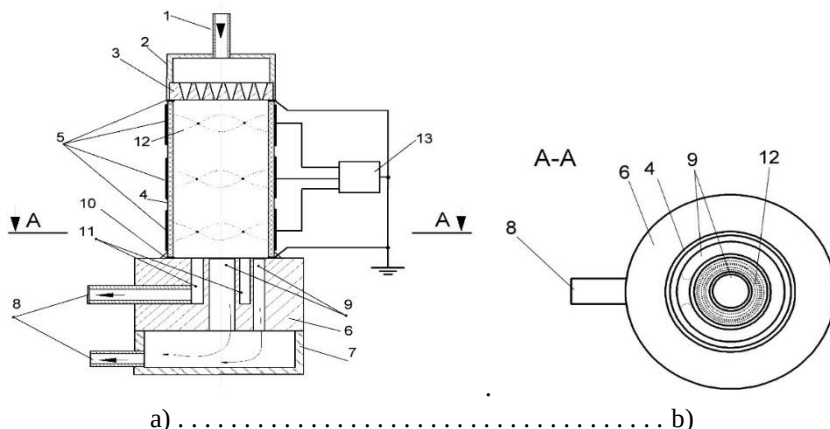
b)

20 pav. Mikroskopinis biologinės suspensijos mėginių vaizdas prieš (a) ir po (b) mikrodalelių surinkimo procedūros

Pasirinkome šių suspensijų tipus, kad pademonstruotume siūlomų atskyrimo technologijų universalumą ir pagrįstumą eksperimentu, kuris būtų sudėtingas dėl greitai kintančių eritrocitų savybių kraujyje. Standartinės kraujo mėginių tvarkymo gairės nurodo, kad plazma ar serumas turi būti atskirti (20–30 min.) iš ląstelių kuo greičiau po sudedamųjų krešulių susidarymo, kad būtų išvengta krešumo sukeltų analitės serumo koncentracijos pokyčių [13]. Eritrocitų agliutinacija gali pasireikšti per kelias minutes po to, kai kraujas pateks už žmogaus kūno. Atskirai tokia pati raudonųjų kraujo kūnelių masė, palaikoma kambario temperatūroje ilgiau nei 1 val., nenaudojama perpylimui atlikti; greičiau jis turėtų būti siunčiamas perdirbti. Eksperimentams dirbtinis kraujas buvo imtas veikti kaip eritrocitų pakaitalas [14]. Du pagrindiniai mikrodalelių, sudarančių mazgų ratą, parametrai yra susiję su skysčio akustinio sužadinimo dažniu ir konstrukciniais pjezopavaros mechanizmo matmenimis. Kadangi mazgų sluoksnių arba žemo slėgio sričių, kuriose išsiskiria kietosios mikrodalelės, skaičius padidėja esant didesniai dažniui ir koncentruojamas 345 kHz dažniu, žemesnysis 202 kHz dažnis buvo ignoruotas dėl nestabilaus mikrodalelių atskyrimo proceso ir pasirinktas 345 kHz dažnis, kuriam esant mikrodalelių atskyrimas vyksta stabiliai efektyviai veikiant akustinėms jėgoms. Mikroskopinių koncentracijų žiedų skersmenys sutampa ir su modeliavimo, ir su eksperimentu. Eksperimentiškai ir teoriškai buvo parodyta, kad abiejų suspensijų mikroskopinių agregavimo ratų skersmenys buvo vienodi, o apskritimo formavimo laikotarpis skyrėsi dvigubai. Šis laikotarpis (nuo 4 iki 8 sekundžių) gali būti laikomas labai trumpu, palyginti su kitais žinomais kraujo gryninimo metodais [15]. Rezultatai rodo, kad, didinant skysčio kiekį ir judinant jį nuo mikrofajijos, galima gauti tokius pačius rezultatus, kaip ir mikroplūsmės atveju [16]. Nepaisant to, kad biologinis skystis yra labai jautrus ultragarso signalų įtakai, mūsų patirtis parodė, kad 345 kHz dažnis yra saugus ląstelių membranoms [17].

Tyrimų rezultatų aprobavimas

Ultragarso mikrodalelių atskyrimo įrenginio prototipo konstrukciją ir valdymo sistemą sudaro (21 pav.): 1– suspensijos padavimo į rezonatoriaus kamerą vamzdelis, 2 – filtravimo kamera, 3– filtravimo elementas, mažinantis srauto turbulenciją, 4– pjezokeraminis cilindras-rezonatorius, jį sužadinus elektriniais signalais iš valdymo bloko 13, jo viduje susidaro akustinės stovinčios bangos, ir jų mazguose susiformuoja suspensijoje esančios mikrodalelės 12, 5 – pjezokeraminio cilindro elektrodai, į kuriuos nuosekliai paduodami elektros signalai iš sužadinimo-valdymo bloko 13, 6 – mikrodalelių atskyrimo frakcijų skirstytuvai, 7 – mikrodalelių atskirtos suspensijos kamera, 8 – išskirtų iš suspensijos frakcijų pašalinimo vamzdeliai, 9 – mikrodalelių atskyrimo frakcijų skirstytuve kanalai, 10 – virpesių slopinimo tarpinė, 11 – atskirtų mikrodalelių nuvedimo kanalas, 12 – mikrodalelės skystyje, susidariusios veikiant pjezokeraminio cilindro virpesiams, 13 – pjezokeraminio cilindro-rezonatoriaus sužadinimo-valdymo blokas.



21 pav. Sukurto mikrodalelių ultragarsinio atskyrimo įrenginio prototipo schema

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Atlikta tyrimų darbų disertacijos tema apžvalga, suformuluotas tyrimo tikslas ir uždaviniai. Išanalizuoti garsiniai ir ultragarsiniai biologinių mikrodalelių atskyrimo ypatumai.
2. Sukurtas skaitmeninis-matematinis mikrodalelių garsinio atskyrimo skystyje ir valdymo / levitacijos ore modelis. Viena efektyviausių yra ketvirtoji skysčiu užpildyto cilindro formos indo, aktyvinamo dugne įtvirtintu disko formos pjezo davikliu-bimorfu 13,8 kHz dažniu, kuri leidžia atskirti mikrodaleles per 12 s.
3. Sukurtas skaitmeninis ultragarsinio mikrodalelių atskyrimo skysčiu užpildytame pjezokeraminiame cilindre matematinis modelis. Išskirtas tinkamiausias 345 kHz sužadavimo dažnis, kuriam esant mikrodalelės susikaupia vandenyje stovinčios akustinės bangos žemo slėgio zonose per 4 s, o biodalelės kraujyje – per 8 s.
4. Sukurtos mikrodalelių garsinio atskyrimo skystyje ir valdymo / levitavimo ore priemonės. Modeliavimo rezultatams validuoti panaudotas holografinės interferometrijos stendas PRISM.
5. Sukurta ultragarsinio mikrodalelių atskyrimo skystyje įranga. Pjezokeraminių cilindrų modilinei analizei buvo naudojamas 3D „Polytec“ skenavimo vibrometras. Gauti papildyto mikrodalelėmis ir išvalyto nuo mikrodalelių skysčio bandiniai.
6. Garsinio ir ultragarsinio mikrodalelių atskyrimo skirtinguose skysčiuose metodų skaičiuojamieji modeliai buvo validuoti eksperimentiškai. Nedidelis skirtumas tarp modeliavimo (350 kHz) ir eksperimentiniu būdu

- gautų (345 kHz) ultragarso dažnių ir atitinkamai (13,5 kHz) ir (13,8 kHz) garso dažnių, kaip ir mikrodalelių sankauptų padėčių, rodo, kad matematinis modelis imituoja tikrąjį kraujo gryninimo / valymo procesą.
7. Pasiūlytas mikrodalelių atskyrimo ultragarsinėmis bangomis prototipas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. LERCHE, D., SOBISCH, T. (2007). Consolidation of concentrated dispersions of nano- and microparticles determined by analytical centrifugation. *Powder Techn.* 16 pp. 46–49.
2. MURRAY, C., PAO, E., TSENG, P., AFTAB, S., KULKARNI, R., RETTIG, M., DI CARLO, D. (2016). *Quantitative Magnetic Separation of Particles and Cells Using Gradient Magnetic Ratcheting* Small 12(14) pp. 1891–1899.
3. JUNG, Y., CHOI, Y., HAN, K.-H., FRAZIER, A. B. (2010). Six-stage cascade paramagnetic mode magnetophoretic separation system for human blood samples, *Biomedical Microdevices*, August, Volume 12, Issue4, pp 637–645.
4. WHITEHILL, J., NEILD, A., WAH NG, T., STOKES, M. (2010). Collection of suspended particles in a drop using low frequency vibration. *Appl. Phys. Lett.* 96(5).
5. YOON, Y., KIM, S., LEE, J., CHOI, J., KIM, R.-K., LEE, S.-J., SUL, O., AND LEE, S.-B. (2016). Clogging-free microfluidics for continuous size-based separation of microparticles. *Scientific Reports*, 6: 26531.
6. MANNEBERG, O., VANHERBERGHEN, B., SVENNEBRING, J., HERTZ, H. M., ÖNFELT, B., WIKLUND, M.(2008). A three-dimensional ultrasonic cage for characterization of individual cells. *Appl. Phys. Lett.* 93.
7. PETERSSON, F., NILSSON, A., HOLM, C., JÖNSSON, H. AND LAURELL, T. (2005). Continuous separation of lipid particles from erythrocytes by means of laminar flow and acoustic standing wave forces. *Lab on a Chip*, Issue 1.
8. MARZO, A., SEAH, S. A., DRINKWATER, B. W., SAHOO, D. R., LONG, B., SUBRAMANIAN, S. (2015). Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects, *Nature Communications* 6, Article number: 8661.
9. WANG, J., DUAL, J. (2012). Theoretical and numerical calculation of the acoustic radiation force acting on a circular rigid cylinder near a flat wall in a standing wave excitation in an ideal fluid. *Ultrasonics*, Volume 52, Issue 2, February, Pages 325-332.
10. SAADATMAND, M. (2012). *A Study on Vibration-Induced Particle Motion under Microgravity*, Doctor of Philosophy thesis. University of Toronto, 259 p.
11. SETTNER, M., BRUUS, H. (2012). Forces acting on a small particle in an acoustical field in a viscous fluid, *Phys Rev E*, 85, 016327 pp. 1-12.
12. GOR'KOV, L. P. (1962). On the Forces Acting on a Small Particle in an Acoustical Field in an Ideal Fluid. *Sov Phys Dokl*, 6:773.
13. TURCHIANO, M., NGUYEN, C., FIERMAN, A., LIFSHITZ, M., CONVIT, A. (2013). Impact of blood sample collection and processing

- methods on glucose levels in community outreach studies. *J. of Envir. and Pub. Health*. pp. 4.
14. OTTERSTEDT, J. E., BRANDRETH, D. A. (2013). Small Particles Technology, *Springer Sci. & Bus. Med.*, pp. 206-208.
 15. STEGMAYR, B. G. (2005). A survey of blood purification techniques. *Transf. Apher. Sci.* 32(2) pp. 209-20.
 16. DEVENDRAN, C., GRALINSKI, I., NEILD, A. (2014). Separation of particles using acoustic streaming and radiation forces in an open microfluidic channel. *Microfluid. Nanofluid.* 17 pp. 879–890.
 17. WU, J., NYBORG, W. L. (2008). Ultrasound, cavitation bubbles and their interaction with cells. *Adv. Drug. Deliv. Rev.* 60 pp. 1103–1116.
 18. BUBULIS A, GOLINKA E, OSTASEVICIUS V, JURENAS V. Ultrasonic microparticles separation device: 2017 507: 2017 04 28.

AUTORĖS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

„ISI Web of Science“ publikacijos su citavimo indeksu

1. Vytautas Ostasevicius, Vytautas Jurenas, Ievgeniia Golinka, Rimvydas Gaidys, Algimantas Aleksa. **Separation of microparticles from suspension utilizing ultrasonic standing waves in a piezoelectric cylinder actuator** // Actuators / MDPI, Basel, Switzerland / Actuators: EISSN 2076-0825. 2018, Vol 7(2), no. 14, p. 1-12.

2. Ostaševičius, Vytautas; Golinka, Evgenia; Jūrėnas, Vytautas; Gaidys, Rimvydas. **High frequency separation of suspended micro/nanoparticles** // Mechanica / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslu akademija, Vilnius Gedimino technikos universitetas/Kaunas: KTU. ISSN 1392-1207. 2017, Vol 23, no. 3, p. 408-411. Impact Factor 0.382.

3. Serhiy Horiashchenko, Ievgeniia Golinka, Algimantas Bubulis, Vytautas Jurenas. **Simulation and research of the nozzle with an ultrasonic resonator for spraying polymeric materials** // Mechanica / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslu akademija, Vilnius Gedimino technikos universitetas/ Kaunas: KTU. ISSN 1392-1207. 2018, Vol 24, no. 1, p. 61-64. Impact Factor 0.382.

„ISI Proceeding“

1. Vytautas Ostasevicius, Vytautas Jurenas, Rimvydas Gaidys, Ievgeniia Golinka. **Vibroacoustic handling and levitation of microparticles in air** // Journal of Vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gedimino Technical University. Kaunas: Vibroengineering Procedia. ISSN 2345-0533. 2017, Vol 15, no p. 100-104.

2. Vytautas Ostasevicius, Ievgeniia Golinka, Vytautas Jurenas, Rimvydas Gaidys. **Fast Ultrasonic Micro/Nanoparticles Separation from Fluids**, 22nd International Scientific Conference Mechanika 2017.

Konferencijų pranešimų medžiagoje

1. Blood purification using ultrasonic erythrocytapheresis, 20nd International Scientific Conference Mechanika 2015, 2015 04 23.

2. Actual problems of computer technology 2015.Simulation process of separation in microfluidic devices with the use of ultrasonic standing wave. Actual problems of computer technology 2015, 21-21 of May 2015.

3. Theoretical and experimental investigation to improve particles separation in liquid. Mechatronic systems and materials MSM 2015, 2015 07 07–09.

4. „Modern technologies in mechanics“, Analytical and computer modeling of impact of a standing ultrasonic wave on particles in liquid. International

conference of Young Scientists "Modern technologies in mechanics", 2016 04 21–23.

5. Numerical simulation for particles separation from blood flow. 21st International Scientific Conference „Mechanika 2016“, 2016 05 12–14.

6. Fast Ultrasonic Micro/Nanoparticles Separation from Fluids 22nd International Scientific Conference "Mechanika 2017", 2017 05 19–20.

7. High frequency separation of suspended by microparticles in viscosity liquid, VII Ukrainisko-Polskie naukowe dialogi 2017 10 18–21.

8. Vibroacoustic handling and levitation of microparticles in air, 29th International Conference on VIBROENGINEERING, 2017 12 01.

9. Rapid separation of nanoparticles in fluids by sonic and ultrasonic acoustophoresis. 23st International Scientific Conference „Mechanika 2018“, 2018 05 18.

Patentas A.Bubulis, E.Golinka, V.Jurenas, V. Ostaševičius, R.Gaidys
Ultragarsinis emulsijos separavimo įrenginys

Paraiškos numeris: 2017 507.

Užregistruoto prioriteto data: 2017 m. Balandžio 28 d.

TRUMPAI APIE AUTORE

Golinka Ievgeniia gimė 1991 m. Olenovkos gyvenvietėje, Donecko sr., Ukrainoje 2007–2011 – studijos Donecko Pramonės ir pedagogikos koledže, Suvirinimo ir buitinių prietaisų katedra; įgijo elektrotechnikos magistro bakalauro laipsnį.

2011–2013 – studijos Chmelnickio nacionaliniame universitete, Inžinerinės mechanikos fakultetas; įgijo elektromechanikos ir energetikos bakalauro laipsnį.

2013–2014 – studijos Chmelnickio nacionaliniame universitete, Inžinerinės mechanikos fakultetas; įgijo elektromechanikos ir energetikos magistro laipsnį.

2014–2018 – doktorantūros studijos Kauno technologijos universitete, mechanikos inžinerija (09T).

E. paštas: evgenija-golinka@rambler.ru

RESUME

Research Aim and Tasks

The aim of this research is to analyze and develop sonic and ultrasonics microparticle separation in fluid and in air methods and techniques. In order to achieve the aim, the following objectives were raised:

1. To carry out an overview of the research literature on bioparticles separation, to formulate the goals and objectives of the dissertation.
2. To develop numerical mathematical models for separation, handling and levitation of microparticles by sonic waves in fluid and in air.
3. To develop numerical mathematical models for microparticles separation by ultrasonic waves in fluid.
4. To validate experimentally computational models that combines sonic and ultrasonic microparticles separation in fluid and in air
5. To develop tools for separation, handling and levitation of microparticles by sonic waves in fluid and in air.
6. To develop tools for separation of microparticles by ultrasonic waves in fluids.
7. To create a prototype of separation of microparticles by ultrasound waves in the liquid.

Research Methods

Both theoretical and experimental studies were conducted in the course of research work presented in this dissertation. Theories of vibrations, fluid mechanics and acoustical waves physics were applied in numerical modeling which was carried out by means of finite element method within commercial software COMSOL Multiphysics. Methods of sonic and ultrasonic acoustic waves excitation were applied for experimental data processing. For validation of multi-level computational models several experiments with different setups were conducted for sonic and ultrasonic microparticles separation, handling and levitation. The research was carried out in the Institute of Mechatronics at the Kaunas University of Technology.

Scientific Novelty

1. Numerical models were developed that combine both sonic and ultrasonic frequency acoustic microparticles separation methods. Developed computational models take into account the complete fluid-cylinder structure dynamical interaction under sonic and ultrasonic frequency excitation.
2. As a result of the numerical analysis, the peculiarities of the acoustic effects on different types of fluids with microparticles were determined. Relations between acoustical and vibrational excitation of the particles in a fluid and in

the air were obtained thereby laying the path for the development of microparticles separation devices.

Practical Value

1. Computational models of microparticles separation were used to develop acoustical excitation devices. Application in different experimental setups is possible with only a change in model parameters but using the same acoustic action approach.
2. Microparticles separation/purification devices prototypes were developed, designed and manufactured, one of them was patented. These devices are applicable for microparticles separation from larger volumes of suspension.

Publications and Approbation of Research Results

The results of this dissertation have been published in 6 scientific papers: 3 in journals listed in WoS Clarivate Analytics, 2 – in ISI proceedings, 1 patent. The results have been presented in . 9 international conferences:

Items Presented for Defense

1. Microparticles separation by sonic frequency acoustic waves excitation numerical model and results of its experimental investigations;
2. Microparticles separation by ultrasonic frequency acoustic waves excitation numerical model and results of its experimental investigations;
3. Microparticles handling and levitation in air by sonic frequency acoustic waves excitation numerical model and results of its experimental investigations;
4. Microparticles sonic and ultrasonic separation by acoustic waves in suspension and handling-levitation in air devices;
5. Microparticles separation by ultrasonic frequency acoustic wave excitation device prototype.

Structure and Volume of Dissertation

The dissertation consists of an introduction, nomenclature, four chapters, conclusions, references, list of author's publications. Total volume of the dissertation is 87 pages, 83 figures and 3 tables.

General conclusions

1. A review of the research works on the dissertation thematics was carried out, the purpose and tasks of the research were formulated. The peculiarities of the sonic and ultrasonic separation of bioparticles have been analyzed.
2. The numerical mathematical model for microparticles sonic separation in fluid and handling/levitation in air were developed. The most effective fourth

mode of fluid-filled circular container excited by bottom-mounted piezo transducer-bimorph at 13.8 kHz separated the microparticles during 12s.

3. The numerical mathematical model for microparticles ultrasonic separation in fluid-filled tube-shaped piezo ceramic cylinder was developed. The most effective was selected 345 kHz excitation frequency. When the fluid is water, the particles get into the low sound pressure field of acoustic standing wave in 4 s, whereas the bioparticles in blood in 8 s.
4. The tools for microparticles sonic separation in fluid and handling/levitation in air were developed. For the validation of simulation results the holographic interferometry setup PRISM was used.
5. The tool for ultrasonic separation of microparticles was developed. For piezo ceramic cylinder modal analysis Polytec 3D scanning vibrometer was used and collector for microparticles gathering was fabricated. The samples of enriched in microparticles and purified fluids were obtained.
6. Computational models that combine both sonic and ultrasonic separation in different fluids methods were validated experimentally. The minor differences in simulation (350 kHz) and experimentally obtained (345 kHz) ultrasonic as well as respectively (13.5 kHz) and (13.8 kHz) sonic excitation frequencies, and coincidence of the microparticles concentration in low pressure eigenmode zones in both - simulation and experimentation cases testify that the mathematical models imitate the real blood separation/purification process.
7. The prototype device for ultrasonic separation of bioparticles in fluid was proposed.

UDK 621.928.18-66.084.7

SL344. 2018-05-30, 2 leidyb. apsk. 1. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas